

PROJETO DINÂMICO ÓTIMO DE UM ROBÔ PARALELO PLANAR DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Victor Renan Bolzon, vbolzon@alunos.utfpr.edu.br¹

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

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Leandro Augusto, leandromartins@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Alberto Carazzai, 1640 - Centro, Cornélio Procopio - PR, 86300-000

Resumo: Este trabalho propõe realizar um projeto dinâmico ótimo de um robô paralelo planar de juntas flexíveis com dois graus de liberdade. Serão utilizados os resultados obtidos através de uma otimização multiobjetivo dos índices de desempenho estabelecidos com base nos critérios cinemáticos e dinâmicos simultaneamente. Baseado na modelagem dinâmica do robô apresentada, será realizado o dimensionamento dos motores a partir da execução de uma trajetória estabelecida. Na trajetória são definidas as posições, velocidades e acelerações iniciais e finais.

Palavras-chave: Projeto Dinâmico Ótimo, Robô Paralelo, Modelagem Dinâmica e Otimização Multiobjetivo.

1. INTRODUÇÃO

Os robôs podem auxiliar seres humanos em tarefas que exigem alta precisão, repetibilidade e também em ambientes insalubres. Devido às suas características, as aplicações de robôs paralelos são bem amplas, podem-se destacar como: simuladores de voo (Stewart, 1965), simuladores veicular (Zhang e Zhang, 2013), máquinas industriais (Pierrot *et al.*, 2009), e em virtude da sua alta precisão pode ser utilizada em robôs cirúrgicos (Wapler *et al.*, 2003). Os robôs paralelos apresentam algumas vantagens potenciais em relação aos robôs seriais, tais como baixa inércia, alta velocidade de operação, alta rigidez e melhor precisão de posicionamento. Em contrapartida, estes têm um espaço de trabalho reduzido e singularidades cinemáticas no interior do espaço de trabalho.

O projeto ótimo de robôs paralelos tem como objetivo determinar os parâmetros, como por exemplo, as dimensões dos elos a fim de alcançar um desempenho ótimo com base em critérios de desempenho preestabelecidos. Assim a modelagem é essencial para conhecer as características cinemática e dinâmica do manipulador.

Para realização do projeto ótimo do robô paralelo de dois graus de liberdade, será considerado resultados de uma otimização multiobjetivo de índices de desempenho cinemáticos e dinâmicos para realizar o modelo 3D obtendo-se assim os parâmetros físicos do manipulador. Então será realizada a simulação dinâmica para avaliar o torque necessário para realização de uma trajetória estabelecida. Esta simulação é fundamental para o dimensionamento dos motores que serão utilizados no projeto ótimo do robô paralelo.

Para organizar esse trabalho foi dividido em 5 partes. Na segunda seção será apresentada a metodologia deste trabalho. Será apresentada na seção 3 a otimização multiobjetivo já comentada previamente. Na seção 4 é apresentado os resultados. E a última seção apresentará as conclusões deste trabalho.

2. Metodologia

Na Fig. 1, pode-se observar a representação do robô paralelo de dois graus de liberdade. O manipulador possui duas cadeias cinemáticas idênticas, que são consideradas simétricas neste trabalho. Sendo que cada cadeia cinemática possui uma junta ativa, localizada no ponto A_i , e uma junta passiva, posicionada no ponto B_i para $i = 1, 2$, além de dois elos rígidos. A flexibilidade, na junta ativa, é modelada como uma mola de torção elástica (k_i) que acopla os rotores do motor com os elos. No ponto p se encontra o efetuador final e sua posição é determinada através das coordenadas cartesianas $(\bar{x}_p, \bar{y}_p)$, a partir de um sistema de referência fixado entre A_1 e A_2 . A aceleração gravitacional atua perpendicularmente ao plano xy , o mesmo plano no qual o robô se movimenta.

Os comprimentos dos elos ($\bar{r}_1$, $\bar{r}_2$ e $\bar{r}_3$) podem ser definidos entre zero e infinito. No entanto, os comprimentos dos elos foram inicialmente adimensionalizados para realizar a análise e a otimização. Então, a variável auxiliar D é definida da seguinte forma $D = (\bar{r}_1 + \bar{r}_2 + \bar{r}_3)/3$. Portanto, os parâmetros adimensionais, r_i , para $i = 1, 2, 3$, são definidos a seguir:

$$r_1 = \bar{r}_1/D \quad r_2 = \bar{r}_2/D \quad r_3 = \bar{r}_3/D \quad (1)$$

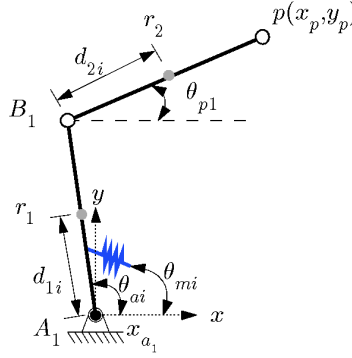


Figura 2: Cadeia cinemática com flexibilidade na junta ativa.

$$\tau_i - f_i = M_i(\theta_i)\ddot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + f_{ki} \quad (8)$$

onde cada um dos termos pode ser encontrados no trabalho previamente realizado (Bolzon e Lara-Molina, 2017).

- $\theta_m = [\theta_{m1} \ \theta_{m2}]^T$ é a posição angular dos motores antes da flexibilidade das juntas ativas.
- $M_i(\theta_i)$ e $C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)$ são as matrizes de inércia e Coriolis, respectivamente.
- $f_{ki} = [k_i(\theta_{ai} - \theta_{mi}) \ 0]^T$ é o torque elástico das juntas ativas.
- $\tau_i = (\tau_{ai}, \tau_{pi})^T$ é o vetor do torque nas juntas ativas e passivas.
- $f_i = (f_{ai}, f_{pi})^T$ é o vetor do atrito das juntas ativas e passivas.
- $\theta_i = (\theta_{ai}, \theta_{pi})^T$ é o vetor das juntas.
- $\ddot{\theta}_i = (\ddot{\theta}_{ai}, \ddot{\theta}_{pi})^T$ é a aceleração das juntas.

O modelo dinâmico para as duas cadeias cinemáticas é formulado a partir da Eq. (8), assim:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + f + f_k = \tau \quad (9)$$

com a definição de cada termo em (Bolzon e Lara-Molina, 2017).

- $\theta = (\theta_a^T, \theta_p^T)^T$, $\dot{\theta} = (\dot{\theta}_a^T, \dot{\theta}_p^T)^T$, $f = (f_a^T, f_p^T)^T$ e $\tau = (\tau_a^T, \tau_p^T)^T$.
- $f_k = (f_{ka}^T, f_{kp}^T)^T$ é o torque elástico nas juntas ativas e passivas, respectivamente.
- Considerando as juntas passivas: $f_{kp} = (0, 0)^T$ devido a que não é considerada a flexibilidade e nenhum torque é aplicado nas juntas passivas, então $\tau_p = (0, 0)^T$.
- $f_p = (0, 0)^T$ é o atrito nas juntas passivas.
- $M(\theta)$ and $C(\theta, \dot{\theta})$ são as matrizes de inércia e Coriolis das duas cadeias cinemáticas.

Deste modo, o modelo dinâmico completo é obtido com o acoplamento das cadeias cinemáticas nas juntas passivas do ponto p . As restrições cinemáticas do acoplamento são derivadas da matriz jacobiana. Utilizando o princípio de D'Alembert e o princípio do trabalho virtual (Le *et al.*, 2013). Assim, os torques das juntas ativas τ_a e o torque das juntas τ satisfazem a relação:

$$\tau_a = \Psi^T \tau \quad (10)$$

onde $\Psi = \partial\theta/\partial\theta_a$. Assim sendo, a equação dinâmica total é representada como:

$$M_t\ddot{\theta}_a + C_t\dot{\theta}_a + f_a + K(\theta_a - \theta_m) = \tau_a \quad (11)$$

onde $M_t = \Psi^T M(\theta) \Psi$ e $C_t = \Psi^T M(\theta) \dot{\Psi} + \Psi^T C(\theta, \dot{\theta}) \Psi$.

Para complementar a equação dinâmica total e realizar a análise do projeto ótimo, será considerada uma posição fixa, sem atritos nas juntas, por meio das condições: *i*) $\dot{\theta}_a = (0, 0)^T$, *ii*) $f_a = (0, 0)^T$ e, *iii*) $\tau_a = (0, 0)^T$. Portanto, a Eq. (11) sob essas condições é:

$$M_t\ddot{\theta}_a + C_t\dot{\theta}_a + f_a + K(\theta_a - \theta_m) = 0 \quad (12)$$

3. PROJETO ÓTIMO

No trabalho previamente realizado (Bolzon e Lara-Molina, 2017), foi realizada uma otimização multiobjetivo com o propósito de obter os comprimentos dos elos ótimos para o espaço de trabalho (r_{MIW}) e do desempenho elastodinâmico (λ_e). O problema de otimização pode ser observado na Eq. (13). Esta otimização é considerada complexa devido ao comportamento inverso dos índices de desempenho.

$$\begin{aligned} & \max_x \{ \lambda_e(x), r_{MIW}(x) \} \\ & \text{Sujeito a:} \\ & \sum_{i=1}^3 x_i = 3 \\ & 0 < x_1, x_2 < 3 \\ & 0 \leq x_3 \leq 1.5 \end{aligned} \quad (13)$$

A Tab. 1 mostra as soluções adimensionais ótimas obtidas através da otimização no trabalho previamente realizado (Bolzon e Lara-Molina, 2017).

Tabela 1: Comprimento Adimensionais dos Elos.

Parâmetros	Valores
r_1	0.75
r_2	1.5
r_3	0.75

3.1 Análise Dinâmica

A análise dinâmica tem como objetivo avaliar o torque necessário nos motores associados às juntas ativas para realizar uma determinada trajetória. Esta análise servirá como ferramenta complementar para o projeto dos motores juntamente com os comprimentos dos elos ótimos obtidos na metodologia de projeto apresentada.

Para este propósito, o conceito da dinâmica inversa é utilizado (Molina *et al.*, 2012). A dinâmica inversa permite calcular o torque nos motores para uma determinada trajetória utilizando equação dinâmica do manipulador previamente apresentada na seção 2.1 A Fig. 3 apresenta o diagrama da simulação dinâmica baseada no modelo dinâmico inverso.

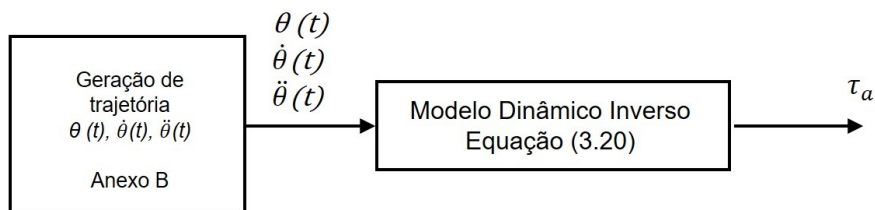


Figura 3: Análise Dinâmica.

4. RESULTADOS

A partir da seleção dos comprimentos dos elos adimensionais obtidos através da Eq. (13) apresentados na Tab. 1, os resultados serão dimensionalizados através da Eq. (1). Assim como foi apresentado nessa metodologia, foi calculado o espaço de trabalho útil adimensional, para esse caso 2,8736, e para ter um espaço útil de trabalho dimensional de $W = 40000mm^2$, o fator dimensional $D = 117,98mm$ encontrado através da Eq. (1), para evitar casas decimais, será utilizado $D = 120mm$. Por meio da Eq. (1) o comprimentos dimensionais dos elos $r_1 = 90mm$, $r_2 = 180mm$ e $r_3 = 90mm$ são definidos. E assim foi realizado o modelo 3D CAD (do inglês: *Computer Aided Design*), como pode ser visto na Fig. 4.

Para evitar a colisão ente os elos, eles foram projetados para que mesmo que estiverem apontando um para o outro no eixo x não houvesse contato entre eles. Não tornando necessária a construção das plataformas, onde os motores são presos em níveis diferentes, como pode ser observado na Fig. 4.

Com o auxílio do software Autodesk Inventor® foram obtidos os valores das propriedades dos elos mostrados na Tab. 2.

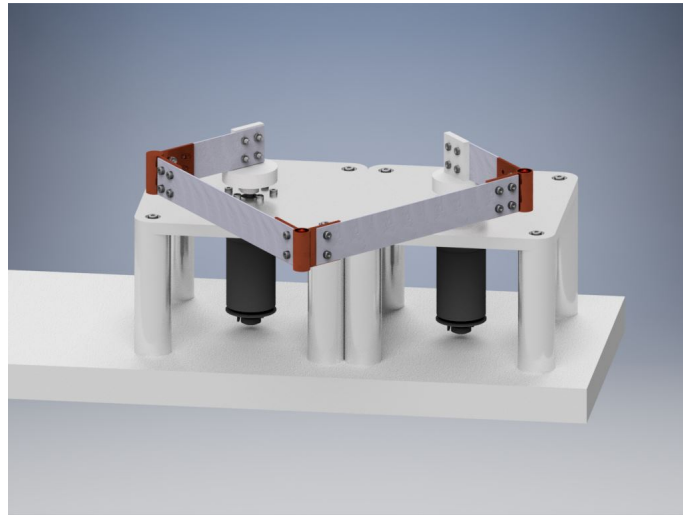


Figura 4: **Modelo 3D CAD do Robô Paralelo de dois Graus de Liberdade.**

Tabela 2: **Propriedades gerais dos elos.**

Elos	Comprimento	Massa	Centro de Massa	Momento de Inércia
r_1	90 mm	0.019 Kg	45 mm	$1.236 \times 10^{-5} \text{ Kg.m}^2$
r_2	180 mm	0.038 Kg	90 mm	$1.001 \times 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$

Utilizando os parâmetros dinâmicos apresentados na Tab. 2, foi realizado uma simulação para uma trajetória definida a fim de obter os resultados para obter o torque necessário dos motores para o dimensionamento dos mesmos.

A trajetória é definida através de um polinômio de 5ª ordem. A posição inicial na qual se encontram os atuadores é definida por θ_0 , ou seja, sem velocidade e aceleração ($\dot{\theta}_0 = \ddot{\theta}_0 = 0$), e depois da realização do movimento o manipulador retorna a condição de repouso ($\dot{\theta}_f = \ddot{\theta}_f = 0$), com $\Delta = \theta_f - \theta_0 = 3^\circ$ para o atuador 1 e $\Delta = -3^\circ$ para o atuador 2. O tempo definido para a realização deste movimento foi de 1 segundo, na Fig. 5 pode-se observar o comportamento dos atuadores na realização da trajetória proposta.

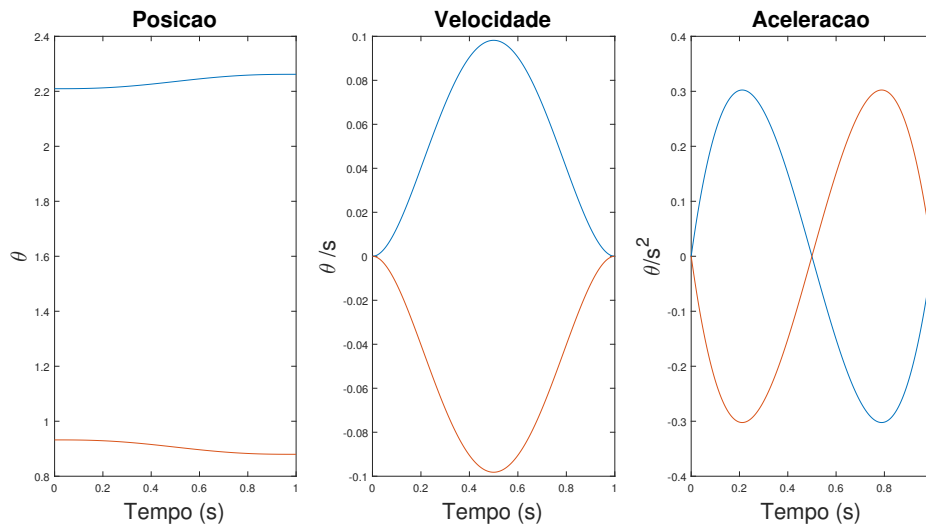


Figura 5: **Posição, velocidades e aceleração durante a trajetória.**

Pode-se observar que a Fig. 6 mostra o torque necessário dos atuadores na execução da trajetória estabelecida durante 1 segundo.

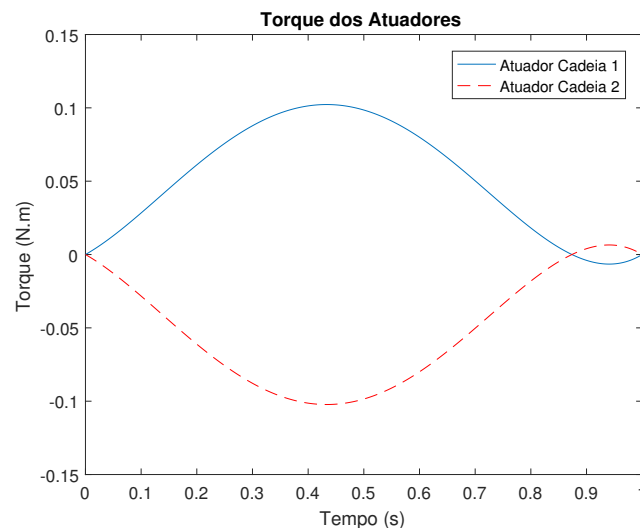


Figura 6: **Torques dos Atuadores durante a Execução da Trajetória.**

Fundamentado pelos resultados obtidos através da análise dinâmica, tornou-se possível definir quais os motores que serão utilizados no protótipo do manipulador paralelo. Na Tab. 3, pode-se observar os requisitos do projeto.

Tabela 3: **Premissas da escolha dos motores do projeto.**

Parâmetros	Valores
Torque	0.1 N.m
Velocidade	0.1 1/s

A partir das premissas encontradas através das simulações, foi possível definir os motores, em que as principais características técnicas podem ser observada Tab. 4. Estes motores permitem ainda realizar movimentos ainda com velocidades e acelerações maiores.

Tabela 4: **Especificações do Motor DC.**

Parâmetros	Valores
Torque	0.77 N.m
Velocidade de Rotação (sem carga)	350 rpm
Corrente (sem carga)	300 mA
Tensão de Operação	12 V
Redutor	30:1
Peso	260 g
Diâmetro do eixo	6mm

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um procedimento para a elaboração do projeto ótimo dinâmico de um robô paralelo de dois graus de liberdade. Foi apresentado a modelagem dinâmica do manipulador e também a otimização dos elos realizado para a obtenção dos torques necessários para a execução de uma trajetória. Os resultados permitiram avaliar os comprimentos dos elos com base em uma análise comparativa do conjunto de soluções e o seu respectivo desempenho ótimo.

Baseado nesses resultados foi possível estabelecer o projeto 3D CAD completo e assim realizar análise dinâmica para definição dos torques necessários para executar trajetórias estabelecidas e com isso definir os motores que serão utilizados na construção deste manipulador. Esses resultados são relevantes para realizar o controle numérico do mecanismo e também serão utilizados para a escolha dos atuadores que farão parte da construção do protótipo físico do robô.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procopio - PR.

7. REFERÊNCIAS

- Bolzon, V.R. e Lara-Molina, F.A., 2017. "Optimal design of flexible parallel robot based on kinematic and dynamic criteria". In *Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol (SBR LARS Robocontrol), 2017 Joint Conference on*. IEEE, pp. 1–6.
- Khalil, W. e Dombre, E., 2004. *Modeling, identification and control of robots*. Butterworth-Heinemann.
- Le, T.D., Kang, H.J. e Suh, Y.S., 2013. "Chattering-free neuro-sliding mode control of 2-dof planar parallel manipulators". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, No. 1, p. 22.
- Molina, L., Andres, F. *et al.*, 2012. "Simulação e implementação experimental de um controlador preditivo generalizado para um robô orthoglide baseado na modelagem dinâmica".
- Pierrot, F., Nabat, V., Company, O., Krut, S. e Poignet, P., 2009. "Optimal design of a 4-dof parallel manipulator: From academia to industry". *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 25, No. 2, pp. 213–224.
- Stewart, D., 1965. "A platform with six degrees of freedom". *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, Vol. 180, No. 1, pp. 371–386.
- Wapler, M., Urban, V., Weisener, T., Stallkamp, J., Dürr, M. e Hiller, A., 2003. "A stewart platform for precision surgery". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Vol. 25, No. 4, pp. 329–334.
- Zhang, C. e Zhang, L., 2013. "Kinematics analysis and workspace investigation of a novel 2-dof parallel manipulator applied in vehicle driving simulator". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 4, pp. 113–120.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

OPTIMAL DYNAMIC DESIGN OF A 2-DOF PLANAR PARALLEL ROBOT

Victor Renan Bolzon, vbolzon@alunos.utfpr.edu.br¹

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

Edson Hideki Koroishi, edsonh@utfpr.edu.br¹

Leandro Augusto, leandromartins@alunos.utfpr.edu.br¹

¹Federal University of Technology – Parana, 1640, Alberto Carazzai Ave., Cornelio Procopio - PR, Zip Code: 6300-000, Brazil

Resumo: This work proposes to realize an optimal dynamic design of a planar parallel robot of flexible joints with two degrees of freedom. It will be used the results obtained through a multiobjective optimization of performance indices established based on kinematic and dynamic criteria simultaneously. Based on the presented dynamic model of the robot, the sizing of the motors will be carried out from the execution of an established trajectory. The trajectory defines the initial and final positions, velocities and accelerations.

Palavras-chave: Optimal Dynamic Design, Parallel Robot, Dynamic Modeling and Multiobjective Optimization.