ESTUDO SOBRE CONTROLE TOLERANTE A FALHAS

Vicente Rodrigues de Oliveira Kondo, Mariana Santos Matos Cavalca

INTRODUÇÃO

O projeto de manipuladores robóticos exige uma modelagem para garantir a precisão e evitar oscilações indesejadas em suas articulações. Este trabalho abrange o desenvolvimento preliminar de um robô planar de dois graus de liberdade (2GDL), conforme exibe a Figura 1, partindo de sua concepção mecânica virtual até a validação teórica de sua malha de controle. Na indústria, arquiteturas como o Controle Orientado a Campo (FOC) com controladores Proporcional-Integral (PI) são amplamente adotadas pela simplicidade de implementação e baixo custo computacional (NEGRI et al., 2018). O objetivo central é projetar o modelo físico 3D do manipulador 2GDL e validar matematicamente um controlador PI isolado para a estabilização de uma junta rotativa em ambiente *Simulink*.

DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa consistiu na modelagem CAD do robô planar 2GDL no software Autodesk Inventor 2025, de onde foram extraídas as propriedades inerciais e de massa, assumindo material com densidade equivalente à de polímeros de impressão 3D (1000 g/cm^3). Paralelamente, a dinâmica do atuador rotativo foi aproximada no *Simulink* por um modelo canônico de segunda ordem. A sintonia do controlador PI foi guiada pela metodologia de Controle por Modelo Interno (IMC), que define a estrutura da malha como $c(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ (NEGRI et al., 2018). A simulação foi executada de forma isolada, sem injeção de torques de perturbação acoplados, respeitando as restrições da arquitetura PI, cuja largura de banda deve ser estritamente controlada para evitar efeitos de acoplamento na cascata (NEGRI et al., 2018).

RESULTADOS

O protótipo virtual do manipulador 2GDL foi modelado, resultando em uma estrutura leve com massa total aferida de 0,251 kg e momento de inércia principal máximo em torno de 906 kg·mm². Estes parâmetros aferidos no CAD validam a viabilidade mecânica do atuador MG996R selecionado (TOWERPRO, [s.d.]), indicando que o seu torque nominal é suficiente para acionar a junta sem degradação dinâmica excessiva. No ambiente de simulação, o controlador PI obteve êxito ao rastrear o degrau de posição angular da junta isolada, como mostra a Figura 2. anulando o erro estacionário. Contudo, a teoria indica que controladores PI clássicos exibem menor rigidez dinâmica frente a distúrbios de baixa frequência quando comparados a métodos multivariáveis preditivos (NEGRI et al., 2018).

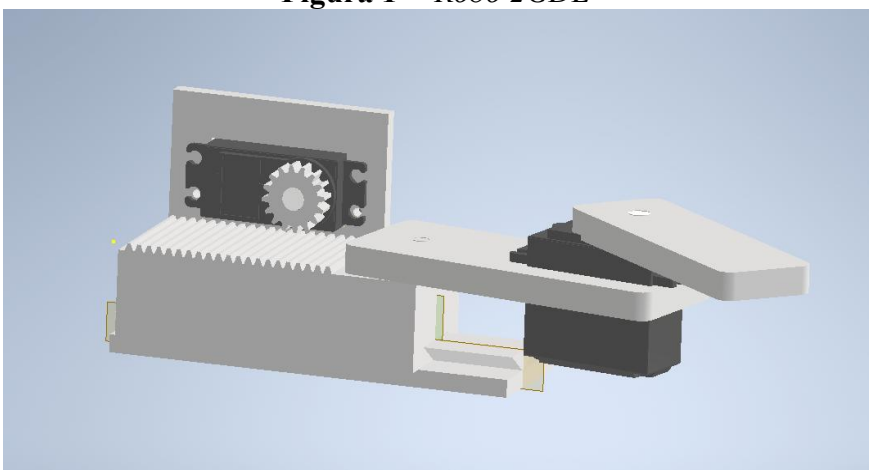
CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração do design mecânico virtual com a simulação em malha fechada comprovou a estabilidade matemática do controle PI para a junta projetada. E assim, a seleção do atuador mecânico através dos dados de massa e inércia extraídos do CAD se mostrou viável. A constatação da menor rigidez dinâmica inerente à arquitetura em cascata PI orienta os próximos passos da pesquisa.

Palavras-chave: robô planar; modelagem virtual; controle PI; rigidez dinâmica; Simulink.

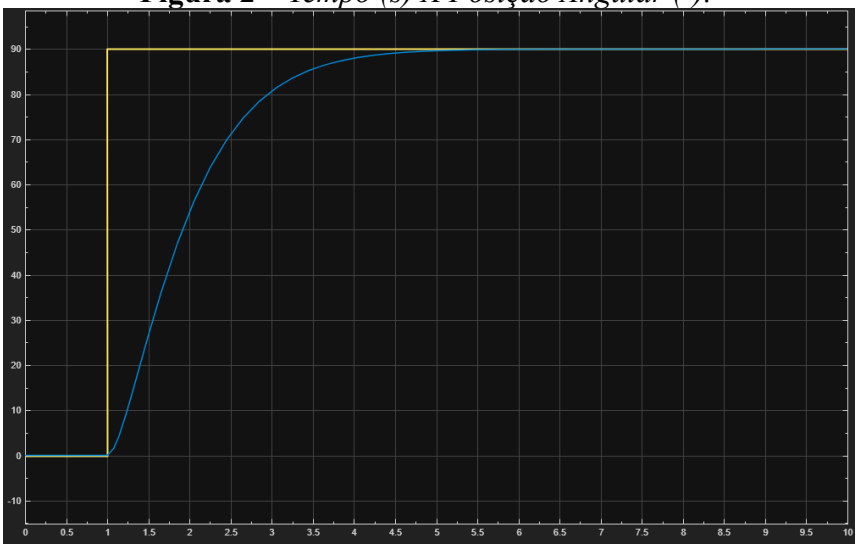
ANEXOS

Figura 1 -- *Robô 2GDL*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 2 – *Tempo (s) X Posição Angular (º).*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NEGRI, G. H.; BARTSCH, A. G.; CAVALCA, M. S. M.; NIED, A. Frequency Response Comparison of PI-Based and Cascade-Free MPC Field Oriented Control Using 1 kHz SVM Applied to a PMSM Drive. **Journal of Applied Instrumentation and Control**, v. 5, p. 1-8, 2018.

PEREIRA, M. R. **Estudo de técnicas de diagnóstico e controle tolerante a falhas aplicado a robôs manipuladores**. 2019. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

TOWERPRO. **MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo**. [S.l.]: TowerPro, [s.d.]. Datasheet.