

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE APLICADAS A UM PÊNDULO INVERTIDO SOBRE BASE MÓVEL

**CORRÊA, William R.; EVALD, Paulo J. D. O.
AZZOLIN, Rodrigo Z.
paulo.evald@gmail.com**

**Evento: XXIV Congresso de Iniciação Científica
Área do conhecimento: Engenharias, Automação, Modelagem, Controle**

Palavras-chave: Modelagem, Controle PID; Controle via realimentação de estados;

1 INTRODUÇÃO

Em se tratando de sistemas intrinsecamente instáveis e não lineares, o sistema pêndulo invertido sobre base móvel é tradicionalmente usado como exemplo inerente a esse contexto em livros de controle, tais como (OGATA, 2003) e (DORF e BISHOP, 2011). Em uma visão geral, o sistema pêndulo invertido consiste em uma haste vertical livre para se movimentar em torno de um ponto pivotado na extremidade inferior. Esse pivô é fixo em uma base móvel que pode se movimentar horizontalmente em uma faixa limitada pela ação de um motor que a aciona.

Após a haste ser posta na posição de referência, ou seja, verticalmente para cima, ela tende a cair naturalmente para algum dos lados, essa ação é a característica de instabilidade do sistema. Então, o objetivo principal é que o controlador mantenha a haste em equilíbrio na posição vertical. Para tal, o controlador avalia a inclinação da haste e baseado nessa informação faz com que o motor desloque a base móvel no sentido contrário à queda da haste para contrabalancear esse movimento natural e a manter em equilíbrio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A modelagem utilizada neste trabalho foi caixa branca, também conhecida como analítica ou teórica, pois se tinha conhecimento das relações matemáticas que descrevem os fenômenos dinâmicos que afetam o sistema. Para obter conhecimento do máximo de relações físicas que esse sistema pode ter foi realizada uma vasta revisão bibliográfica do estado da arte dos pêndulos invertidos.

Além disso, também foi realizada uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de controle, onde se optou por implementar controle PID, pois é muito popular na indústria e controle por alocação de pólos via realimentação de estados.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Inicialmente foi feita a modelagem matemática detalhada do sistema pêndulo invertido obtendo as seguintes equações diferenciais que regem a dinâmica da haste em relação à base móvel e do motor de corrente contínua, respectivamente.

$$\ddot{\theta}(t) + \left(\frac{3B_r}{4mL^2}\right)\dot{\theta}(t) - \frac{3g}{4L}\theta(t) = -\frac{3}{4L}\ddot{X}_p(t) \quad (1)$$

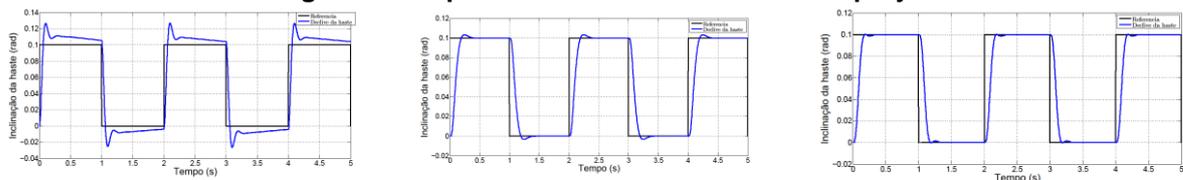
$$V_i(t) = \frac{1}{rK_a K_t} [(R_a J_m + R_a r^2 M_{BM})\ddot{X}_p(t) + (K_v K_t + R_a B_m + R_a r^2 B_C)\dot{X}_p(t)] \quad (2)$$

No projeto de controle PID foi identificado um problema de saturação do ganho integral. Para tratar-lo foi projetada uma variação dessa técnica, a qual reduz esse efeito, denominado *Wind-up*, conhecida por PID incremental, conforme visto em (CASTRUCCI, BITTAR e SALES, 2011). Os ganhos foram sintonizados pelo método do lugar das raízes, que se baseia nas características físicas e naturais do modelo, como visto em (PHILLIPS e HARBOR, 1997). Após isso, foi projetado um controle por realimentação de estados e duas técnicas de estimação de estados, para reduzir efeitos de ruídos e distúrbios inseridos nas simulações e realimentar o controle projetado, são elas: observador de estados de ordem plena e filtro de variáveis de estado.

4 RESULTADOS e DISCUSSÃO

Os resultados obtidos aplicando as técnicas de controle projetadas foram satisfatórios, pois conseguiram manter o pêndulo invertido equilibrado no ponto de instabilidade com uma resposta rápida e assintoticamente estável. A seguir é mostrada a inclinação da haste respondendo aos controles projetados sem a presença de perturbações. Da esquerda para direita: PID incremental, realimentação de estados via observador de estados de ordem plena e via filtro de variáveis de estado.

Figura 1- Resposta do sistema aos controles projetados



Fonte: Os autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como pode ser observado na literatura dos pêndulos, não há registros da aplicação do controle adaptativo robusto por modelo de referência no controle desse sistema, então se pretende implementar esta técnica de controle. Bem como construir um protótipo, realizar a identificação dos parâmetros e aplicar as técnicas de controle desenvolvidas via microcontrolador *Arduino*.

REFERÊNCIAS

- CASTRUCCI, P.; BITTAR, A.; SALES, R.; Controle Automático, 2011.
DORF, R.; BISHOP, R.; Sistemas de controle moderno. 8ªed., 2011.
OGATA, K.; Engenharia de controle moderno, 4ed., 2003.
PHILLIPS, C.; HARBOR, P.; Sistema de Controle por Realimentação, 1997.