

UM ESTUDO COMPLEMENTAR AO PROJETO DE CONTROLE PID DO PÊNDULO INVERTIDO

Héber Hwang Arcolezi 1 ; Rogério Bastos Quirino 2

1 Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da UNEMAT, heber_arcolezi2@hotmail.com

2 Docente do Curso de Engenharia Elétrica da UNEMAT, rb_quirino@hotmail.com

Introdução

O trabalho em desenvolvimento aqui apresentado é motivado por dois princípios: primeiro, pretende-se fazer uma discussão complementar de parte dos conteúdos apresentados na literatura de controle [OGATA,2011;DORF&BISHOP,2001], bem como em algumas publicações relacionadas ao controle PID aplicado ao problema clássico do pêndulo invertido [KHALIL ; ASHAB, 2003], [<https://www.control.isy.liu.se/student/.../invpendpmenglish.pdf>], [PUMAR et al, 2013], com o objetivo de reforçar a base teórica de formação dos estudantes dos cursos de engenharia. Em segundo lugar, espera-se apresentar para aos estudantes desses cursos, experiências nos ambientes Matlab e Simulink que inspiram interesse e curiosidade principalmente sobre a dinâmica do sistema em questão, mas também sobre quaisquer fenômenos em geral. Em resumo, queremos oferecer aos alunos os requisitos à base acadêmica e interesse pessoal para prosseguir estudos futuros na vasta gama de sistemas dinâmicos que são susceptíveis de se encontrar na prática de engenharia.

O pêndulo invertido é um dos sistemas dinâmicos clássicos de estudo na área de engenharia de controle, pois, possui características de instabilidade e não linearidade à malha aberta, mesmo sendo um sistema mecanicamente simples, a problematização de seu modelo traz conhecimento aplicado a diversos sistemas do dia a dia como: segway, lançamentos de foguetes, rônos, guindastes especiais, entre outros [VENDRAMINI e SILVA, 2010].

Um breve paralelo prático de como é o sistema do pêndulo invertido é o de tentar equilibrar uma vassoura pela ponta do cabo sobre a palma da mão, no qual, o método de controle para essa aplicação é movimentar a mão, a base do sistema, de um lado para o outro com o objetivo de produzir uma força oposta ao movimento instável da vassoura [OGATA, 2011].

Mesmo sendo uma técnica de controle já bastante explorada na literatura e pesquisas, esse artigo tem como objetivo discutir aspectos da técnica PID por vezes não explorados, por exemplo, como em: 1) [OGATA, 2011], que desenvolve o projeto dos controles servo e regulador com ganho somente integral no caminho servo, baseado na representação espaço de estados, mas sem explorar as dificuldades decorrentes do projeto do controle servo PID baseado nesse tipo de representação; 2) [OPPENHEIM,1987], que discute o projeto do controle regulador PD, mas sem explorar, ainda que por razão aparentemente “óbvia”, o efeito da inserção de um ganho integral naquele controlador, nem mesmo conceituar comparativamente as funções de um bloco PID na realimentação do regulador e no caminho direto do servomecanismo, aspecto importante a ser considerado, visto que é comum os alunos de graduação dos cursos de engenharia terem a compreensão errônea de que o emprego do controlador PID só ocorre no controle servomecanismo, exatamente por desconhecer conceitos, utilidades e efeitos dele na regulação; 3) [KHALIL;ASHAB, 2003], que não discute as implicações em ter estabelecido o ângulo da haste como sinal de referência no desenvolvimento do controle (regulador + servo), visto que tal estabelecimento pode resultar numa variante à representação e controle do modelo de modo a possibilitar o contorno das dificuldades relatadas no item 1).

Metodologia

O sistema do pêndulo invertido pode ser representado por uma haste alocada a um ponto de apoio sobre um carrinho num plano bidimensional, no qual o movimento do carrinho é restrito apenas ao plano da página para a direita ou esquerda. O comportamento do sistema, como mencionado anteriormente, é instável à malha aberta e, dado que, o objetivo de controle desse sistema é manter a haste na posição vertical é necessário um método de controle que satisfaça esse objetivo [MANDAL, 2006].

O projeto de sistemas de controle no espaço de estados é realizado através do método de alocação de polos. Esse método tem como restrição o sistema ser de estado completamente controlável, para que os pólos de malha fechada possam ser alocados em posição convenientemente desejada por meio de uma realimentação de estado [DORF e BISHOP, 2001]. A técnica de controle servo utilizada em [OGATA, 2011] é o servossistema do tipo 1. O princípio básico desse método é inserir um Integrador na saída do comparador da planta. Conforme observado, essa técnica já contém uma parte do controle PID que é o ganho Integral (I) e como apresentado pelo autor, apenas com essa ação de controle o sistema é estabilizado de forma satisfatória através de uma devida alocação de pólos.

Dessa forma, como o objetivo do trabalho é investigar a inserção dos três tipos de ganho na planta do sistema na saída do comparador, será implementado inicialmente o ganho Proporcional (P) ao ganho já aplicado ganho integral (I). O controle Proporcional-Integral (PI), será então projetado, analisado e avaliado em desempenho em relação ao controle (I) até então individualmente empregado. Posteriormente, será adicionado o ganho Derivativo (D) no sistema PI. Será demonstrado que a representação do modelo no espaço de estados baseado na definição do vetor de estados inicialmente feita ao projeto da parcela proporcional em [Ogata, 2011], impedirá o projeto das parcelas PD na composição do controlador PID, restando como alternativa o projeto por alocação de pólos com base na representação por função de transferência. As implementações e validações dos controladores projetados em ambos os casos forma realizadas nas plataformas Matlab e Simulink.

Resultados e discussão

O sistema do pêndulo invertido atinge a estabilidade com o método de controle por servossistema do tipo 1 (PI) utilizando o método de alocação de pólos. A implementação do ganho Proporcional no ramo direto na saída do comparador juntamente com a parcela Integral foi realizada de maneira satisfatória sem que houvesse quaisquer restrições na modelagem à dedução do controlador. Os gráficos obtidos das respostas do controle PI implementado mostram um aumento na amplitude e número de oscilações de acordo com o aumento do ganho Proporcional, porém sem redução significativa do tempo de acomodação.

Dessa forma, é notável que o ganho proporcional não contribuiu significativamente na resposta do sistema. Após obtido o controle Proporcional-Integral (PI) para o servossistema do tipo 1 para o pêndulo invertido, a próxima etapa do trabalho foi tentar adicionar o ganho Derivativo (D) ao controlador PI na malha direta na saída do comparador. Entretanto, a modelagem realizada em [OGATA, 2011] inviabiliza a dedução do controlador com o ganho derivativo pelo fato dele requerer o conhecimento de um elemento vetor de estado sem que o mesmo pudesse ser previamente definido. Procurando viabilizar o projeto do controlador PID, foi proposta a abordagem de alocação de pólos baseado na função de transferência e sua posterior implementação no ambiente Simulink a fim de se construir explicitamente o servossistema do tipo 1 com respectivas funções de transferências, quais sejam: do modelo do pêndulo, dos ganhos Proporcional, Integral e Derivativo.

Conclusões

Concluimos que o emprego do servossistema do tipo 1 com o ganho Integral proposto em [OGATA, 2011] produz os mesmos efeitos de resposta transitória, quando comparado ao controlador PI desenvolvido. A tentativa de explorar a dedução do controlador PI baseado na definição de vetor de estado feita em [OGATA, 2011] é didaticamente relevante na medida em que ela permite abstração analítica do sistema de controle a ser projetado, além de contribuir para o arcabouço teórico disponível nas referências bibliográficas de sistemas de controle. Explorações dessa natureza da teoria de controle aplicada a um “benchmark”, como o pêndulo invertido, poderiam ser mais comumente realizadas pelo fato delas permitirem uma maior compreensão e domínio da teoria na formação dos futuros engenheiros e pesquisadores. Atualmente, estamos investigando a utilização da modelagem do sistema de controle no domínio da frequência utilizada em [KHALIL;ASHAB, 2003] na busca de uma representação no espaço de estados equivalente que viabilize o projeto do controle servomecanismo PID baseado nesta mesma representação.

Palavras-Chave: alocação de pólos ; espaço de estados; pêndulo invertido; pid; simulink

Referências

DORF, R.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle moderno**. 8a ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MANDAL, A. K. **INTRODUCTION TO CONTROL ENGINEERING: Modeling, Analysis and Design**. 1st ed. Daryaganj, New Delhi: New Age International Publishers, 2006.

VENDRAMINI, G.; SILVA, P. S. **Controle de um Pêndulo Invertido sobre Plataforma Móvel Utilizando PID e MFAC**. In: Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications (DINCON'10), 9., 2010, Serra Negra, SP. Proceedings of the 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control, and Applications, p. 405-414, 2010.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Prentice - Hall, 2011.

OPPENHEIM, ALAN V. Lecture 26, Feedback Example: The Inverted Pendulum | MIT RES.6.007, 1987. Signals and Systems, Spring 2011. MIT OPENCOURSEWARE.

Laboration in Automatic Control Control of an inverted pendulum, REGLERTEKNIK AUTOMATIC CONTROL, LINKÖPINGS Universitet, March 9, 2012. <https://www.control.isy.liu.se/student/.../invpendpmenglish.pdf>

KUMAR, P.; CHAKRABORTY, K.; MUKHERJEE, R. R.; MUKHERJEE, S. Modelling and Controller Design of Inverted Pendulum. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 1, January 2013.

S., KHALIL; M., ASHAB. Inverted Pendulum Analysis, Design and Implementation. Instrumentation and Control Lab at the Institute of Industrial Electronics Engineering, July, 2003, Karachi, Pakistan. <http://www.engr.usask.ca/classes/EE/480/Inverted%20Pendulum.pdf>