https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2019

Desenvolvimento, modelagem e controle de um módulo didático *Ball and Beam*

Development, modeling and control of a Ball and Beam

Julio Yuzo Yassuda
yuzuyas@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Emerson Ravazzi Pires da Silva
emersonr@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

RESUMO

Com a grande deficiência em estudos de aplicações práticas de controle devido ao alto custo e às elevadas proporções físicas de plantas industriais, surgiram os módulos didáticos que, comumente, representam processos industriais, porém em escala reduzida. Entretanto, devido ao seu elevado custo relativo, esses módulos costumam ser de difícil aquisição, não só pela instituição local, como também por outras instituições de ensino. Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um módulo didático *Ball and Beam* de baixo custo de fabricação, além da modelagem, a implementação de um controlador Proporcional Derivativo (PD).

PALAVRAS-CHAVE: Módulo didático. Controle de Posição. Controle PD.

ABSTRACT

With the great deficiency in studies of practical applications of control due to the high cost and the large physical proportions of industrial plants, the didactic modules appeared which commonly represent industrial processes, but in small scale. However, due to their high relative cost, these modules are often difficult to acquire, not only by the local institution, but also By other educational institutes. Wherefore, this work proposes the development of a ball and beam module of low-cost manufacturing, in addition, the modeling and the implementation of a Proportional Derivative (PD) controller.

KEYWORDS: Didactic module. Position control. PD control.

Recebido:
Aprovado:

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de se automatizar processos para obter uma maior confiabilidade e padronização dos mesmos, o controle torna-se um componente importante e intrínseco para tal. Com isso, o controle é parte integrante de sistemas como veículos espaciais, sistemas robóticos, sistemas de fabricação, e quaisquer outras operações industriais (OGATA, 2010).

Dentre os vários tipos de controle, o controle de posição é um dos mais utilizados na indústria, tendo uma vasta aplicação, por exemplo, em elevadores, em esteiras, em robôs e em fresas (DINIZ, 2007). Contudo, devido à magnitude dessas

e outras aplicações e por questões econômicas, se torna inviável interrompê-las com o intuito de estudar estratégias de controle. Dessa forma, sugiram os módulos didáticos para o estudo de estratégias de forma prática, sendo um exemplo o módulo *Ball and Beam*.

O *Ball and Beam* é um módulo didático de controle de posição, que tem como objetivo equilibrar uma bola ao longo de um trilho a partir da atuação de um motor que altera a inclinação deste. Dessa maneira, é possível estudar a modelagem e identificação do sistema, comunicação sensor/atuador com o equipamento que comanda e monitora o módulo e as estratégias de controle, objetivando aplicá-las fisicamente em um sistema, sendo de grande utilidade principalmente na área acadêmica. Na literatura especializada, pode-se encontrar diversos trabalhos envolvendo o controle de um sistema *Ball and Beam*, destacando como aplicação de estratégias de controle a compensação do sistema por rede neural proposta por Xiaoou Li e Wen Yu (2010), utilização de observador de modos deslizantes desenvolvida por Mohammad Luai Hammadih et al (2015) e a aplicação de controle robusto feita por Beauchamp Báez et al (2014).

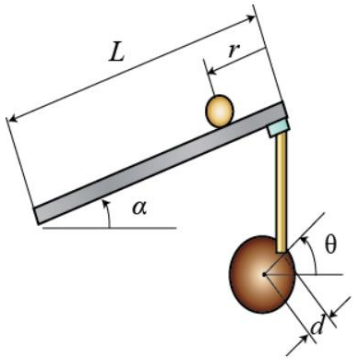
Seguindo esse caminho, neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um módulo didático *Ball and Beam*, além da modelagem e aplicação de um controlador Proporcional Derivativo (PD).

MÉTODO

O módulo didático *Ball and Beam* é um sistema de controle de posição em que um motor é responsável pela alteração do ângulo de um trilho em relação à horizontal, fazendo com que uma bola deslize com apenas um grau de liberdade ao longo de seu comprimento (WANG, 2007).

O *Ball and Beam* é um sistema mecânico que pode ser modelado através de vários métodos diferentes, tais como as modelagens newtoniana, lagrangeana e hamiltoniana (ROSA, 2008). Dessa forma, neste projeto será utilizada a modelagem lagrangeana para descrever a dinâmica do sistema. Além disso, esta dinâmica pode ser representada através dos dois modelos, a função de transferência e o espaço de estados por ser uma dinâmica linear. Considere a Figura 1, com a representação do sistema *Ball and Beam*.

Figura 1 – Modelo *Ball and Beam*.



Fonte:http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam&section=System Modeling.

A representação dinâmica do modelo *Ball and Beam* através da função e transferência pode ser vista na Equação (1).

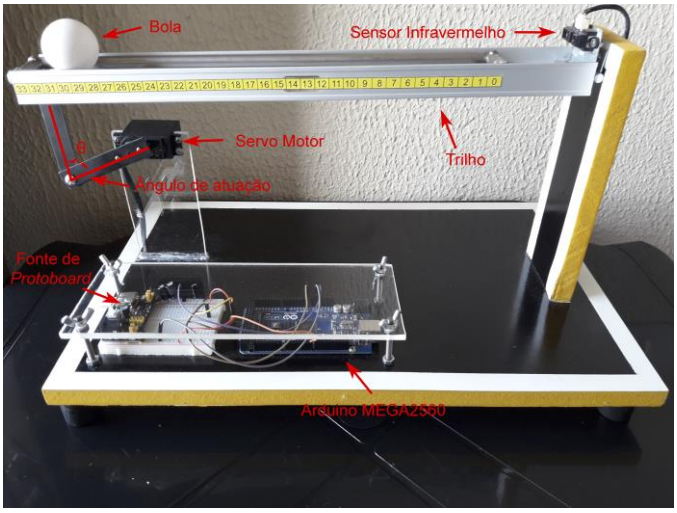
$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L\left(\frac{J}{R_{aio}^{\ 2}} + m\right)s^2} \quad (1)$$

sendo $R(s)$ a posição da bola, $\theta(s)$ o ângulo do motor, m a massa da bola, g a aceleração da gravidade, d o raio da engrenagem que liga o motor com o braço, L o comprimento do trilho, J o momento de inércia da bola e R_{aio} o raio da bola.

MATERIAIS

Para a construção do módulo didático, buscou-se a utilização de materiais de baixo custo e de fácil acesso, a fim de permitir a sua replicabilidade. Assim o sistema físico desenvolvido está ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – *Ball and Beam* desenvolvido.



Fonte: Autoria Própria.

No módulo desenvolvido, foi utilizado um servo motor como atuador para alterar a inclinação do trilho, a ser acionado pelo sinal oriundo de uma placa de comunicação Arduino® Mega2560. Por sua vez, o controle e o processamento de dados são realizados pelo *software* Simulink®, com base no sinal de posição da bola a partir do sensor de distância infravermelho. A fonte de *protoboard* foi utilizada para a alimentação dos circuitos do sensor infravermelho e servo motor devido a insuficiência de corrente fornecida pelo Arduino para a alimentação dos circuitos.

CONTROLE

Para o controle do módulo didático, foi implementado um controlador Proporcional Derivativo (PD) via polos de malha fechada desejados considerando a função de transferência obtida através da modelagem lagrangeana. A Equação (2) mostra a função de transferência do controlador.

$$G_{control}(s) = K_p + K_d s \quad (2)$$

sendo K_p o ganho proporcional e K_d o ganho derivativo.

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Com base na modelagem lagrangeana, que apresenta a função de transferência do sistema *Ball and Beam*, foram realizadas as medições necessárias para a obtenção do modelo matemático, a função de transferência do sistema *Ball and Beam* é demonstrada na Equação (3).

$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{1{,}744}{s^2} \quad (3)$$

PROJETO CONTROLADOR PD

Após obter as representações da dinâmica do sistema, foi realizado a sintonia do controlador considerando a função de transferência obtida através da modelagem. Assim, para a sintonia do controlador PD foram considerados os polos de malha fechada desejados. Tais polos foram obtidos através de diversos testes computacionais e simulações no modelo. Os polos desejados estão apresentados na Equação (4).

$$p_{1,2} = -1{,}5745 \pm 1{,}9540\,i \quad (4)$$

Com os polos de malha fechada desejados, obtém-se o polinômio desejado dado pela Equação (5).

$$s^2 + 3{,}149\,s + 6{,}297 \quad (5)$$

Com isso, é comparado o polinômio desejado com o polinômio característico de malha fechada do sistema compensado com a finalidade de determinar os parâmetros do controlador, dado pela Equação (6).

$$s^2 + 1{,}744\,K_d s + 1{,}744\,K_p = s^2 + 3{,}149\,s + 6{,}297 \quad (6)$$

Assim, obtém-se a função de transferência do controlador dada pela Equação (7).

$$G_{control}(s) = 3{,}6 + 1{,}8s \quad (7)$$

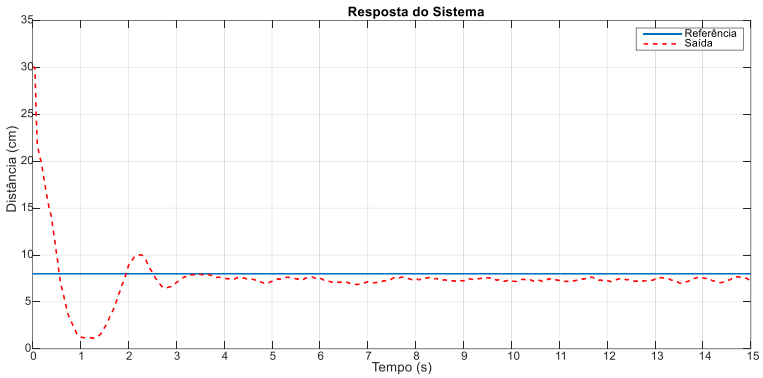
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o projeto do controlador desenvolvido e o módulo didático construído, realizou-se implementação prática para validar o controlador no sistema *Ball and Beam*, bem como observar seu comportamento dinâmico. O teste foi realizado considerando o controlador sintonizado a partir da função de transferência do modelo lagrangeano. Assim, realizou-se teste no sistema com *setpoint* tipo entrada degrau unitário de amplitude constante de 8 cm.

A Figura 3 mostra a comparação entre o sinal de saída, $r(t)$, obtido experimentalmente e o sinal de referência, $\theta(t)$. Nota-se que o sistema se acomodou em aproximadamente 3 segundos, entretanto o erro de regime não foi

nulo como esperado. Tal fato se deve ao modelo lagrangeano não representar de forma fiel a dinâmica do sistema real, visto que informações adicionais podem ter sido desconsideradas no conjunto de equações da modelagem.

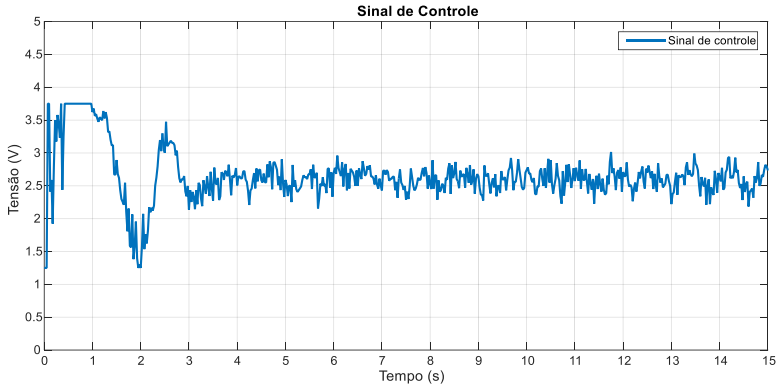
Figura 3 –Resposta ao degrau do sistema compensado.



Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 4 apresenta o sinal de controle $u(t)$ durante o controle do sistema. Vale ressaltar que o sinal de controle não é nulo neste sistema, pois o equilíbrio do trilho se dá quando o servo motor está posicionado em um ângulo de 90 graus. Convertendo este ângulo em tensão, tem-se $2{,}5\,V$, indicando baixo sinal de controle. No início, o sinal de controle se mostrou bastante oscilatório com amplitudes elevadas. Depois de 3 segundos, percebe-se uma pequena variação do sinal aplicado em torno de $2{,}5\,V$, demonstrando que o sistema entrou em regime estacionário.

Figura 4 – Sinal de controle do sistema compensado.



Fonte: Autoria Própria.

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento, modelagem e controle de um módulo didático *Ball and Beam*, sendo seu resultado validado através de teste experimental. Os materiais e métodos utilizados permitiram também o desenvolvimento de tópicos relacionados ao sensoriamento, comunicação, alimentação, controle e identificação de sistemas.

Utilizaram-se materiais de baixo custo visando a replicabilidade do módulo. Para o controle do sistema, foi implementado um controlador Proporcional Derivativo através dos polos de malha fechada desejados, que foram escolhidos a

partir de diversos testes computacionais e simulações no modelo. O controlador foi projetado considerando o modelo lagrangeano, apresentando resultados satisfatórios.

No mais, o trabalho exposto possui perspectivas para aprimoramento e desenvolvimento de trabalhos futuros, tais como na melhoria da precisão de captura da distância da bolinha ao longo do trilho, a utilização de outras estratégias de controle como controle robusto através de normas H_2 e H_∞, controladores do tipo LQR, controle chaveado, entre outros.

REFERÊNCIAS

BÁEZ, Beauchamp et al. **Control robusto del sistema de bola y viga**. 12. Latin American and Caribbean Conference for Engineering nad Technology, Guayaquil, Equador, 22 jul. 2014.

DINIZ, Eber de Castro et al. **Simulação de controle de posição de um motor de indução trifásico utilizando controle vetorial indireto**. Revista Tecnológica, Fortaleza, v. 28, n. 2, p. 238-244, dez. 2007.

HAMMADIH, Mohammad Luai et al. **Interpolating sliding mode observer for a ball and beam system**. International Journal of Control. 9. ed., v.89, p. 1879-1889, 15 abr. 2015.

LI, Xiaoou; YU, Wen. **Synchronization of ball and beam systems with neural compensation. International Journal of Control**. 3. ed., v.8, p. 491-496, 5 jun. 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.

ROSA, Ricardo M. S. **Modelagem newtoniana, lagrangeana e hamiltoniana de sistemas mecânicos discretos**. Departamento de Matemática Aplicada, UFRJ, 2008.

WANG, Wei. Control of Ball and Beam System. School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide, Austrália, 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela ajuda financeira e pelo espaço físico cedido para o desenvolvimento do projeto. Além disso, agradeço ao meu orientador prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva por me incentivar e ajuda a superar as dificuldades encontradas no decorrer do projeto.