

PROJETO DE UM SISTEMA *BALL AND BEAM* PARA O ENSINO DE CONTROLE AUTOMÁTICO

JANITO DOS SANTOS RAMOS* LUÃ TADEU MACHADO* ACCACIO FERREIRA DOS SANTOS NETO*
MURILLO FERREIRA DOS SANTOS *

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais– Campus III
Rua José Péres nº 558, Centro, Leopoldina–MG, Brasil

Email: janitodossantos23@gmail.com, l.rauzi@gmail.com, accacio@leopoldina.cefetmg.br
murillo@leopoldina.cefetmg.br

Abstract— The control techniques of learning is directly related to educational platforms that exist in laboratories. This article aims to design the project for an experimental Ball and Beam structure, in order to contribute to control laboratory subjects, through the development of new pedagogical practices for Automatic Control Teaching. To assemble the physical platform, it was chosen the use of inexpensive materials, allowing its acquisition at the courses. It was applied the digital PID controller platform (Proportional - Integral- Derivative) through an Arduino microcontroller. For simulations, it was used Matlab/Simulink software. The results were presented in order to demonstrate the functioning of the constructed system and its applicabilities.

Keywords— Control in education, Automatic Control, Ball and Beam, digital PID controller, System Identification, Didactic Plant.

Resumo— O aprendizado de técnicas de controle está relacionado diretamente às plataformas didáticas que existem nos laboratórios. O presente artigo trata de um projeto para uma estrutura experimental do tipo *Ball and Beam* (bola e barra), com o propósito de colaborar para disciplinas em laboratório de Controle, mediante o desenvolvimento de novas práticas pedagógicas voltadas para o ensino de Controle Automático. Para a montagem da plataforma física optou-se pela utilização de materiais de baixo custo, facilitando sua aquisição nos cursos. Foi aplicado na plataforma o controlador digital do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) mediante o uso de um microcontrolador Arduino. Para simulações, foi utilizado o *software* Matlab/Simulink. Os resultados são apresentados com intuito de demonstrar o funcionamento do sistema construído e a sua aplicabilidade.

Palavras-chave— Ensino em Controle, Controle Automático, *Ball and Beam*, Controlador PID Digital, Identificação de Sistemas, Planta Didática.

1 Introdução

É manifesto que a educação em âmbito geral passa por um período de reformulação, onde o re-pensar da educação ganha cada vez mais destaque (Froyd et al., 2012). Mais especificamente na educação de Controle Automático, sabe-se da importância e necessidade da utilização de plantas industriais para que os alunos tenham contato com situações próximas ao que enfrentarão na vida profissional. Observa-se que a teoria de Controle Automático coloca problemas não só para os seus praticantes (nas várias indústrias que fazem uso dela), mas também por aqueles que pretendem ensinar nos cursos de graduação (Colon and Diniz, 2009).

Adicionalmente, a aquisição de plantas físicas para propósito do ensino de controle prático é relativamente difícil, porque soluções comerciais podem superar as possibilidades econômicas dos Departamentos das Universidades Nacionais. Portanto, umas das possibilidades de se obter os objetivos do ensino prático é desenvolver um equipamento para atividade de laboratório em controle (Coelho et al., 2001).

Nesse sentido, o presente trabalho tem como propósito acrescentar soluções desenvolvidas no

Laboratório de Controle Automático do CEFET-MG (Campus III) a fim de que os professores das disciplinas da área de controle automático possam enriquecer suas aulas através de experimentações práticas em laboratórios.

Neste artigo apresenta-se um sistema de baixo custo útil para aplicação ou desenvolvimento de práticas pedagógicas voltadas para o ensino de Controle Automático: a planta *Ball and Beam*.

Ball and Beam é um dos modelos mais populares para o ensino de engenharia de sistemas de controle, sendo objeto de numerosos artigos de pesquisa (Keshmiri et al., 2012). O objetivo deste sistema físico é controlar a posição de uma bola que pode se deslocar ao longo de uma barra através do controle da posição angular do atuador, fato que se assemelha com a dinâmica de sistemas reais no que tange ao movimento do centro de massa. Deste modo, a planta relaciona-se com a dinâmica de estabilização horizontal de um avião durante o pouso e/ou no fluxo turbulento do ar, permitindo a aplicação de importantes métodos de controle clássico e moderno (Scalabrin et al., 2014; Yu, 2009; Li and Yu, 2010).

É importante salientar que o sistema possui a malha aberta instável e não linear. Sabe-se através de estudos que esta não linearidade depende

do desvio angular da barra, pois quando a barra desvia um pequeno ângulo, a partir da posição horizontal, a propriedade não linear não é significativa (Wang, 2007). Nesse caso, é possível linearizar o sistema. No entanto, quando as não linearidades tornam-se significativas, ou seja, o ângulo da barra em relação à horizontal é maior do que 30 graus, uma aproximação linear simples não é precisa. Deste modo, um controle avançado, como técnica de controle não linear é a melhor opção.

Este artigo se divide na seguinte forma: na Seção 2 é abordada a planta didática; na Seção 3 descreve-se a proposta da planta; na Seção 4 os resultados e posteriormente na Seção 5 são feitas as considerações finais.

2 Planta Didática: *Ball and Beam*

O projeto *Ball and Beam* consiste em quatro diferentes subsistemas: medição, atuação, controle e protótipo mecânico. O sistema de medição deve ser capaz de mensurar a posição da bola e enviar esse sinal para o controlador. O sistema de atuação deve alterar o ângulo da barra de acordo com o sinal enviado pelo controlador. O sistema de controle precisa receber os sinais enviados pelo sistema de medição, analisá-los, tratá-los e a partir disso calcular a ação de controle necessária para corrigir a posição da bola, além de enviar esse ângulo para o sistema de atuação. O sistema mecânico consiste em uma barra, uma bola, um braço de alavanca e outros componentes adicionais.

Os quatro sistemas devem responder de maneira precisa, veloz, operar com o mínimo de falhas e possuírem baixo custo, podendo ser encontrados em lojas de materiais elétricos, eletrônicos e de construção.

Para atender os requisitos citados acima foram escolhidos os seguintes componentes apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Componentes.

Medição	Ultrassônico HC-SR04
Atuação	TowerPro MG995 Servo
Controle	Arduino

Para a redução de custos do projeto, os materiais utilizados para montagem do sistema mecânico foram adquiridos na marcenaria e nos laboratórios do campus. A montagem final do projeto é mostrada na Figura 1.

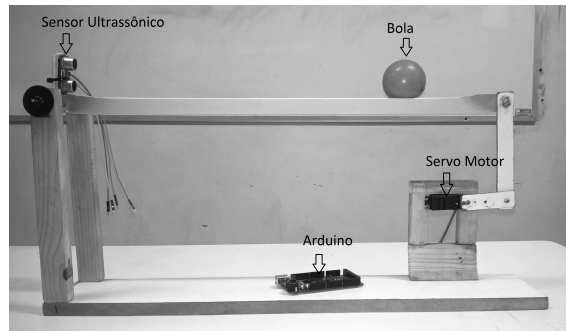


Figura 1: Planta Didática desenvolvida.

3 Proposta de aplicação da planta

De forma geral, duas linhas tradicionais podem ser utilizadas para o desenvolvimento de práticas pedagógicas voltadas ao ensino de controle automático: o desenvolvimento de sistemas de forma integral (Elaboração do: sistema físico, sistema de mensuração e aquisição de dados etc.), ou o estudo e a aplicação de métodos distintos de controle para um determinado sistema já desenvolvido. Especificamente, em sequência, apresenta-se a proposta baseada por meio de um sistema já desenvolvido com o objetivo de projetar um controlador para o sistema em estudo.

Nesta direção, apresenta-se a proposta de etapas de desenvolvimento, a fim de controlar o sistema físico: Modelagem do sistema em estudo; Estudo e projeto do controlador; Implementação do controlador; Simulação numérica no Simulink; Ensaios experimentais

3.1 Modelagem do sistema em estudo

A modelagem do sistema físico pode ser feita através de várias abordagens. Uma dessas abordagens, eleita para aplicação neste trabalho, classifica a modelagem em três categorias de modelagem (Aguirre, 2007): caixa branca (conceitual), caixa preta (empírica) e caixa cinza. Em sequência apresenta-se a modelagem do tipo caixa branca e caixa preta, bem como os resultados obtidos.

3.1.1 Modelagem conceitual

A modelagem conceitual também é conhecida como caixa branca ou fenomenológica. Esta abordagem trata o sistema através do equacionamento de leis físicas (Aguirre, 2007).

Em (Chang et al., 2013) encontra-se o tratamento do sistema desconsiderando o deslizamento de rolagem da bola e o atrito entre a barra e bola (Ver Figura 2).

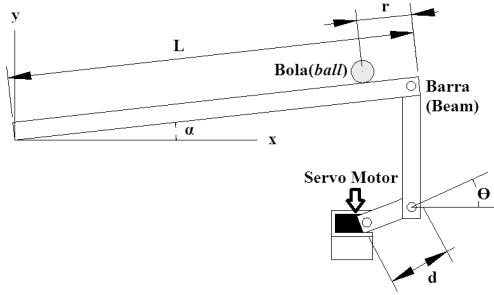


Figura 2: Parâmetros para modelo matemático.

Tais considerações resultam na seguinte função de transferência (Lisboa et al., 2005):

$$P(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = -\frac{mgd}{L \left(\frac{J}{R_b^2} + m \right)} \cdot \frac{1}{s^2}, \quad (1)$$

onde:

m – massa da bola = 0,035 kg
 R_b – raio da bola = 0,029 m
d – dimensão da alavanca = 0,045 m
g – aceleração gravitacional = $-9,8m/s^2$
L – comprimento da barra = 0,54 m
J – momento de inércia da bola = $1,18 \cdot 10^{-5} kgm^2$
r – posição da bola
 α – ângulo da barra
 θ – ângulo da engrenagem do servomotor

Substituindo os parâmetros matemáticos no sistema físico, chega-se a:

$$P(s) = \frac{0,7056}{s^2} \quad (2)$$

3.1.2 Modelagem empírica

A modelagem empírica, ou identificação de sistemas, tem por objetivo construir modelos matemáticos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais observados na planta (Aguirre, 2007).

Nesta proposta, utilizou-se o ensaio de identificação em malha aberta através da resposta ao degrau: posicionou-se o ângulo da engrenagem do servomotor 60 graus abaixo da posição de equilíbrio do sistema, realizando através do sensor ultrassônico medições da posição bola sobre a barra em um intervalo de tempo determinado.

Com as medições realizadas, deve-se encontrar uma equação que descreva a dinâmica do sistema. Como é de conhecimento que o sistema *Ball and Beam* tem uma equação característica do tipo $g(t) = at^2$, basta ajustar a constante do polinômio. Utilizando-se as funções *fitttype* e *fit* do *software* Matlab determina-se que a é 0.5644. Aplicando a transformada de Laplace e aplicando o degrau, obtém-se a equação que modela o sistema:

$$G(s) = \frac{1,13}{s^2} \quad (3)$$

3.1.3 Resultados da modelagem

Os gráficos das respostas do sistema real e dos modelos conceitual e empírico são apresentados na Figura 3.

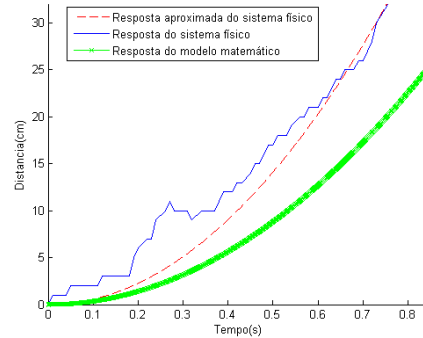


Figura 3: Resultado da modelagem.

Observa-se na Figura 3 que dentre os modelos o que melhor representa o sistema físico *Ball and Beam* é o modelo empírico. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que identificação contempla, nesta situação caso, informações adicionais que foram desconsideradas no conjunto de equações do modelo conceitual. Enfim, no decorrer no trabalho utiliza-se o modelo empírico.

3.2 Estudo e projeto do controlador

Dentre as várias estratégias de controle apresentadas na literatura (Ogata, 2011), elegeu-se o controlador do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) pela vasta utilização e aplicação nas mais diversas áreas de aplicação. Analisando a função de transferência encontrada em (3) observa-se que o sistema possui um duplo integrador. Logo, sabe-se que para o sistema em malha fechada não é necessário a ação integral do controlador quando deseja-se o erro em regime nulo tanto para a entrada em degrau ou rampa.

Assim, é escolhido o controlador PD de equação igual a:

$$G_c(s) = K_d s + K_p \quad (4)$$

Onde:

- K_d - Constante derivativa.
- K_p - Constante proporcional.
- G_c - Função de transferência do controlador.

Para este projeto, deseja-se os seguintes critérios de desempenho: tempo de estabilização $t_s < 4$ segundos e máximo sobressinal $UP\% < 10\%$.

A partir de Ogata (2011) tem-se as (5) e (6):

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (5)$$

$$UP\% = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (6)$$

Onde ζ é o coeficiente de amortecimento e ω_n é a frequência natural não amortecida.

Considerando $t_s = 3,5$ segundos e $UP\% = 9\%$, tem-se $\zeta = 0,61$ e $\omega_n = 1,86$ rad/s. Dessa forma, obtém-se a equação canônica de segunda ordem desejável do sistema:

$$H(s) = \frac{3,46}{s^2 + 2,27s + 3,46} \quad (7)$$

Baseando-se no conceito de realimentação negativa unitária, pode-se obter os ganhos do controlador PD igualando-se com a (7), resultando em (8).

$$G_c(s) = 2s + 3 \quad (8)$$

3.3 Implementação do controlador

Existem diversas maneiras para se implementar um controlador em um sistema físico. Neste trabalho foi implementado o controlador digital através do microcontrolador Arduino.

Para controladores digitais, é de suma importância a escolha correta do seu tempo de amostragem. Uma má escolha do tempo de amostragem pode ocasionar respostas indesejadas do sistema, podendo inclusive, levá-lo a instabilidade. Escolheu-se um tempo de amostragem de 0.15 segundos, pois esse tempo apresentou uma resposta rápida e precisa, além de possibilitar que o sistema mecânico opere suavemente.

A aquisição dos dados do sensor é uma tarefa que requer certa atenção, porque o sensor utilizado possui um alto ruído, o que ocasiona um comportamento indesejado do sistema caso esse ruído não seja eliminado. Para a redução do ruído utilizou-se um filtro Média Móvel de 8 amostras.

Com os parâmetros escolhidos anteriormente, obtém-se a seguinte equação de diferença, sendo $\theta(n)$ é o ângulo do servomotor (em radianos), $e(n)$ é o erro atual e $e(n-1)$ é o erro anterior:

$$\theta(n) = 16,05e(n) - 13,4e(n-1) \quad (9)$$

3.4 Simulação numérica no Simulink

Na Figura 4 é apresentado o diagrama em blocos utilizado para simulação do sistema no *software* Simulink.

Observa-se que a simulação é feita utilizando o bloco de controlador digital com os parâmetros escolhidos na Equação 8. Para aumentar a precisão da simulação, foi introduzido alguns elementos

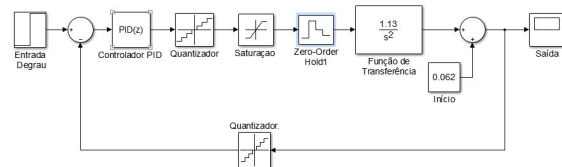


Figura 4: Simulação do sistema no *software* Matlab/Simulink.

importantes. O elemento não linear *Saturação* é utilizado para limitar o ângulo de forma que este permaneça na região linear. Os elementos *Quantizador* e *Zero-Order Hold* são utilizados para realizar a conversão entre os sinais digitais e analógicos. O bloco *Início* é utilizado para simular a condição inicial do sistema.

4 Resultados

Os resultados serão expostos a seguir onde logo após serão discutidos alguns pontos importantes.

A Figura 5 mostra as curvas do sistema simulado e real considerando Setpoint (SP) de 15 cm.

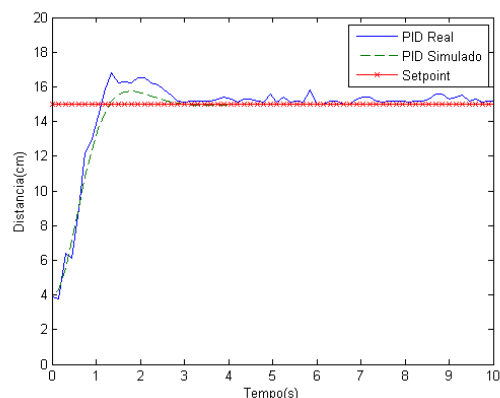


Figura 5: Resposta do sistema simulado e experimental para SP de 15 cm.

Através da Figura 5, pode-se observar que a resposta do sistema simulado se aproxima do sistema experimental, mostrando veracidade na modelagem e técnica de controle. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros da malha de controle.

Tabela 2: Parâmetros de respostas para SP de 15 cm.

Parâmetros	Real	Simulado	Desejado
$t_s(s)$	3	3	< 4
$U_p(\%)$	12	5	< 10
$E_{ss}(cm)$	0,8	0,01	0

Onde: E_{ss} é erro em estado estacionário do sistema controlado.

A Figura 6 mostra as curvas do sistema simulado e real considerando neste momento um SP de 25 cm.

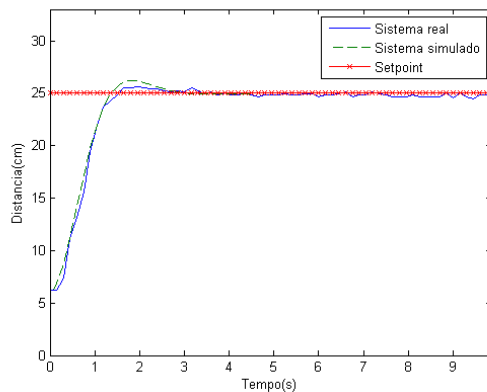


Figura 6: Resposta do sistema simulado e experimental para SP de 25 cm.

Através da figura 6, pode-se observar que a resposta do sistema simulado se aproxima do sistema experimental, mostrando veracidade na modelagem e técnica de controle. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros da malha de controle.

Tabela 3: Parâmetros de respostas para SP de 25 cm.

Parâmetros	Real	Simulado	Desejado
$t_s(s)$	2,25	2,4	< 4
$U_p(\%)$	2,4	4,6	< 10
$E_{ss}(cm)$	0,3	0,14	0

Através das Figuras 5 e 6 pode-se observar que o sistema projetado rastreou consideravelmente as referências de controle. Porém, é de fundamental importância que um sistema de controle bem projetado rejeite distúrbio eventuais que possam surgir (Campos and Teixeira, 2010). Dessa forma, a Figura 7 apresenta a resposta do sistema quando submetida a grandes distúrbios considerando um SP de 25 cm. Para o distúrbio foi aplicado um golpe na bola.

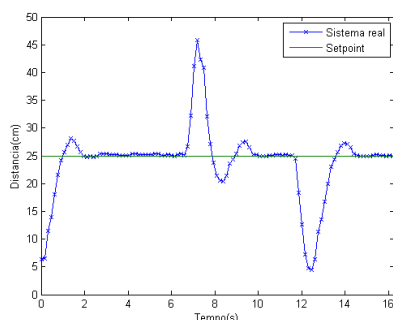


Figura 7: Resposta do sistema observando a rejeição ao distúrbio.

Através da Figura 7, pode-se notar claramente como o sistema sofre interferências mediante à inserção de distúrbios, o que fato foi corrigido logo após, retornando ao valor do SP solicitado.

Por último, apresenta-se na Figura 8 a resposta do sistema para diferentes SPs.

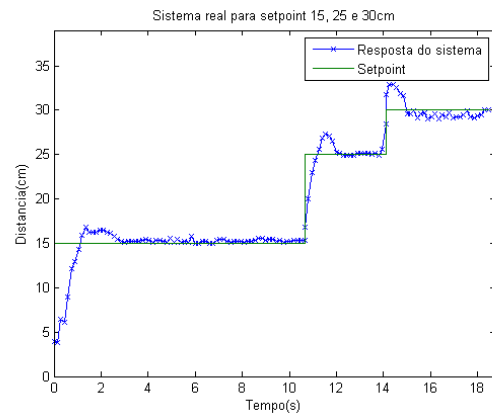


Figura 8: Resposta do sistema real para diferentes SPs.

5 Conclusões

Um projeto de controle possui muitas etapas, conforme mencionado na Seção 2, que são: medição, atuação, protótipo mecânico e controle.

No que se refere à etapa de medição, observa-se êxito tendo em vista a eliminação de ruídos provenientes do sensor ultrassônico HC-SR04 utilizado.

Quanto à atuação no sistema, pode-se notar que o motor servomecânico TowerPro MG995 foi bem utilizado, respondendo aos estímulos do controlador.

Para o protótipo mostrado na Figura 1, observa-se a correta montagem tendo em vista o êxito nas respostas controladas.

Por último, a etapa de controle fez com o trabalho apresentasse resultados interessantes. As respostas obtidas mostraram que o controlador escolhido atuou satisfatoriamente quando impostas perturbações no sistema, dentro de suas limitações.

Os resultados apresentaram pequenas diferenças de desempenhos entre si, que podem ser explicadas pelo fato do sensor ultrassônico apresentar ruídos que impedem uma leitura precisa, mesmo utilizando o filtro Média Móvel.

Para o sistema real observado na Figura 1, pequenos ajustes se mostram necessários devido a algumas não linearidades presentes no sistema. Futuras melhorias podem ser incluídas, como a mudança de sensoramento (sensores resistivos, magnéticos, entre outros).

Por fim, observa-se que o desenvolvimento da planta experimental (*Ball and Beam*) e do con-

trolador PID mostraram-se adequados ao objetivo proposto, apresentando resultados que sugerem uma nova opção para enriquecimento do ensino de Controle Automático, o que possibilita o estreitamento entre a teoria e a prática.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao MEC/SEsu, FNDE, CAPES, CNPq, FAPEMIG, Fundação CEFET-MINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

Referências

Aguirre, L. A. (2007). *Introdução a identificação de sistemas*, Editora UFMG.

Campos, M. and Teixeira, H. (2010). *Controle típicos de equipamentos e processos industriais*, Editora Blucher.

Chang, Y.-H., Chan, W.-S. and Chang, C.-W. (2013). T-s fuzzy model-based adaptive dynamic surface control for ball and beam system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **60**: 2251–2263.

Coelho, A., Almeida, O., Santos, J., Sumar, R. and Bittencourt, F. (2001). Da teoria á pratica: Projeto motor taco-gerador, *In:XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia* .

Colon, D. and Diniz, I. (2009). Teaching and comparing advanced control techniques in a ball and beam didactical plant, *Proceedings of 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil* .

Froyd, Wank, Smith and Karl (2012). Five major shifts in 100 years of engineering education, *Proceedings of IEEE* pp. 1344–1360.

Keshmiri, M., Jahromi, A. and Mohebbi, A. (2012). Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent System* .

Li, X. and Yu, W. (2010). Synchronization of ball and beam systems with neural compensation, *International Journal of Control, Automation and Systems* pp. 491–496.

Lisboa, S., Maitelli, A., Fernandes and Neto (2005). Controladores pid e neural aplicados a uma planta ball and beam, *VII Simposio Brasileiro de Automação Inteligente* .

Ogata, K. (2011). *Engenharia de controle moderno*, Person.

Scalabrin, R., Araujo, R., Junior, A. and de Melo, C. (2014). Projeto de controladores robustos h_2 e h_∞ por realimentação de estados através da abordagem por lmis, *COBENGE* .

Wang, W. (2007). Control of a ball and beam system, *School of Mechanical Engineering, The University of Adelaide* .

Yu, W. (2009). Nonlinear pd regulation for ball and beam system, *International Journal of Electrical Engineering Education* pp. 37–59.