


PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA BALL AND BEAM PARA ENSINO DE TÉCNICAS DE CONTROLE

PROJECT OF A BALL AND BEAM TEACHING BENCH FOR TEACHING CONTROL TECHNIQUES

André Wille Lemke¹ Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald² 

Resumo: A implementação de um controlador nem sempre é uma tarefa simples. Embora haja inúmeros livros sobre introdução aos sistemas de controle ou fundamentos de sistemas realimentados, muitas vezes assimilar essa teoria e colocá-la em prática não é tão trivial quanto realizar uma simulação numérica devido às particularidades da implementação em um microcontrolador. Desta forma, implementar tais técnicas de controle em um sistema real durante as aulas é uma forma assertiva de compreender como implementar essas estratégias e reter esse conhecimento de forma efetiva. Entretanto, protótipos que emulam sistemas industriais são caros, o que muitas vezes inviabiliza essas práticas. Portanto, esse artigo apresenta o projeto de uma bancada didática de baixo custo para aprendizado de técnicas de controle. A bancada em questão é um sistema barra-bola (ball and beam), frequentemente utilizada como exemplo nos livros de controle clássico. Os componentes principais dessa bancada são um microcontrolador STM32, que possui um microprocessador ARM Cortex M3 de 32 bits, um motor de passo, um sensor óptico de proximidade, além de uma bola e uma barra composta de material acrílico. Essa bancada permite a implementação de diversas técnicas de controle clássicas e modernas, sendo um recurso para enriquecer o ensino de sistemas de controle em diversas disciplinas das engenharias.

Palavras-chave: Aprendizado por projeto, Sistemas realimentados, Validação experimental de controladores.

Abstract: The implementation of a controller is not always a simple task. Although there are countless books on the introduction to control systems or the fundamentals of feedback systems, assimilating this theory and putting it into practice is not as trivial as carrying out a numerical simulation due to the particularities of implementation on a microcontroller. Therefore, implementing such control techniques in a real system during classes is an assertive way of understanding how to implement these strategies and retain this knowledge effectively. However, prototypes that emulate industrial systems are expensive, which often makes these practices unfeasible. Therefore, this article presents the project of a low-cost teaching bench for learning control techniques. The bench in question is a ball and beam system, often used as an example in classic control books. The main components of this bench are an STM32 microcontroller, which has a 32-bit ARM Cortex M3 microprocessor, a stepper motor, an optical proximity sensor, as well as a ball and a beam composed of acrylic material. This bench allows the implementation of various classic and modern control techniques, being a resource to enrich the teaching of control systems in various engineering disciplines.

Keywords: Project-based learning, Feedback systems, Experimental validation of controllers.

¹Graduando em Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Pelotas,
lemke.a.w@gmail.com.

²Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pelotas, paulo.evald@ufpel.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle são amplamente necessários em muitos campos da engenharia e estão presentes no dia-a-dia em diversas aplicações, tais como controle de temperatura, ventilação e ar-condicionado (KOU et al., 2021), veículos automotores (INDU, K; KUMAR, 2023), gerenciamento de energia domiciliar (MAHAPATRA; NAYYAR, 2022), energias renováveis (SAYED et al., 2023) até sistemas complexos como sistemas robóticos (BILANCIA et al., 2023), sistemas de manufatura (MORGAN et al., 2021), sistemas biomédicos (PARIHAR et al., 2022), sistemas aeroespaciais (CHAI et al., 2021), entre muitos outros.

O ato de controlar sistemas é antigo e pode-se remeter ao século XVII, quando moinhos de vento eram construídos para realizar a moagem de grãos ou a máquina a vapor. Além disso, o corpo humano possui vários mecanismos de controle internos para nos manter vivos, tais como o pâncreas, que regula o açúcar em nosso sangue ou o cérebro, que controla os níveis de adrenalina em conjunto com a nossa frequência cardíaca para entregar mais oxigênio para nossas células em situações de perigo (NISE, 2020). Entretanto, a tarefa de projetar controladores para controlar sistemas nem sempre é trivial como parece ser. Dessa forma, o estudo da teoria aliado a prática de projeto de controladores permite uma maior fixação desse conhecimento.

O uso de bancadas didáticas é uma opção interessante para as práticas de sistemas de controle, permitindo aos estudantes implementarem técnicas de controle em um sistema real. Entretanto, as bancadas comerciais que emulam sistemas industriais, ou até mesmo bancadas que representam sistemas clássicos de controle, tais como pêndulo invertido sobre um carrinho, sistemas barra-bola (*ball and beam*), sistemas bola-placa (*ball and plate*) e sistemas de amortecimento massa-mola-amortecedor, frequentemente não cabem no orçamento da instituição para uso em alguma disciplina específica. Desta forma, o desenvolvimento de bancadas didáticas de baixo custo podem contribuir significativamente para o ensino da teoria de controle por permitir a aplicação experimental dessas técnicas.

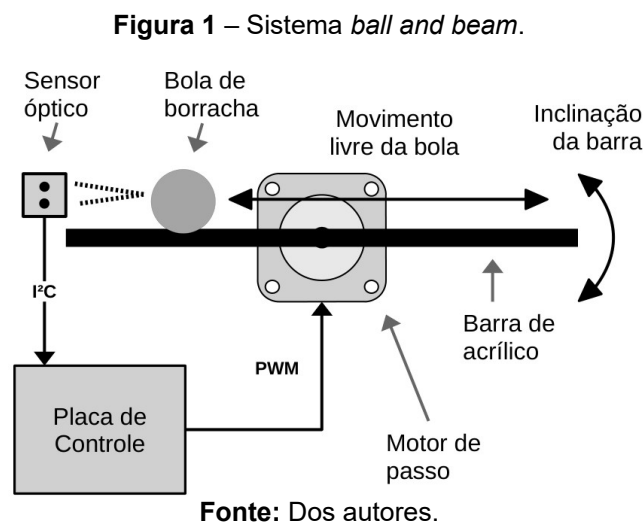
O controle de um sistema *ball and beam* consiste em equilibrar uma bola em uma posição específica de uma barra. Este sistema é uma variação do sistema *ball and plate*, onde a bola é equilibrada em uma superfície tridimensional. Os atuadores mais comuns para movimentar a barra são motores de passo (VALLURU; SINGH; SINGH, 2016), motores de corrente contínua (AZAR et al., 2020) e servomotores (ALI et al., 2017). Em menor escala, encontram-se na literatura trabalhos que utilizam atuadores magnéticos para equilibrar a bola na posição desejada, tais como (LIN et al., 2005., KER; LIN; WANG, 2007, LÓPEZ; MONROY; ANTOLINES, 2011). Em se tratando dos sistemas de controle para o sistema *ball and beam*, destaca-se que o mesmo possui uma literatura rica devido ao seu caráter didático. Dentre as abordagens de controle para regulação da posição na bola sobre a barra, os trabalhos recentes utilizaram as seguintes técnicas de controle: controladores proporcional-integral-derivativo (PID) (DEEPA et al., 2021), controladores por modos deslizantes (ABUT, 2020), controladores ótimos (ROSA; ROMDLONY; TRILAKSONO, 2023), controladores robustos (ALI, 2020), controladores por lógica nebulosa (ALTINOZ; YILMAZ, 2022), controladores adaptativos (AL-DUJAILI et al., 2021), entre outros. Naturalmente, cada abordagem de controle tem suas particularidades, podendo ser mais estruturalmente mais complexa e/ou mais custosa computacionalmente. Logo, não é possível afirmar qual a melhor técnica sem realizar uma comparação justa no mesmo hardware.

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto de uma bancada didática *ball and beam* de baixo custo para uso em disciplinas de controle básicas e avançadas. Como resultado, espera-se um maior engajamento e compreensão dos estudantes dessas disciplinas.

A organização deste trabalho é a seguinte: a Seção 2 apresenta o projeto da bancada didática, seguido pelos resultados experimentais obtidos pela aplicação de um controlador PID ao sistema *ball and beam* construído na Seção 3. Após a discussão dos resultados, as considerações finais são apresentadas na Seção 4.

2 DESENVOLVIMENTO

O sistema *ball and beam* é constituído basicamente por uma barra, uma bola, um motor de passo, um sensor de posição e um microcontrolador. O microcontrolador executa o controlador digital e envia a ação de controle ao motor de passo, que deve manter a bola centralizada na barra. A posição da bola é medida por um sensor de proximidade. Sem a realimentação, a bola tende a cair da barra devido a ação da força gravitacional, que movimenta a barra e, por conseguinte, faz a bola se mover devido a inclinação gerada. Nesta bancada didática foi utilizado um microcontrolador STM32, que possui em seu núcleo um microprocessador ARM Cortex M3 de 32 bits. A Figura 1 ilustra o sistema *ball and beam*.



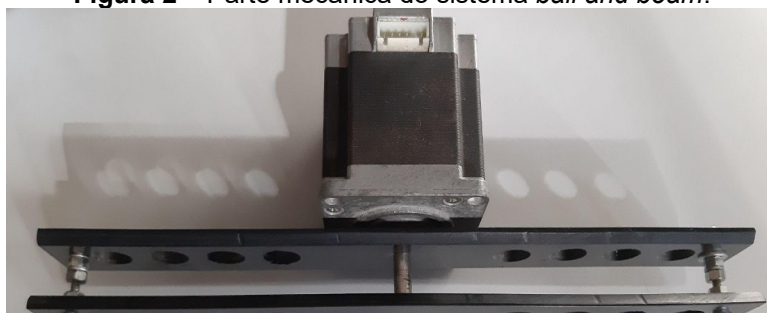
2.1 Sistema mecânico

A bancada didática foi montada utilizando material acrílico para desenvolvimento da barra (trilho onde a bola se desloca livremente), parafusos galvanizados para fixação, perfis de alumínio recortados para fixação do sensor de proximidade. As hastes de acrílico tem o comprimento de 24 cm, com altura de 2,5 cm e espessura de 3 mm cada. Foram feitos furos de 14 mm ao longo dos compostos de acrílico a fim de diminuir a massa das barras, sem

comprometer a performance. Os parafusos para fixação (intertravamento das barras) possuem 2,8 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro. O acoplamento com o eixo do motor foi feito sob pressão, sendo o diâmetro do furo central do acrílico ligeiramente menor que o diâmetro do eixo do motor. Durante a fixação, o eixo do motor foi levemente aquecido a fim de facilitar a penetração no material acrílico.

O motor de passo é do tipo de precisão de 2 ou 4 fases (híbrido), modelo Minebea Matsushita (23KM-C051-07V) com ângulo de passo de 1,8°, torque máximo de 9 kgf.cm em modo de acionamento unipolar e peso de aproximadamente 700 g. Não foi necessária a fixação do motor na bancada para a avaliação do sistema, visto que o próprio peso do motor garante a estabilidade do mecanismo. A Figura 2 mostra a parte mecânica do sistema.

Figura 2 – Parte mecânica do sistema *ball and beam*.

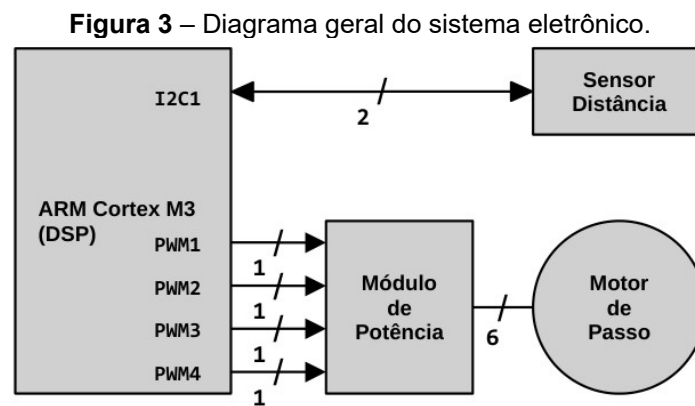


Fonte: Dos autores.

2.2 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico que compõe a placa de controle do sistema integra um microcontrolador STM32, nas quais possui um microprocessador ARM Cortex M3 de 32 bits e capacidade de execução de instruções de processadores de sinais digitais, *digital signal processor* (DSP). Além disso, possui um módulo de comunicação I²C compatível com o sensor de distância óptico e um módulo TIMER capaz de gerar modulação por largura de pulso, *pulse width modulation* (PWM) em quatro canais independentes. O módulo de potência é constituído por quatro transistores capazes de amplificar a corrente elétrica proveniente dos sinais do módulo PWM para acionamento das bobinas

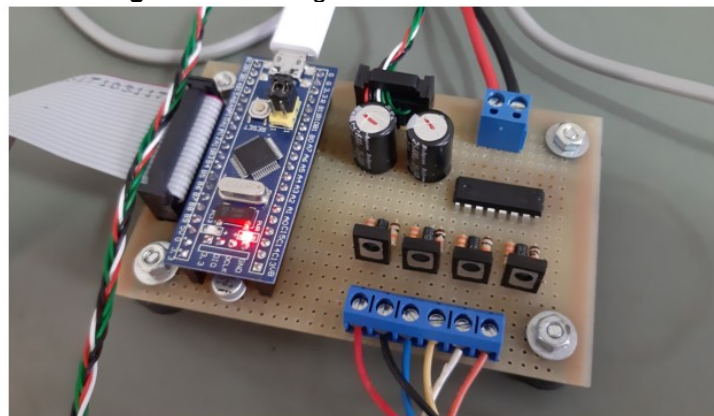
do motor de passo. A Figura 3 mostra o diagrama de ligações geral do sistema eletrônico, o sensor e o atuador (motor).



Fonte: Dos autores.

O circuito eletrônico foi montado em uma placa universal de modo que possam ser feitas alterações e fácil adaptação do circuito experimental. A Figura 4 mostra o sistema eletrônico montado.

Figura 4 – Montagem do sistema eletrônico.



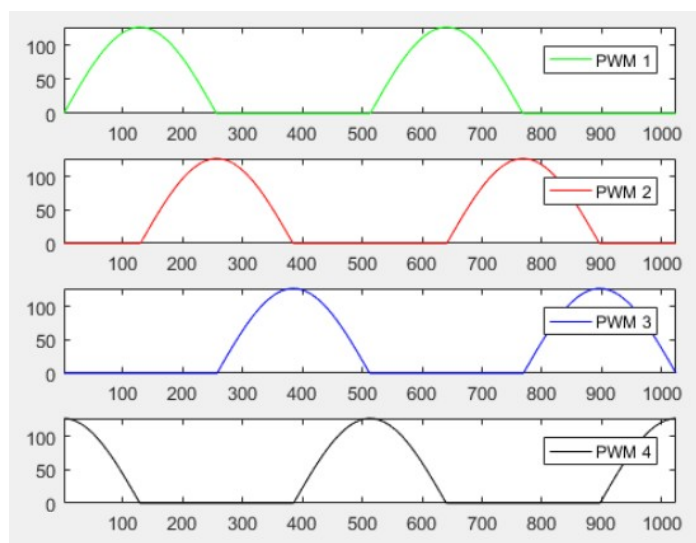
Fonte: Dos autores.

A sobreplaca em cor azul é composta pelo microcontrolador baseado em arquitetura ARM (*advanced RISC machine*) modelo STM32F103C8T6 com núcleo podendo operar com até 72 MHz de frequência máxima ou 1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), com 64 KBytes de memória FLASH e 20 KBytes de memória SRAM. O módulo de potência é composto por um circuito integrado de lógica inversora e quatro transistores PNP para atender a configuração unipolar do motor de passo.

O acionamento do motor de passo foi feito utilizando micropasso como atuador. Para tal, um arquivo contendo a informação de cada micropasso de cada canal PWM foi gerado na forma de vetor, utilizando o software Octave, e carregado na memória *flash* do microcontrolador. Isto permite que seja carregada na memória não volátil, as formas de onda de acionamento das bobinas do motor, dividindo cada passo de $1,8^\circ$ em 128 partes. O acionamento é feito por dois pares de transistores, sendo cada par atuante em cada conjunto de bobina. Os transistores utilizados são de número de peça BD140. Esse acionamento é feito em forma de base senoidal, sendo o sinal senoidal atuante nos módulos PWM.

A Figura 5 mostra os sinais que configuram os módulos PWM em tempo real e, conseqüentemente, acionam o motor. Os sinais gerados são inspirados no acionamento completo divididos em partes limitadas pela resolução configurada no módulo PWM, defasadas em 90° cada, assim originando no modo de acionamento de micropasso.

Figura 5 – Amostras senoidais para canais PWM.

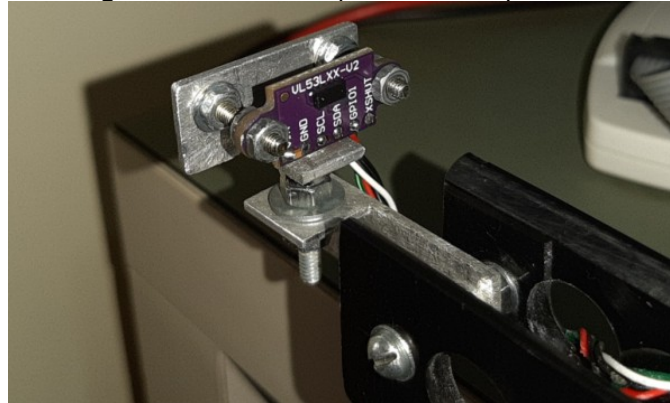


Fonte: Dos autores.

O sensor de proximidade utilizado é um sensor óptico modelo VL53L0X, do fabricante STMicroelectronics que opera com a tensão de alimentação equivalente a do microprocessador utilizado e provê precisão milimétrica de distância devido a sua medição via laser em espectro infravermelho. Esse sensor possui comunicação I²C, facilitando sua integração aos periféricos do

microcontrolador. A Figura 6 mostra a montagem deste sensor de distância óptico no suporte de fixação da bancada.

Figura 6 – Sensor de proximidade óptico I²C.



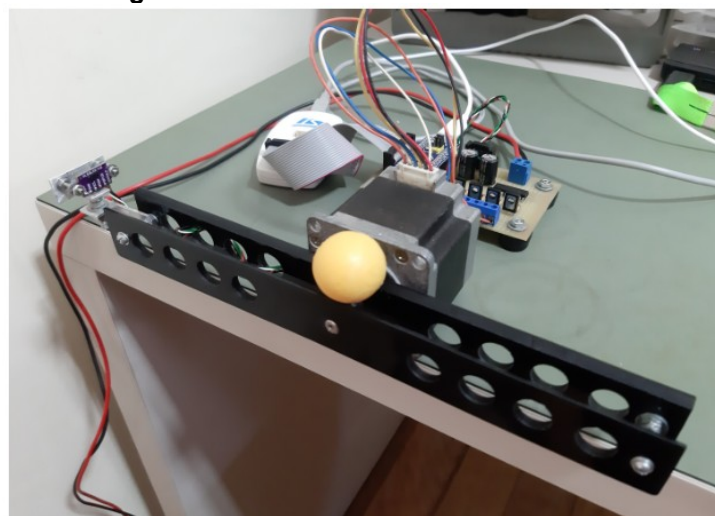
Fonte: Dos autores.

A base do sensor de proximidade foi montada com perfis de alumínio recortados e um conjunto de parafusos para facilitar o ajuste do direcionamento óptico do emissor e do receptor do conjunto microeletrônico de medição.

3 RESULTADOS

A Figura 7 mostra a bancada didática montada para ensino da disciplina de Sistemas Realimentados no curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Pelotas.

Figura 7 – Bancada didática *ball and beam*.



Fonte: Dos autores.

Para fins de testes práticos, foi feito posicionamento da bola de borracha em cima do eixo do motor de passo, ou seja, no centro da barra. Imediatamente a bola correu para um dos lados, o que era esperado, visto que o sistema não consegue manter a bola equilibrada em malha aberta. Para demonstrar a efetividade de um controlador atuando sobre este sistema, um controlador PID digital foi implementado nesta bancada. A ação de controle deste controlador é dada por

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \cdot \quad (1)$$

Para obter a equação das diferenças, que é implementável no microcontrolador, aplica-se a transformada de Laplace em (1), obtendo a ação de controle equivalente no domínio de Laplace, ou seja, $u(s)$.

$$u(s) = K_p e(s) + \frac{1}{s} K_i e(s) + s K_d e(s) \cdot \quad (2)$$

Em seguida, pode-se discretizar $u(s)$ com quaisquer técnicas de discretização, tal como aproximações de Euler ou Tustin. Neste exemplo, a técnica *backward Euler* foi adotada. Esta abordagem considera que

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s} \cdot \quad (3)$$

Logo, a ação de controle em z é

$$u(z) = z^{-1} u(z) + \frac{K_d}{T_s} z^{-2} e(z) - 2 \frac{K_d}{T_s} z^{-1} e(z) + \frac{K_d}{T_s} e(z) + \dots \\ \dots K_p e(z) - K_p z^{-1} e(z) + T_s K_i e(z) \cdot \quad (4)$$

Finalmente, transcrevendo a ação de controle que está no domínio z , $u(z)$, para o domínio das amostras, $u(k)$, substituindo os atrasos no tempo descritos em função de z por atrasos na amostragem de forma explícita, obtém-se:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{K_d}{T_s} e(k-2) - 2 \frac{K_d}{T_s} e(k-1) + \frac{K_d}{T_s} e(k) + \dots$$

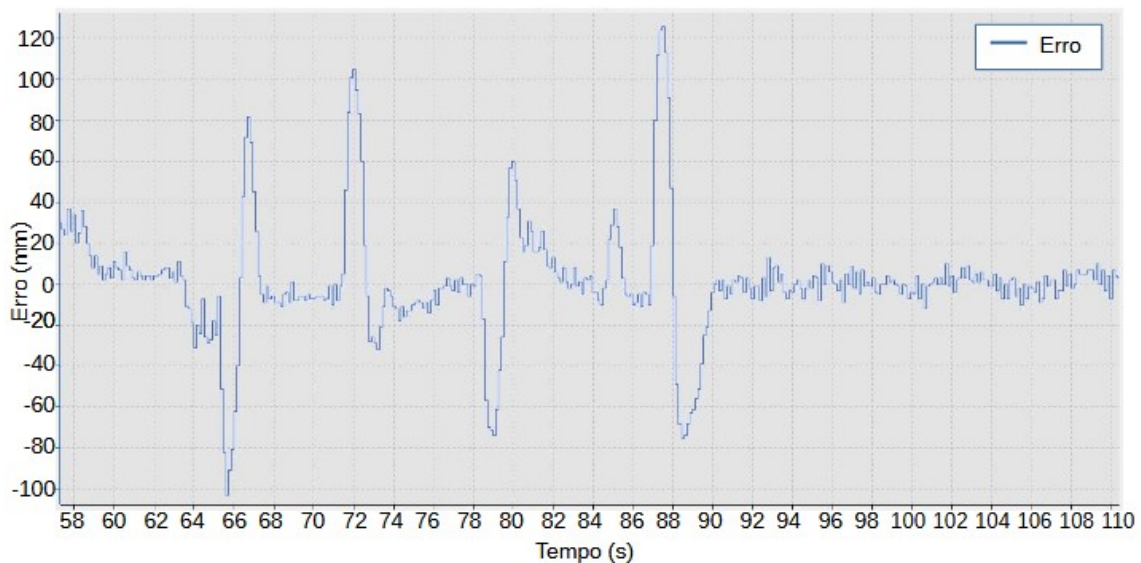
$$\dots K_p e(k) - K_p e(k-1) + T_s K_i e(k) . \quad (5)$$

Naturalmente, o índice k indica o valor atual da variável. Portanto, é necessário salvar na memória do microcontrolador os valores passados do erro e da ação de controle, em quantidades de duas e uma amostra, respectivamente. O erro é dado pela posição atual da bola e a posição de referência.

Os resultados a seguir utilizaram um ganho proporcional igual à $K_p = 4$, um ganho integral igual à $K_i = 0,25$ e um ganho derivativo igual à $K_d = 12$. A taxa de amostragem do sistema baseou-se no tempo de leitura do sensor óptico, que tem o período de 100 ms, resultando em uma frequência de amostragem de aproximadamente 10 Hz.

A referência foi mantida em 155 mm a partir do sensor óptico, que é o centro da barra descontado do raio da bola. A Figura 8 mostra o erro de rastreamento do sistema em malha fechada com o controlador PID reagindo a uma perturbação externa (toque na bola com uso de um dedo da mão). Este experimento pode ser visualizado neste [link](#).

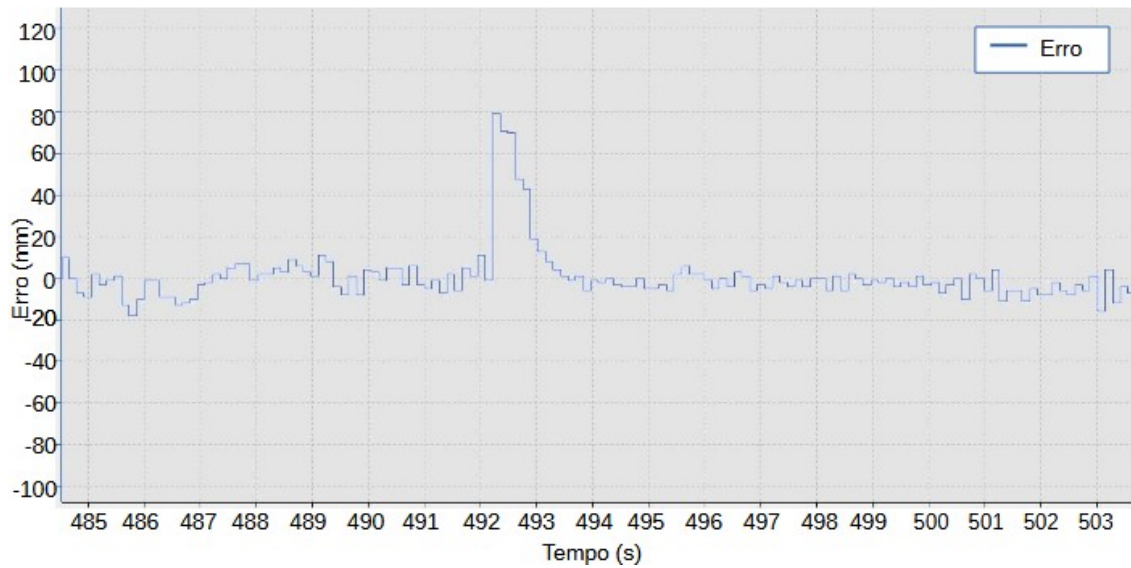
Figura 8 – Erro de rastreamento experimental.



Fonte: Dos autores.

A Figura 9 e a Figura 10 mostram a mudança do ponto de referência da bola, modificando o posicionamento. Na Figura 9, o ajuste é feito para aproximadamente 235 mm do sensor, aproximadamente o limite direito da barra, resultando num degrau de erro inicial de aproximadamente +80 mm. Logo em seguida, com o efeito do reposicionamento da bola, o erro tende a zero com a ação do atuador.

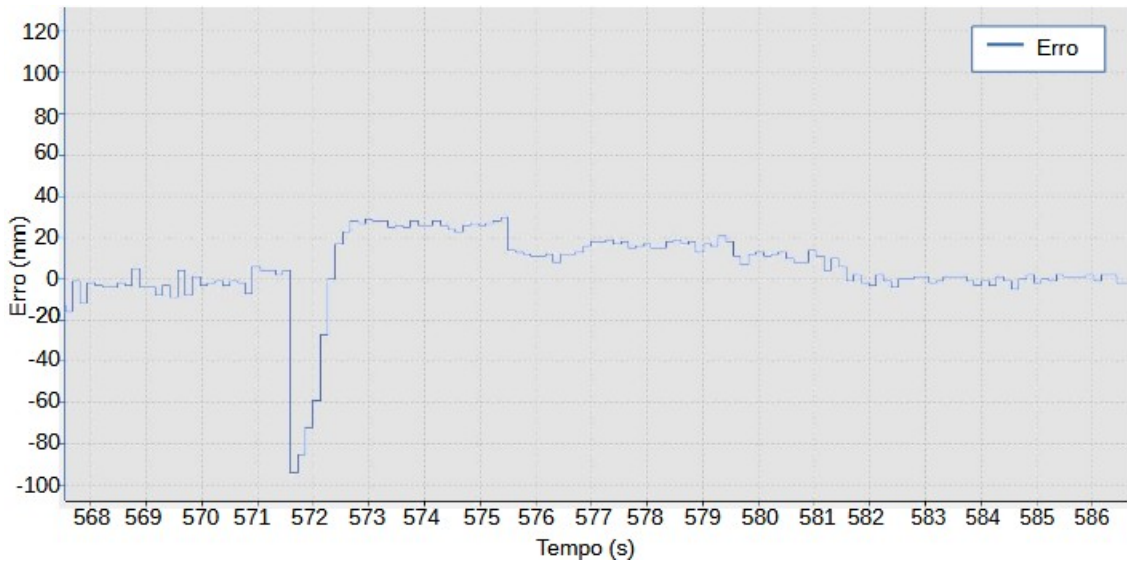
Figura 9 – Erro de reposicionamento no extremo direito da barra



Fonte: Dos autores.

Na Figura 10, o ajuste é feito para aproximadamente 55 mm do sensor, aproximando-se do limite esquerdo da barra. Nesse experimento, ocorreu um erro inicial de aproximadamente -100 mm. Logo em seguida, o erro novamente tende a zero pela ação do atuador, reposicionamento da bola adequadamente para sua posição de referência. É possível observar uma demora na acomodação da bola neste último caso, isso se deve a irregularidade na superfície da esfera de borracha utilizada no experimento.

Figura 10 – Erro de reposicionamento no extremo esquerdo da barra



Fonte: Dos autores.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto de uma bancada didática de baixo custo para ensino de sistemas de controle. A bancada pode ser utilizada para aplicação de técnicas clássicas e modernas de controle. Para validação experimental, um controlador PID digital foi implementado nesta bancada, o qual manteve satisfatoriamente a bola equilibrada ao redor do centro da barra e reagiu significativamente à solicitação de reposicionamento mediante a mudança do valor de referência. O uso desta bancada didática propiciou o contato direto dos discentes à implementação prática de um sistema de controle, reforçando seu aprendizado e motivando o estudo da disciplina através de um maior engajamento dentro do curso de Engenharia Eletrônica, onde técnicas de controle moderno não são estudadas com tamanha aplicação em comparação com o curso vizinho de Engenharia de Controle e Automação. Portanto, pode-se concluir que o uso deste tipo de ferramenta didática traz impactos positivos para o ensino-aprendizagem de sistemas de controle.

REFERÊNCIAS

ABUT, T. Position Controller Design and Implementation of Ball and Beam System with SMC and PD Control Methods. **Energy Engineering and Control Systems**, v. 6, n. 2, p. 120-126, 2020.

AL-DUJAILI, A. Q. et al. Adaptive backstepping control design for ball and beam system. **International Review of Applied Sciences and Engineering**, v. 12, n. 3, p. 211-221, 2021.

ALI, A. T. et al. Design and implementation of ball and beam system using pid controller. **MAYFEB Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 1, 2017.

ALI, S. S. Position control of ball and beam system using robust H^∞ loop shaping controller. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, v. 19, p. 91-98, 2020.

ALTINOZ, O. T.; YILMAZ, A. E. Investigation of the Optimal PID-Like Fuzzy Logic Controller for Ball and Beam System with Improved Quantum Particle Swarm Optimization. **International Journal of Computational Intelligence and Applications**, v. 21, n. 04, p. 2250025, 2022.

AZAR, A. T. et al. Design and implementation of a ball and beam PID control system based on metaheuristic techniques. In: **Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics 2019**. Springer International Publishing, 2020. p. 313-325.

BILANCIA, P. et al. An overview of industrial robots control and programming approaches. **Applied Sciences**, v. 13, n. 4, p. 2582, 2023.

CHAI, R. et al. Review of advanced guidance and control algorithms for space/aerospace vehicles. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 122, p. 100696, 2021.

DEEPA, R. et al. Stability analysis of ball and beam system using PID controller. In: **2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)**. IEEE, 2021. p. 1-4.

INDU, K.; KUMAR, A. M. Electric vehicle control and driving safety systems: A review. **IETE Journal of Research**, v. 69, n. 1, p. 482-498, 2023.

KER, C. C.; LIN, C. E.; WANG, R. T. A ball and beam tracking and balance control using magnetic suspension actuators. **International Journal of Control**, v. 80, n. 5, p. 695-705, 2007.

KOU, X. et al. Model-based and data-driven HVAC control strategies for residential demand response. **IEEE Open Access Journal of Power and Energy**, v. 8, p. 186-197, 2021.

LIN, C. E. et al. A new ball and beam system using magnetic suspension actuator. In: **31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005 (IECON 2005)**. IEEE, 2005. p. 6 pp.

LÓPEZ, F.; MONROY, P.; ANTOLINES, J. D. R. Position control ball and beam system with magnetic actuator. **Tecnura**, v. 15, n. 30, p. 12-23, 2011.

MAHAPATRA, B.; NAYYAR, A.. Home energy management system (HEMS): Concept, architecture, infrastructure, challenges and energy management schemes. **Energy Systems**, v. 13, n. 3, p. 643-669, 2022.

MORGAN, J. et al. Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 59, p. 481-506, 2021.

NISE, N. S. Control systems engineering. John Wiley & Sons, 2020.

PARIHAR, S. et al. Model predictive control and its role in biomedical therapeutic automation: A brief review. **Applied System Innovation**, v. 5, n. 6, p. 118, 2022.

ROSA, M. R.; ROMDLONY, M. Z.; TRILAKSONO, B. R. The ball and beam system: Cascaded LQR-FLC design and implementation. **International Journal of Control, Automation and Systems**, v. 21, n. 1, p. 201-207, 2023.

SAYED, E. T. et al. Renewable energy and energy storage systems. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1415, 2023.

VALLURU, S. K.; SINGH, M.; SINGH, S. Prototype design and analysis of controllers for one dimensional ball and beam system. In: **2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)**. IEEE, 2016. p. 1-6.