

A IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE MÓDULOS DIDÁTICOS PARA O ENSINO-APRENDIZADO NA ENGENHARIA: DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DE BAIXO CUSTO *BALL AND BEAM* PARA PRÁTICAS DE CONTROLE DINÂMICO

Julio Yuzo Yassuda – yuzuyas@hotmail.com

Emerson Ravazzi Pires da Silva – emersonr@utfpr.edu.br

Carolina Ribeiro Rodrigues – crrodrigues@utfpr.edu.br

Miguel Angel Chincaro Bernuy – angel@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio
Av. Alberto Carazzai, 1640 - Vila Seugling
86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

Resumo: *Com a lacuna em estudos de aplicações práticas de estratégias 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, em consequência de seu elevado custo relativo, tais módulos didáticos 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, simples e replicável para auxiliar no processo de consolidação dos conteúdos abordados em sala de aula referente a tópicos da área de controle dinâmico.*

Palavras-chave: *Módulo didático. Baixo custo. Ball and Beam. Arduino®. Controle Dinâmico.*

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de se automatizar processos para obter maior confiabilidade e padronização dos mesmos, o controle se tornou um componente importante e intrínseco para tal. Pode-se vê-lo como parte integrante de sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, sistemas de fabricação, e quaisquer outras operações industriais (LUGLI, 2015; 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 se estudar estratégias de controle. Sendo assim, os conceitos ministrados em sala de aula acabam sendo de difícil absorção usando apenas abordagens teóricas.

Diante disto, surgiram os módulos didáticos comerciais para preencher parcialmente essa lacuna, pois estes ainda são de difícil acesso devido aos seus custos relativamente elevados. Tal fato é evidente não apenas na realidade local, como também em outras instituições de ensino.

Tendo essa realidade como ponto de partida, este trabalho aborda a construção de um módulo didático *ball and beam* de baixo custo para auxiliar no processo de aprendizagem dos

conteúdos apresentados em sala de aula. Este módulo de controle de posição tem como objetivo equilibrar uma bola ao longo de um trilho a partir da atuação de um motor que altera a sua inclinação (WANG, 2007). O trabalho está organizado em cinco seções. Na primeira, é apresentada a introdução geral sobre o tema. Na segunda, é apresentada a metodologia indicando a sequência de evolução do projeto. Na terceira, são apresentados os materiais utilizados para desenvolver o projeto. Na quarta, expõe-se os resultados e discussões referente ao projeto. Ademais, na quinta seção, relata-se as considerações finais sobre o trabalho.

2 METODOLOGIA

Tendo a proposta em mente, foi realizada uma reunião inicial com o professor a fim de definir o escopo do projeto, abordando os objetivos, as etapas a serem realizadas, os prazos e custos estimados. Em seguida, foi dado início as atividades do projeto entre junho de 2018 a abril de 2019.

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, com o propósito de verificar a necessidade da construção de módulos didáticos de baixo custo para auxiliar no processo de aprendizado dos alunos de engenharia.

Constatada a necessidade, foi realizado um levantamento dos materiais necessários para a construção do módulo, tais como estrutura, controlador, atuador e sensor, dando ênfase no custo benefício dos materiais escolhidos. Após a definição dos materiais, foi dado início a construção do módulo de acordo com a seguinte sequência: estrutura, atuador, sensor e controlador.

Por fim, foi realizada a comunicação entre o módulo didático e o software MATLAB[®]/Simulink[®]. Dentro deste ambiente, serão aplicados os conceitos ministrados em sala de aula para auxiliar no procedimento de aprendizagem.

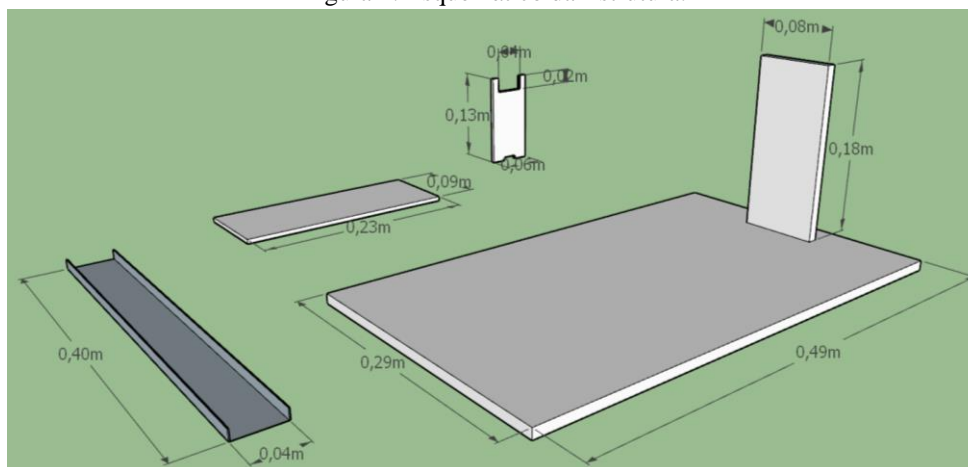
3 MATERIAS UTILIZADOS

Tendo em vista que o foco deste projeto é a utilização de materiais de baixo custo, foram escolhidos os seguintes itens para a construção do módulo didático *ball and beam*.

3.1 Estrutura

Para a construção da estrutura, foram utilizadas chapas de madeira do tipo MDF (*Medium Density Fiberboard*) com 1 centímetro de espessura. Para o suporte do motor, foram utilizadas placas de acrílico transparente de 0,5 centímetros de espessura. O trilho foi construído a partir de um nível (utilizado por pedreiros em construções) de 40 centímetros de comprimento e tubos de alumínio. Além disso, foi construída uma *case* com chapa de acrílico transparente para o Arduino[®] e para a fonte ajustável de *protoboard*, a fim de evitar possíveis colisões ou derramamento de líquidos. A estrutura é ilustrada na Figura 1.

Figura 1: Esquemático da Estrutura.

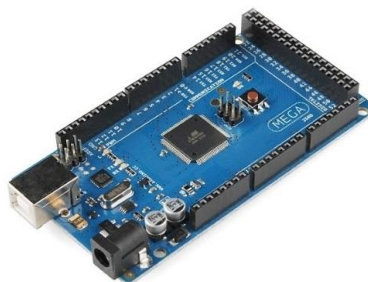


Fonte: Autoria Própria.

3.2 Placa de aquisição de dados (Arduino®)

Neste projeto, o Arduino® MEGA2560, ilustrado na Figura 2, é utilizado como uma placa de aquisição de dados. Foi escolhido por ser uma plataforma baseada no microcontrolador Atmega (Atmel) e possuir algumas vantagens, por exemplo: ser um microcontrolador *open source*, que funciona em diversos sistemas operacionais, tais como Linux®, Windows® e MacOS®; também pelo fato de ser bastante acessível economicamente, comparado com outras plataformas de mesmas funcionalidades. Além disso, tem fácil interação com diversos sensores e atuadores existentes no mercado especializado.

Figura 2: Arduino® MEGA2560.



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/placa-mega-2560-r3-cabo-usb-para-arduino/>

3.3 Sensor infravermelho

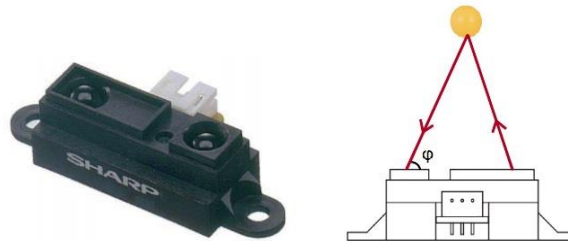
Para mensurar a posição da bola ao longo do trilho, foi utilizado um sensor de distância infravermelho modelo SHARP® GP2Y0A21YK0F (vide Figura 3(a)). Este sensor utiliza um método de triangulação para determinar a distância de um objeto. Para isso, um feixe de luz infravermelho é emitido e se propaga até colidir com o objeto. Assim, é refletido, formando um triângulo entre o diodo emissor, objeto e receptor (ALCÂNTARA, 2013).

Desse modo, o feixe refletido incide no receptor e é transmitido ao circuito de processamento de sinal que determinará o ângulo de deflexão (ϕ), como ilustrado na Figura 3(b). Observe que o ângulo (ϕ) varia de acordo com a distância do objeto. Dessa forma, o

sensor calcula a distância através do ângulo (ϕ) e emite uma tensão no pino de saída de acordo com a distância do objeto (ALCÂNTARA, 2013).

Logo, o sensor utilizado no projeto tem grande precisão e custo baixo, além de possuir fácil interação com a plataforma Arduino®.

Figura 3: (a) Sensor SHARP® GP2Y0A21YK0F; (b) Princípio de funcionamento.



Fonte: (a) Datasheet SHARP®; (b) Autoria Própria.

3.4 Fonte ajustável para *proto*board

A fonte ajustável de *proto*board é comumente utilizada nos circuitos eletrônicos de baixa tensão com a finalidade de alimentá-los. Dessa forma, a fonte transforma a tensão alternada da rede elétrica em contínua. Além disso, regula a tensão de acordo com a necessidade, podendo fornecer 3,3V ou 5V.

Neste projeto, foi utilizada a fonte ajustável de *proto*board devido à insuficiência da corrente fornecida pelo Arduino® para que o sensor SHARP® GP2Y0A21YK0F opere em sua corrente nominal. A fonte ajustável pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4: Fonte Ajustável para *proto*board.



Fonte: <https://www.filipeflop.com/produto/fonte-ajustavel-protoboard/>.

3.5 Atuador (servo motor)

Atuador é um componente que converte energia elétrica, hidráulica ou pneumática em energia mecânica, ajustando, movendo e trocando um mecanismo secundário. Desta forma, neste projeto será utilizado um servo motor como atuador para alterar a inclinação do trilho.

O servo motor é uma máquina síncrona composta por uma parte fixa (estator), que tem como função conduzir o fluxo magnético, uma parte móvel (rotor), que é composta por ímãs permanentes dispostos linearmente, e por um gerador de sinais (*resolver*). Por conseguinte, o servo motor tem uma boa precisão quanto ao posicionamento e controle de rotação (OTTOBONI, 2002).

Por este motivo, para a realização deste projeto, foi utilizado um micro servo motor SG5010 TowerPro® devido à sua boa precisão e à fácil interação com a plataforma Arduino®. O Servo Motor pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Micro Servo Motor SG5010 TowerPro®.

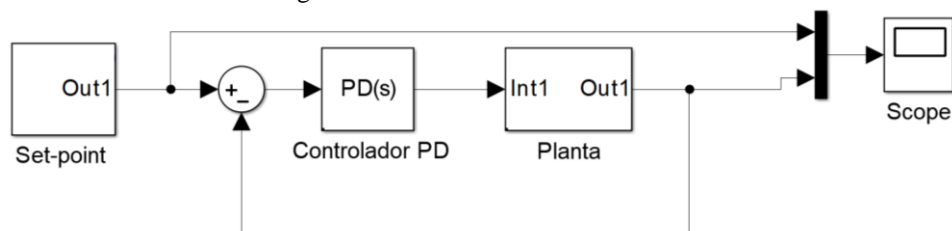


Fonte: <https://www.robocore.net/loja/servos/servo-sg5010>

3.6 Software

O ambiente utilizado para a realização dos estudos das estratégias no âmbito de controle dinâmico foi o software MATLAB®/Simulink®. A escolha se dá por ter fácil interação com a plataforma Arduino®, pela compreensibilidade por parte dos acadêmicos e pelo software estar presente na maioria das instituições. A Figura 6 exibe uma tela do ambiente Simulink® utilizada para supervisionar/controlar o módulo *ball and beam*.

Figura 6: Tela do ambiente Simulink®.

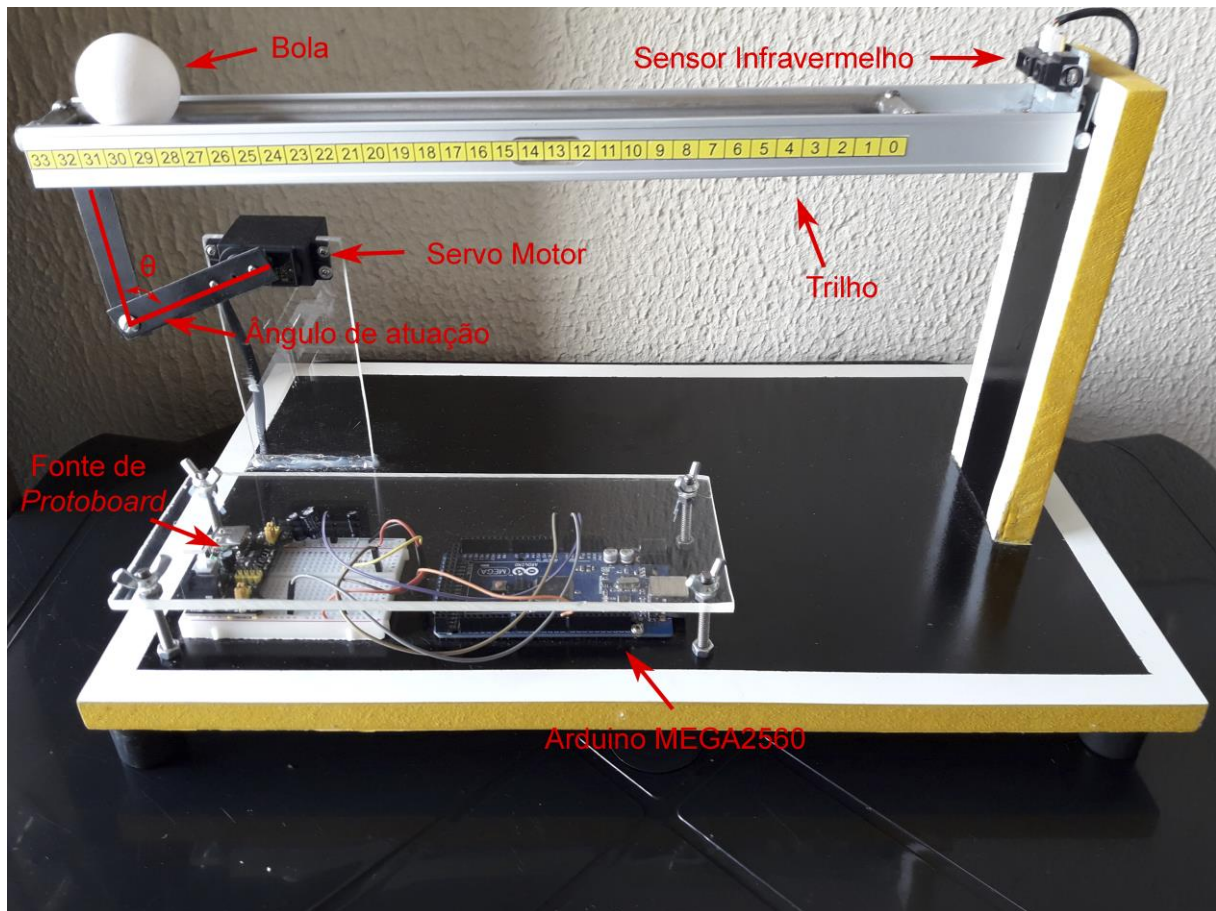


Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em posse da estrutura de madeira e com os componentes designados, construiu-se o módulo didático *ball and beam*, tendo como resultado final o sistema da Figura 7. Este módulo tem a finalidade de equilibrar um bolinha ao longo do trilho de acordo com atuação de um servo motor que altera sua inclinação.

Figura 7: Módulo didático *Ball and Beam*.



Fonte: Autorial Própria.

O custo total com os materiais utilizados para a fabricação do módulo didático proposto foi em torno de R\$176,00. Um valor bem inferior quando comparado com módulos didáticos comerciais similares existentes no mercado, que custam em torno de 300 vezes mais. A Tabela 1 apresenta os valores detalhados de cada componente.

Tabela 1: Valores detalhados dos componentes.

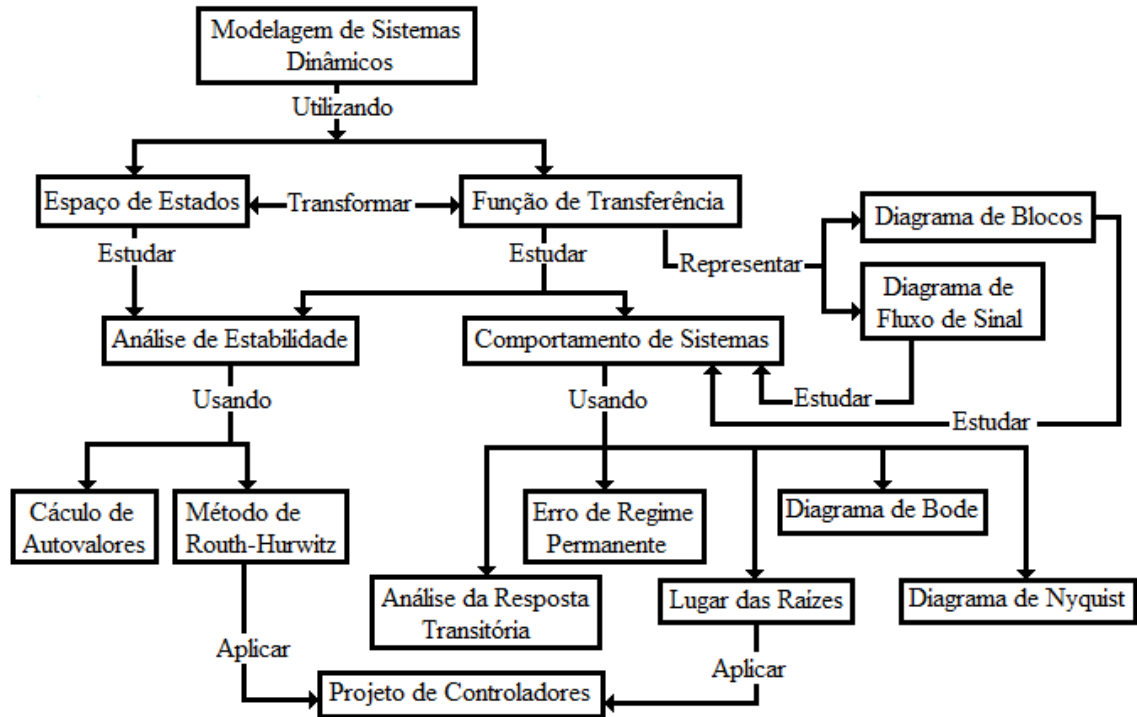
COMPONENTES	VALORES
Arduino® MEGA2560	R\$55,00
Sensor SHARP® GP2Y0A21YK0F	R\$34,00
Servo motor SG5010 TowerPro®	R\$35,00
Fonte ajustável para protoboard	R\$12,00
Estrutura Física	R\$40,00
TOTAL	R\$176,00

Fonte: Autorial própria.

Um ponto a se observar é que o módulo proposto apresenta características próximas aos módulos existentes. Além disso, deve-se destacar a versatilidade do módulo didático

desenvolvido, que pode ser utilizado em várias disciplinas da área de controle, tais como modelagem dinâmica, identificação de sistemas, controle analógico, controle digital, sistemas lineares e não-lineares, controle moderno, dentre outras. A Figura 8 apresenta o mapa conceitual de estudo-aprendizagem com os conteúdos específicos ordenados que podem ser melhor compreendidos com a utilização do módulo *ball and beam*, como ilustram os exemplos a seguir.

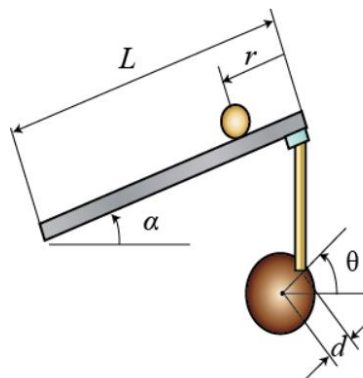
Figura 8: Mapa conceitual.



Fonte: Autoria Própria.

Como exemplos de aplicações, pode-se destacar a Equação (1) que representa o modelo matemático via função de transferência do diagrama da Figura 9, obtido a partir da análise Lagrangeana, estudo que envolve a área de modelagem dinâmica.

Figura 9: Diagrama ball and beam.



Fonte: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling>

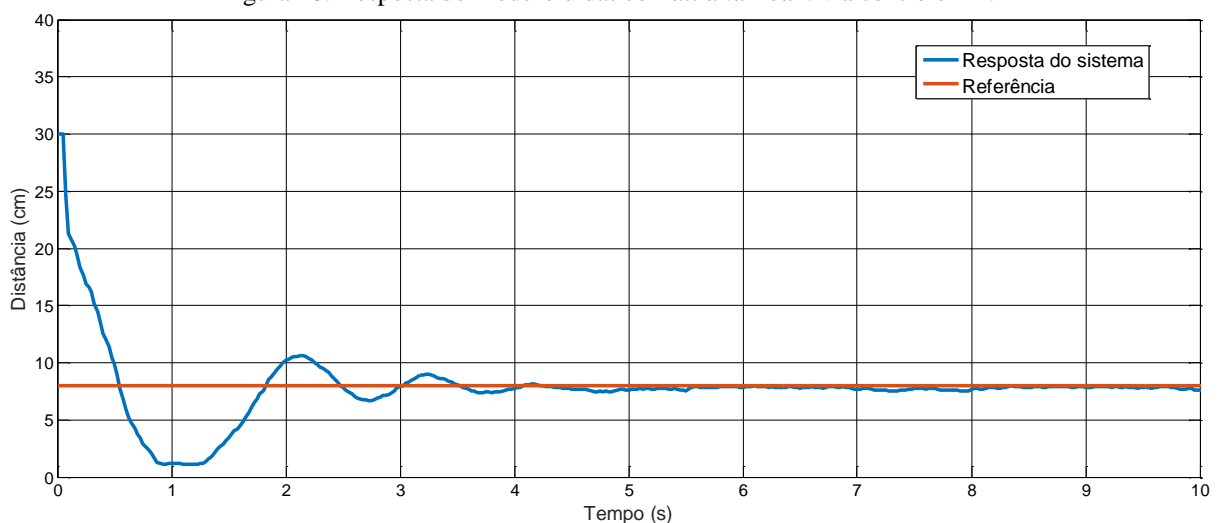
$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = - \frac{mgd}{L \left(\frac{J}{R^2} + m \right) s^2} \left[\frac{m}{rad} \right], \quad (1)$$

sendo J o momento de inércia da bola, R o raio da bola, m a massa da bola, g a aceleração da gravidade, α o ângulo entre o trilho e a horizontal, d o raio da engrenagem que liga o motor com o braço e L o comprimento do trilho, mais detalhes consulte o site “Control Tutorials for MATLAB® & Simulink®”. A Equação (2) exibe a função de transferência identificada, abrangendo a área de identificação de sistemas como estudo (AGUIRRE, 2007).

$$G(s) = \frac{R(s)}{\theta(s)} = \frac{2,099}{s^2} \left[\frac{m}{rad} \right]. \quad (2)$$

Outro exemplo, é a aplicação da estratégia de controle PD (Proporcional Derivativo) visando manter a bolinha em uma posição de referência desejada (valor-alvo ou *setpoint*). No controle realizado, inicialmente a bolinha parte da posição 30 cm com *setpoint* estipulado de 8 cm. Pela Figura 10, é possível observar que em torno de 3 segundos a bolinha situa-se no *setpoint* e se mantém até o final da implementação prática.

Figura 10: Resposta do módulo didático *Ball and Beam* via controle PD.



Fonte: Autoria Própria.

A comunicação entre o módulo e o computador utiliza a linguagem Simulink® (linguagem de blocos), sendo intuitiva, de simples aprendizado e configuração, tornando o módulo flexível e de fácil utilização. Além disso, um manual com sugestões de práticas e roteiros de utilização está sendo elaborado. Também será disponibilizado esquemáticos para que os acadêmicos possam replicá-los e auxiliá-los na manutenção do módulo didático.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado a construção de um módulo didático de baixo custo *ball and beam*, utilizado para ensaios de controle de posição, visando a fácil reprodução para os cursos de engenharia que tenham áreas de controle de processos. Atualmente, existe no mercado especializado diversos módulos didáticos do tipo *ball and beam* ou similares, porém os custos para aquisição em larga escala e manutenção são geralmente elevados.

O baixo custo do módulo didático proposto, bem como sua versatilidade e facilidade de programação e configuração, tem como objetivo permitir que instituições de ensino, como a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, possam replicar semelhantes módulos para auxiliar os acadêmicos no processo de aprendizado dos conteúdos ministrados em sala de aula teórica, tornando a formação mais sólida. Além do mais, a construção dos módulos auxilia os alunos a praticarem a interpretação de esquemas elétricos e montagem de estruturas, bem como a utilização de instrumentos como ferro de solda e multímetro. Analisando as vantagens envolvidas durante o processo de desenvolvimento do módulo sob a visão pedagógica, nota-se ser superior por potencializar a experiência prática dos alunos, além da experiência de gerir um projeto. Vale ressaltar que um manual com sugestões de práticas de laboratórios está sendo idealizado para que os acadêmicos possam conduzir os experimentos com êxito.

Por fim, a construção e utilização do módulo didático de baixo custo *ball and beam* no ambiente acadêmico proporciona o atendimento das necessidades de execução de tarefas práticas dos conteúdos ministrados em sala de aula nos cursos de Engenharia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à **Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio**, pelo espaço cedido na instituição para o desenvolvimento das atividades, bem como pelo incentivo e apoio em todas as etapas deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Caroline A. et al. **Medição de distância dos obstáculos utilizando sensores de infravermelho e plataforma Arduino®**. Departamento de Engenharia Elétrica, UFBA, 2013.

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. [s.l.]: UFMG, 2007.

CONTROL TUTORIALS FOR MATLAB® & SIMULINK®. **Ball and Beam**. Equipe CONTROL TUTORIALS, 2018. Disponível em: < <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=BallBeam§ion=SystemModeling> >. Acesso em: 5 set. 2018.

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.

LUGLI, Alexandre Baratella et al. **Sistema aplicado de controle de posição utilizando algoritmo PID**. 2015. 7f. SAISEE - II Seminário de Automação Industrial e Sistemas Eletro-Eletrônicos, Santa Rita do Sapucaí – MG, 04 mar. 2015.

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

OTTOBONI, Augusto. **Servo-acionamentos**. Mecatrônica Atual, n.6, out. 2002. Disponível em: http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/servo.pdf. Acesso em: 15 fev. 2019.

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

THE IMPORTANCE OF THE USE OF DIDACTIC MODULES FOR TEACHING-LEARNING IN ENGINEERING: DEVELOPMENT OF A LOW-COST MODULE BALL AND BEAM FOR DYNAMIC CONTROL PRACTICES

Abstract: *With the gap in studies of practical applications of control strategy, due the high cost and the high physical proportions of the industrial plants, didactic modules appeared which, usually represents an industrial process, but in a low scale. However, as a consequence of their high relative cost, these didactic modules are normally difficult to purchase, not only by the local institution, but also by other educational ones. Therefore, this work proposes the development of a simple and replicable low-cost didactic module ball and beam to help the consolidation process of the contents addressed in class regarding to topics of the control area.*

Keyword: *Didactic Module. Low cost. Ball and Beam. Arduino[®]. Dynamic Control.*