

# DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE PÊNDULO INVERTIDO PARA APRENDIZADO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DIGITAL

Educação Inovadora e Transformadora

Kenedy Matiasso Portella<sup>1</sup>  
Thiago Rodrigues Garcia<sup>2</sup>  
Max Anacleto Vasconcelos<sup>3</sup>  
Emmanuel Adamski de Moura<sup>4</sup>  
André Luís da Silva<sup>5</sup>  
Lucas Vizzotto Bellinaso<sup>6</sup>

## RESUMO

A crescente aproximação entre academia e indústria tem evidenciado uma necessidade real de incorporar maior conhecimento prático ao ensino de engenharia. Tendo esse cenário, se torna necessária a busca por métodos alternativos de aprendizagem, os quais possibilitem aos futuros profissionais uma formação mais próxima a um cenário profissional real. Nesse sentido, tem-se relatada na bibliografia a eficiência de metodologias ativas de ensino, dentre as quais se destaca a metodologia de Aprendizagem Baseada em Projeto (*Project-Based Learning – PjBL*). Neste trabalho, relata-se o desenvolvimento de uma bancada de pêndulo invertido para o ensino de técnicas de controle digital empregando a metodologia PjBL para graduação em Engenharia do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria.

**Palavras-chave:** PjBL; Ensino de engenharia; Sistemas de controle;

## INTRODUÇÃO

De acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) dos Cursos de Graduação em Engenharia, os egressos deverão ser preparados para apresentar soluções críticas e criativas aos problemas que surgirem ao longo de sua carreira

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Maria, [kenedyportella@hotmail.com](mailto:kenedyportella@hotmail.com).

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia de Controle e automação, Universidade Federal de Santa Matia, [thiago.rgarcia@hotmail.com](mailto:thiago.rgarcia@hotmail.com)

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, [vasconcelosmax@hotmail.com](mailto:vasconcelosmax@hotmail.com)

<sup>4</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, [emmanomoura@gmail.com](mailto:emmanomoura@gmail.com)

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, [taurarm@gmail.com](mailto:taurarm@gmail.com)

<sup>6</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, [lucas@gepoc.ufsm.br](mailto:lucas@gepoc.ufsm.br)

profissional, considerando aspectos tecnológicos, sociais, econômicos, éticos e ambientais. Para contemplar todas essas demandas a formação do engenheiro deve ser, obrigatoriamente, generalista e integral, a qual contemple além de todo o arcabouço conteudístico, uma visão crítica e realista acerca de um problema.

Dado isto, o grande desafio é a implementação de uma metodologia que estimule o aprendizado de forma crescente e voltada a problemas reais. Nesse cenário, em algumas das instituições de ensino mais conhecidas, vem sendo crescentemente adotadas metodologias ativas de ensino, dentre as quais, se destaca a Aprendizagem Baseada em Projeto (Project-Based Learning –PjBL).

É vasta a bibliografia que descreve e que trata da aplicação dessas técnicas em ensino de engenharia. Em MASSON et al. (2012), encontra-se uma revisão detalhada da metodologia, atentando principalmente às fases de projeto. RIBEIRO (2008) apresenta de forma simplificada alguns conceitos acerca da metodologia, destacando as principais problemáticas e vantagens associadas, além de apresentar um estudo de caso em ensino de engenharia. SANTOS et al. (2007), relata a experiência da aplicação da PBL em ensino de engenharia, evidenciando os aspectos positivos do método bem como dificuldades enfrentadas. Ainda, em NOBRE et al. (2006) temos os resultados da aplicação em três projetos na área da Engenharia Aeroespacial. No geral a metodologia foi avaliada muito positivamente, apesar das dificuldades iniciais de implementação.

A arquitetura PBL proposta de modo que o conteúdo programático da disciplina seja abordado de forma interdisciplinar, conectando os conteúdos teóricos aos práticos de forma motivadora, centrando o aluno como protagonista da solução do problema. Além dessa abordagem, é crescente o interesse por formas de pedagógicas de conhecimento que estimulem a busca por conhecimento pelos alunos fora da sala de aula. Nesse sentido, destaca-se principalmente a metodologia CDIO (do inglês: *Conceive, design, implement and operate*). O CDIO é uma proposta pedagógica para que os alunos se dediquem a projetos de livre escolha, seguindo certas diretrizes, e com crescente nível de complexidade, tal metodologia já é implementada no curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM.

A bancada didática em questão é proposta de forma que: possa ser usada em abordagens práticas do conteúdo programático das disciplinas de “Sistemas de Controle” e ainda, venha a contribuir na sedimentação do método de ensino “Conceber, Projetar, Implementar e Operar” (CPIO) no curso de Engenharia Aeroespacial. Essa proposta de abordagem conjunta tem sido implementada nos últimos anos em países como Singapura (Pee & Leong, 2005) e Finlândia (Säisä, Määttä & Roslöf, 2017).

A bancada proposta trata de uma bancada de pêndulo invertido. Este aparato é um dos mais utilizados no estudo de sistemas de controle, por possuir um comportamento que permite simulação de uma ampla gama de situações. Sua dinâmica é inerentemente não linear, ao mesmo passo que pode ser facilmente linearizada (analiticamente, se desejado). Possui dinâmica de sub-atuação e pontos de instabilidade, estabilidade e estabilidade-crítica. Além disso, o pêndulo invertido é uma primeira aproximação para uma série de sistemas reais como o movimento de robôs bípedes e bicicletas. Em engenharia aeroespacial, essa planta é particularmente interessante por se assemelhar muito a um foguete em fase de lançamento, ou mesmo pode simular o controle da atitude de satélites.

Ainda, a proposta se dá em torno de técnicas de controle digital, dada a grande inserção que essas plataformas possuem na área de controle de processos.

## **APRENDIZAGEM BASEADA EM PROJETOS**

A aprendizagem baseada em projetos foi proposta inicialmente por John Dewey no início do século XX, o qual comprovou o “aprender mediante o fazer”. A metodologia tem como bases o construtivismo e o construcionismo, o primeiro tem como um dos fundamentos a ideia de que o conhecimento não é único e o processo de formação de saberes se dá de forma diferente em cada indivíduo, através das iterações com o ambiente. O segundo afirma que o conhecimento é um processo de construção coletiva e não de memorização, desse modo, aulas expositivas se tornam muito menos eficientes quando comparadas a uma abordagem prática.

De acordo com MASSON (2008), as principais características dessa metodologia são:

- O aluno é o centro do processo;
- Desenvolve-se em grupos;
- O processo de aprendizado se torna ativo, cooperativo, integrado e interdisciplinar.

- Os professores participam ativamente do processo, mas não como transmissores do saber e sim um estimulador da descoberta do conhecimento. Eles auxiliam na solução dos problemas sempre que necessário, evitando, assim frustrações acerca do projeto.

Muito provavelmente tal método exige dedicação bem maior, tanto do professor quanto do aluno. Porém, satisfaz a ideia de que a aprendizagem é algo que só acontece quando o aluno é ativo e está interessado no que faz. Tal afirmação significa dizer que o aluno só aprende quando realiza e não com demonstrações, ou quando alguém faz por ele.

## **METODOLOGIA**

O sistema é um pêndulo com haste acoplada a um carrinho. A haste pode se mover em um grau de liberdade (GDL) angular e o carrinho em um GDL linear (Oganta, 2011), como ilustrado na figura (1). Tanto a posição linear do carrinho quanto a posição angular da haste são controladas por uma força aplicada ao carrinho, por isso diz-se que o sistema é sub atuado. Essa força é gerada no carrinho através de uma rosca infinita, que recebe um torque aplicado por um Servo motor. A ação de controle é calculada em um Intel Galileo Gen2, em seguida é enviada a um Arduino uno através de comunicação I2C, o Arduino envia um sinal PWM proporcional ao Servo conversor que se encarrega em amplificar o sinal para o motor. Para o cálculo da ação de controle, são utilizados os sinais de dois encoders, um responsável por medir a posição angular da haste e o segundo por medir a posição angular do eixo do motor, a qual é proporcional à posição linear do carrinho. As derivadas temporais de ambos os estados são obtidas de forma numérica no microcontrolador. Por questão de segurança, ainda são instaladas chaves fim de

curso em ambos os lados da bancada, as quais desativam instantaneamente o motor caso sejam ativadas. Uma ilustração em vista explodida da bancada é dada na figura (2).

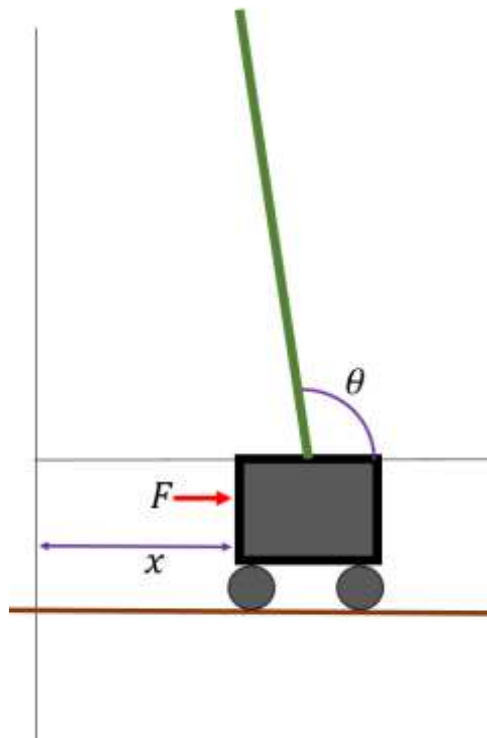


Figura 1: Representação da bancada de pêndulo invertido



Figura 2: Representação em 3 dimensões da bancada

Além da bancada física, o projeto conta com a confecção de um manual didático e roteiros de aula.

O manual didático é um material descritivo no qual estão informadas todas as características relevantes na obtenção de modelos e implementação de projetos de tempo discreto. Ele está dividido em 7 capítulos, nomeadamente:

- 1- Introdução: Aplicações do pêndulo em problemas de engenharia;
- 2- O pêndulo invertido: Modelagem matemática do pêndulo invertido simples e duplo;
- 3- Introdução à bancada: Descrição geral do funcionamento da bancada, com ênfase no diagrama completo;
- 4- Operação: Manual técnico de operação da bancada, roteiros e procedimentos a serem adotados;
- 5- Controle digital: Instruções sobre a implementação da malha de controle em microcontroladores;
- 6- Memorial descritivo mecânico;
- 7- Memorial descritivo eletrônico.

O material é organizado de modo a conter linguagem amigável e direta, possibilitando assim que o foco esteja no projeto de controle. De modo complementar são inseridos dois memoriais descritivos, possibilitando a implementação de uma bancada idêntica por algum interessado, ou mesmo para realização de projetos mais avançados que fogem do escopo das disciplinas.

Quanto aos roteiros didáticos, os mesmos são organizados de forma cronológica, contemplando os principais conteúdos das disciplinas de “Sistemas de controle I” e “Sistemas de controle II”. Ao total, inicialmente são redigidos 6 roteiros, referentes aos conteúdos de:

- 1- Modelagem de sistemas dinâmicos;
- 2- Modelo “caixa preta” através da resposta ao degrau;
- 3- Projeto de controle clássico de estabilidade;
- 4- Projeto de controle moderno de estabilidade;
- 5- Projeto de controle moderno com servomecanismo;
- 6- Projeto de observadores de estado;

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**



A quantidade de aprendizado não possui métricas muito bem definidas. Como forma de mensurar os resultados, nos atemos a características técnicas dos materiais produzidos e de experimentos realizados.

A bancada didática projetada e construída segue todas as normas de segurança previstas, além de possuir uma interface amigável pré-programada, permitindo ao usuário a avaliação de malhas de controle projetadas de forma facilitada.

Os roteiros de aula abordam os principais tópicos do conteúdo programático das disciplinas de “Sistemas de Controle I” e “Sistemas de controle II”. Apresentando a problemática de forma clara e desafiadora.

O manual didático da bancada é um material técnico e pedagógico que contém informações acerca das características construtivas da mesma, manuais descritivos dos sistemas mecânicos e eletrônicos, assim, o aluno pode implementar seu projeto de controle.

De forma quantitativa, é importante pontuar que alunos da disciplina de “Sistema de controle II” produziram trabalhos completos em congressos internacionais, acerca da modelagem e controle da bancada de pêndulo invertido.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A aplicação da metodologia permite que os alunos protagonizem a própria formação, trabalhando de forma cooperativa, aplicada e multidisciplinar. A metodologia também permite que os estudantes encontrem a solução de problemas práticos, próximos a problemas reais, dando sentido aos conceitos físicos e matemáticos abstratos absorvidos durante a graduação. Por fim, a abordagem pedagógica permite a formação de profissionais mais alinhados às problemáticas da sociedade, indústria e academia, com visão crítica e criativa acerca da solução de problemas.

Como tarefas futuras tem-se a expansão da aplicação da bancada para as disciplinas de “Controle Ótimo”, “Controle por computador” e implementação de uma plataforma para uso de técnicas de controle analógicas. Ainda, será realizado um

curso de capacitação direcionado aos professores da área de controle de sistemas para que possam utilizar a bancada em suas disciplinas.

## REFERÊNCIAS

- OGATA, K.. Engenharia de Controle Moderno – 5ª edição. Pearson, 2011.
- BOUBAKER, O.. The Inverted Pendulum Benchmark in Nonlinear Control Theory: A Survey. International Journal of Advanced Robotic Systems, vol 10, p. 1-9., 2013.
- BARBOSA, E. F.; MOURA, D. G.. Metodologias ativas de aprendizagem na educação profissional e tecnológica. B. Tec. Senac, Rio de Janeiro, v. 39, n.2, p.48-67, maio/ago. 2013.
- MASSON, T. J., MIRANDA, L. F., MUNHOS JR, A. H., Castanheira, A. M. P., Metodologia de ensino: Aprendizagem baseada em Projetos (PBL). Anais Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2012.
- FILHO, E. E., RIBEIRO, L. R. DE C. Aprendendo com PBL- Aprendizagem baseada em problemas: Relato de uma experiência em cursos de engenharia da EESC-USP. *Minerva*. v. 6, n.1: p. 23-30, 2008.
- NOBRE, J. C. S., LOUBACH, D. S., CUNHA, A. M., DIAS, L. A. V., Aprendizagem baseada em Projeto (*Project-Based Learning-PBL*) Aplicada a *Software* embarcado e de tempo real. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação. 2006.
- RIBEIRO, L. R. DE C., Aprendizagem baseada em Problemas (PBL) na educação em engenharia. *Revista de ensino de engenharia*. V. 27, n. 2, p. 23-32. 2008.
- SANTOS, D. M. B., PINTO, G. R. P. R., SENA, C. P. P., BERTONI, F.C., BITTENCOURT, R. A., Aplicação do método de aprendizagem baseada em problemas no curso de engenharia de computação da Universidade Estadual de Feira de Santana. XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. 2007.
- Säisä, M., Määttä, J., Roslöf, J. Integration of CDIO Skills into Project-Based Learning in Higher Education. 13th International CDIO Conference. Cadadá, 2017.
- Pee, S. H., Leong, H., Implementing Project Based Learning Using CDIO Concepts. 1st. Annual CDIO Conference. Canadá. 2005.