

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE PÊNDULOS INVERTIDOS COMO FERRAMENTAS DIDÁTICAS EM CURSOS DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

R. BREGANON¹, U. N. L. T. ALVES², F. S. F. RIBEIRO³, G. V. BARBARA⁴, J. P. L. S. ALMEIDA⁵, L. E. PIVOVAR⁶, M. A. F. MONTEZUMA⁷, M. MENDONÇA⁸

Instituto Federal do Paraná¹⁻⁶, Universidade Tecnológica Federal do Paraná^{1,2,6,7,8}

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8203-8699>¹

ricardo.breganon@ifpr.edu.br¹

Submetido 05/06/2020 - Aceito 02/09/2021

DOI: 10.15628/holos.2021.10351

RESUMO

Atualmente, os cursos de engenharia possuem grande carga horária dedicada a estudos teóricos e, com base na aquisição destes conteúdos, um período muito curto do curso é dedicado ao reconhecimento prático e a aplicações dos conceitos investigados. Neste sentido, uma das metodologias para o ensino que introduz a contextualização prática ao estudante consiste na utilização de ferramentas didáticas para a realização de experimentos, tais como bancadas e equipamentos, os quais se tornam elementos-chaves no processo de ensino-aprendizagem. Esta metodologia se aplica, principalmente, aos conteúdos relacionados a controle de processos, como por exemplo em sistemas dinâmicos, não lineares, com perturbações, presentes em cursos de engenharia que envolvem controle e automação. Dada a importância das ferramentas didáticas para compreender os conteúdos abordados de maneira

teórica, este artigo relata o desenvolvimento de duas ferramentas didáticas para complementar o estudo teórico de sistemas de controle, a saber: um aeropêndulo e um pêndulo Furuta. Em geral, os sistemas de pêndulo invertido apresentam desafios tanto na etapa de modelagem quanto no projeto de controladores. Deste modo, os pêndulos apresentados neste artigo são ferramentas importantes para o ensino de conteúdos relacionados ao controle de sistemas. Uma vez que os protótipos dos sistemas propostos sejam validados por meio de experimentos de controle, os mesmos serão utilizados como ferramentas didáticas em componentes curriculares em cursos de engenharia como, por exemplo, em disciplinas de: sistemas de controle, sistemas realimentados, controle multivariável e controle não linear.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramenta Didática, Metodologia Alternativa em Engenharia, Aeropêndulo, Pêndulo Furuta.

DEVELOPMENT OF INVERTED PENDULUM SYSTEMS AS DIDACTICAL TOOLS IN COURSES OF CONTROL AND AUTOMATION ENGINEERING

ABSTRACT

Nowadays, engineering courses spend a lot of time on theoretical studies. From these contents, the rest of the time aims to practical issues and applications of the investigated concepts. In this way, one of the teaching methodologies that introduces a practical contextualization to the students consists of using didactical tools for conducting experiments, such as benches and equipment, which are key elements in the teaching-learning process. This approach is mainly applied to content related to process control, such as dynamic systems, nonlinear systems, and systems with disturbances, which are presented in engineering courses that encompass control and automation. Due to the importance of the didactical tools for understanding

contents formerly approached theoretically, this paper presents the development of two didactical tools to complement the control system studying: an aeropendulum and a Furuta pendulum. In general, inverted pendulum systems offer challenges in the modeling and control design steps. Thus, the pendulums presented in this article are important tools for teaching content related to control systems. Once the prototypes of the proposed systems are validated through control experiments, they will be used as teaching tools in curriculum components in engineering courses, for example, in disciplines of control systems, feedback systems, multivariable control, and nonlinear control.

KEYWORDS: Didactical Tool, Alternative Methodology in Engineering, Aeropendulum, Furuta Pendulum.



1 INTRODUÇÃO

Os cursos de engenharia de controle e automação integram conhecimentos de áreas: eletrônica, elétrica, mecânica, para a formação de profissionais. De forma geral, os estudos que envolvem disciplinas de sistemas elétricos, mecânicos e informatizados contemplam a base multidisciplinar de conhecimentos neste itinerário formativo, como apontado por Lopes *et al.* (2018). Durante o curso, uma parcela significativa da carga horária é dedicada ao estudo de sistemas de controle, o qual consiste na compreensão de leis e teoremas matemáticos capazes de reproduzir e controlar dinâmicas que representam sistemas físicos reais (OGATA, 2010).

Embora seja imprescindível a utilização de análises matemáticas e de simulações, as técnicas para implementar as leis de controle não preveem a aplicação destes conceitos à sistemas didáticos reais. Neste trabalho, entende-se como sistemas didáticos reais aqueles que são inspirados no contexto industrial (ou outro ambiente que o profissional possa atuar), porém em escalas laboratoriais. Neste sentido, metodologias alternativas de ensino que envolvam a aplicação prática dos conteúdos estudados (aulas práticas em laboratórios), tais como em bancadas didáticas e protótipos reais, são opções válidas para a aprendizagem significativa dos estudantes (BALCHEN, HANDLYKKEN & TYSSO, 1981).

Segundo Lunetta (1991), as aulas práticas podem ajudar no desenvolvimento ou fixação de conceitos científicos, além de permitir que os estudantes aprendam como abordar objetivamente na observação da dinâmica de um protótipo e como desenvolver soluções para problemas complexos. Além disso, as aulas práticas permitem que o professor/tutor possa abordar um determinado conteúdo sob diferentes perspectivas. Os sistemas dinâmicos, por exemplo, podem ser explorados a partir do ponto de vista da matemática, da física, da mecânica, além de outros conceitos específicos (inserção de incerteza em parâmetros, sinais ruidosos etc.). Ainda nessa perspectiva, todas as abordagens mencionadas podem ser juntamente exploradas em uma observação de um sistema real, mesmo que em escalas de laboratório (CAMPO, 2007; LEVA, 2003). De acordo com Pekelman & Mello (2004), para que isso seja possível, as instituições de ensino devem proporcionar aos acadêmicos a oportunidade de interagir com tais ferramentas didáticas.

De forma específica, o uso de bancadas didáticas experimentais constitui-se como um relevante recurso a ser utilizado nos processos de ensino aprendizagem das áreas técnicas e de Engenharia, sobretudo por promover uma articulação entre os conhecimentos teóricos adquiridos e a prática profissional associada aos diversos cursos de formação (PADULA & VISIOLI, 2013).

De acordo com Klassner & Anderson (2003), as bancadas didáticas propiciam aos alunos a ilustração de conceitos importantes, facilitando a compreensão dos modelos matemáticos necessários para a análise dos sistemas. Com isso, almeja-se maior eficiência no processo de aprendizado. A possibilidade de aplicar conceitos abstratos em meios concretos, tais como sistemas mecânicos e códigos de programação para a solução de problemas vistos em sala de aula, promove um aumento na motivação dos estudantes.

Segundo Amorim *et al.* (2006), as bancadas experimentais são dispositivos usados didaticamente para avaliar conceitos e validar modelos teóricos. O uso desses equipamentos,

simulando a operação de sistemas reais, é também um método amplamente conhecido e extensivamente usado para o desenvolvimento de projetos em geral.

Constata-se, na literatura da área, que a utilização de equipamentos/bancadas didáticas, particularmente no ensino de conteúdos relacionados ao controle de sistemas, tem sido foco de diversas metodologias pedagógicas. Lara *et al.* (2018) relatam, por exemplo, o desenvolvimento de uma planta didática flexível composta por módulos eletrônicos que podem ser combinados para simular plantas com diferentes funções de transferência. Gao *et al.* (2015) estudaram a construção de três protótipos de sistema bola-viga para serem usados por alunos de graduação no estudo de controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) e na compreensão/implementação de programação de microcontroladores. Silveira *et al.* (2018) desenvolveram uma bancada de controle de temperatura utilizando um módulo termoeletrônico de efeito Peltier.

Em especial, os sistemas didáticos classificados como pêndulo invertido são exemplos comuns em livros didáticos sobre teoria de controle, por apresentarem uma dinâmica não linear e ponto de equilíbrio instável (OGATA, 2010). Nestas situações, tais sistemas são considerados como plataformas de base conceitual para a aplicação e comparação de desempenho de diversas estratégias de controle (BOUBAKER, 2013). Entretanto, a maioria dos livros que abordam estes sistemas enfatizam apenas os aspectos de modelagem matemática e, conforme avançam no tema, apresentam possíveis projetos de controladores a serem aplicados ao modelo computacional do pêndulo, em simulação. Isso quer dizer que não é comum a publicação de trabalhos que apresentem um roteiro ou indicações de métodos para a prototipação destes sistemas em laboratório, o que ajudaria os estudantes a observarem aspectos da modelagem que não ocorrem em simulações, tais como a dinâmica de atrito, perturbações inesperadas e sinais ruidosos.

Com base nas motivações apresentadas, neste trabalho são descritos os principais aspectos de construção de dois sistemas de pêndulo invertido, a serem utilizados por estudantes do curso de Engenharia de Controle e Automação, do Instituto Federal do Paraná (IFPR) – Jacarezinho – PR. O primeiro consiste em um aeropêndulo, enquanto o segundo é um pêndulo invertido rotacional, também conhecido na literatura como pêndulo Furuta. Juntamente ao descritivo de construção, um outro objetivo deste artigo consiste em apresentar as principais perspectivas de utilização destes sistemas ao longo dos componentes curriculares que englobam seus respectivos estudos. É importante salientar que as dimensões dos pêndulos desenvolvidos neste trabalho são apenas referências, que podem servir como base para outras construções destes tipos de sistemas, porém a proposta de metodologia construtiva pode ser generalizada.

As próximas seções são organizadas da seguinte forma: na Seção 2 são apresentados os aspectos gerais acerca da construção dos dois sistemas de pêndulo invertido propostos neste trabalho; na Seção 3 são apresentadas as perspectivas para o uso dos sistemas desenvolvidos no processo de ensino-aprendizagem de conteúdos relacionados a controle de sistemas dinâmicos; as principais conclusões e expectativas para a continuidade do trabalho são apresentadas na Seção 4.



2 DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS

Nesta seção são apresentados os aspectos gerais de construção do aeropêndulo (Seção 2.1) e do pêndulo Furuta (Seção 2.2).

2.1 SISTEMA DE AEROPÊNDULO

O primeiro protótipo produzido, aeropêndulo, é um sistema composto por uma haste acoplada a um eixo rotacional, em cuja extremidade há dois conjuntos de motores do tipo *brushless* e hélices em contraposição. Na Figura 1 (a), é apresentada a modelagem em três dimensões (3D) deste equipamento, desenvolvida a partir de um software de projetos, enquanto sua respectiva vista explodida é apresentada na Figura 1 (b). Os principais componentes e parâmetros de dimensionamento do aeropêndulo são apresentados na Tabela 1.

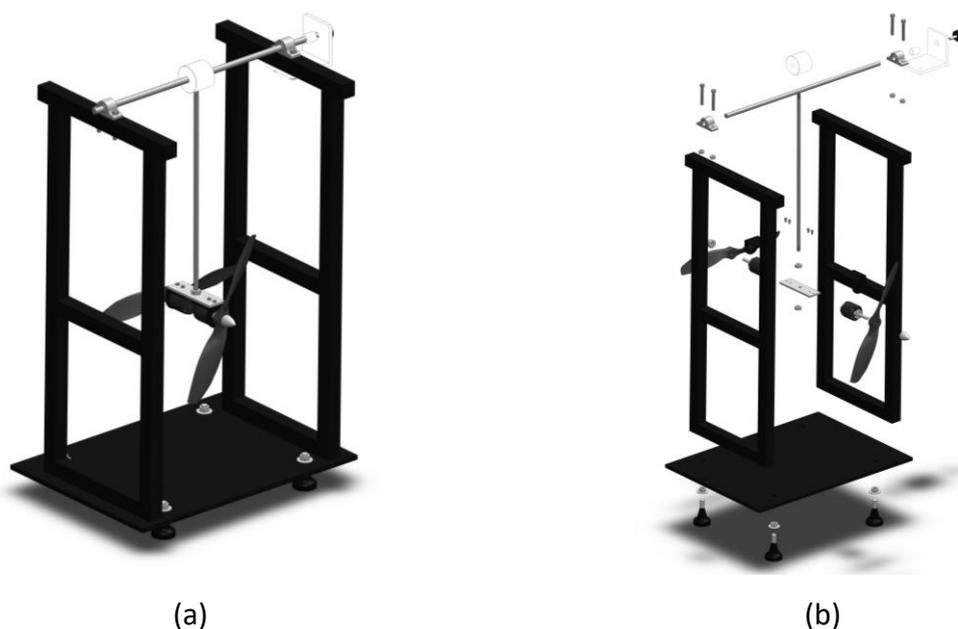


Figura 1: Ilustração 3D do aeropêndulo: (a) Vista do sistema em 3D. (b) Vista explodida do aeropêndulo.

Tabela 1: Componentes e parâmetros de dimensionamento do aeropêndulo.

Quantidade	Especificação
2	Motor <i>brushless</i> , modelo <i>Mystery</i> , 11,1 V, F2836 – 3800 RPM/V. Corrente máxima de 35 A.
2	Módulos <i>Speed Control</i> , 40 A.
2	Hélice: 8" x passo 5, modelo <i>S-2 Series Master Airscrew</i> .
1	Haste de alumínio, de 370 mm x 6,35 mm e massa de 0,05 kg.
1	Suporte de alumínio para a fixação dos motores, com massa de 0,015 kg.
	Massa total, com o conjunto de motores e hélices: 0,275 kg.
1	Potenciômetro multivoltas de 100 k Ω (ou encoder).

1 Bateria Li-Po (40C) 5200 mAh.

O elemento atuador deste sistema consiste nos dois motores *brushless* com suas respectivas hélices. A atuação dos motores, permite que sejam geradas as forças de empuxo nas hélices para que a haste gire livremente em torno do seu eixo de acoplamento (GHANBARI *et al.*, 2018; GÜLTEKIN & TAŞCIOĞLU, 2011).

Partindo do projeto ilustrado nas Figuras 1 (a) e (b), a confecção do sistema de aeropêndulo resultou no protótipo apresentado na Figura 2, o qual servirá como ferramenta de ensino para o desenvolvimento de modelos matemáticos e para a aplicação de técnicas de controle a partir de um sistema real, incluindo suas incertezas de medição e aquisição de dados. Os detalhes de utilização deste sistema serão apresentados e discutidos na Seção 3.

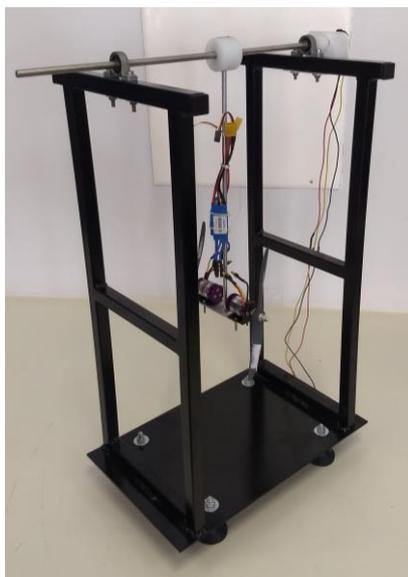


Figura 2: Confeção do sistema de aeropêndulo.

2.2 SISTEMA DE PÊNDULO FURUTA

O segundo protótipo produzido é conhecido na literatura como pêndulo Furuta, o qual é composto por um motor elétrico de corrente contínua, acoplado a um braço que rotaciona ao longo do eixo horizontal, e um pêndulo (haste) na outra extremidade deste braço (CAZZOLATO & PRIME, 2011; PIVOVAR *et al.*, 2020). A modelagem em três dimensões deste sistema é apresentada na Figura 3 (a), seguido de sua vista explodida, na Figura 3 (b). Conforme o eixo do motor é rotacionado (Figura 3(a)), o pêndulo é impulsionado ao longo do eixo vertical. Os principais componentes e parâmetros de dimensionamento do pêndulo Furuta são apresentados na Tabela 2.

O elemento atuador deste sistema é o motor DC, cujo acionamento é dado por um sinal de tensão variando de -12V a 12V. O sinal da posição da haste é adquirido por meio de um potenciômetro, acoplado em sua base, enquanto o sinal da posição do braço é obtido por um encoder, instalado por um sistema de polias e correia na base do motor.

A partir do projeto ilustrado nas Figuras 3 (a) e (b), a confecção do sistema de pêndulo Furuta resultou no protótipo apresentado na Figura 4 e que, de forma semelhante ao aeropêndulo

(Seção 2.1), também servirá como ferramenta de ensino para o desenvolvimento de modelos matemáticos e para a aplicação de técnicas de controle, partindo das especificações do protótipo real. Assim como para o aeropêndulo, os principais detalhes acerca de sua utilização serão apresentados na Seção 3.

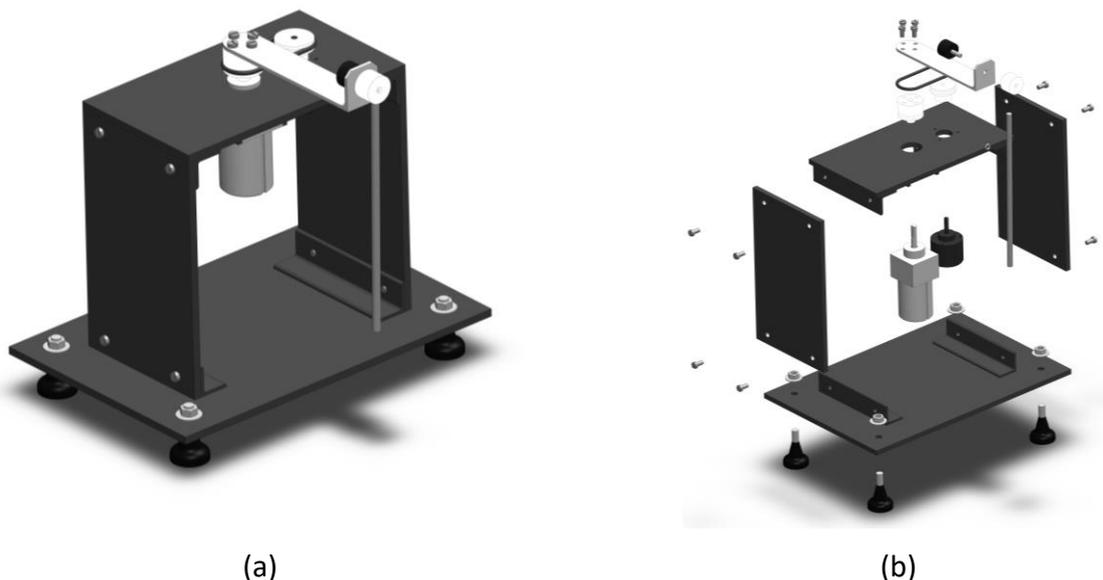


Figura 3: Ilustração 3D do pêndulo Furuta: (a) Vista do sistema em 3D. (b) Vista explodida do pêndulo Furuta.

Tabela 2: Componentes e parâmetros de dimensionamento do pêndulo Furuta.

Quantidade	Especificação
1	Motor DC (± 12 V) com caixa de redução (500 RPM).
1	Encoder incremental, 600 pulsos, 5-24V.
1	Haste de alumínio de 290 mm de comprimento e massa de 0,0248 kg.
1	Suporte (braço), acoplado ao motor e à haste, de 300 mm de comprimento e massa de 0,155 kg.
1	Potenciômetro multivoltas de 100 k Ω (ou encoder).

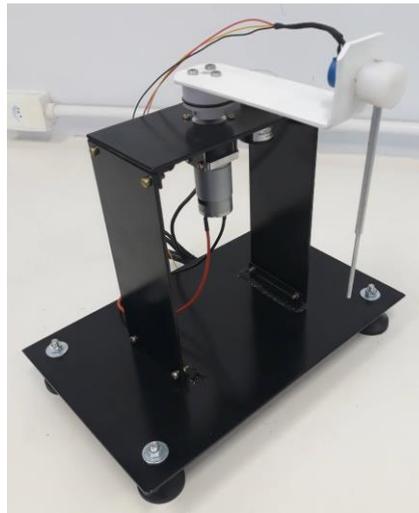


Figura 4: Confeção do sistema de pêndulo Furuta.

3 PERSPECTIVAS DE ENSINO COM OS PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS

As perspectivas de ensino com os protótipos desenvolvidos partem de seus objetivos de controle, ou seja, em ambos os sistemas, deseja-se estabilizar a posição da haste (pêndulo) na posição vertical, de forma invertida. Deste princípio, diversas são as formas de explorar o problema de controle proporcionado pelos protótipos, que atingem desde a compreensão de dimensionamento e projetos, geralmente abordado em componentes iniciais do curso (ex: Introdução à Engenharia de Controle e Automação), até estratégias de controle multivariável. Na Figura 5 é apresentado um exemplo da ramificação de investigações que os protótipos proporcionam, com seus respectivos e possíveis componentes curriculares associados à Engenharia de Controle e Automação (ECA).

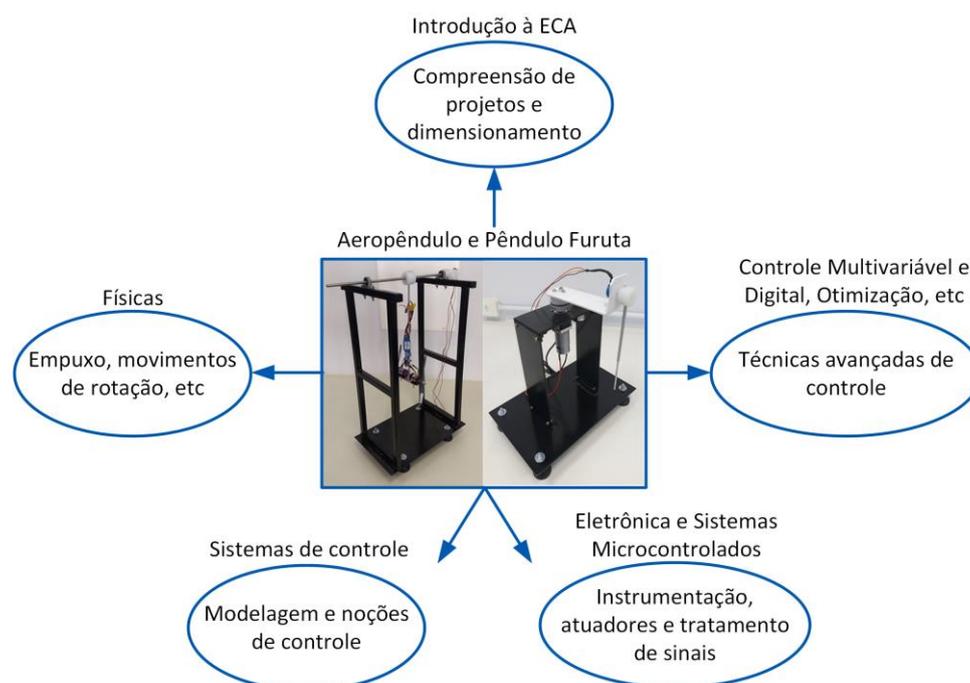


Figura 5: Exemplos de utilização dos protótipos desenvolvidos.

Do ponto de vista de sistemas de controle, diversas são as possibilidades de utilização. Para o aeropêndulo, por exemplo, Job & Jose (2015) apresentaram e compararam a implementação de um controlador PID, um controlador *Linear Quadratic Regulator* (LQR) e um controlador PID baseado em LQR. Um controlador PID tradicional e um controlador Fuzzy PID, foi utilizado por Taskin (2017) para o controle de posição angular de um aeropêndulo. Habib *et al.* (2013) apresentaram um controlador avanço e atraso, derivado de um controlador proporcional simples, com realimentação em malha fechada para controle de posição do pêndulo, aplicado em um sistema aeropêndulo e modelado como um sistema de primeira ordem. Ghanbari *et al.* (2018) apresentaram um controlador contínuo para sistemas de dados amostrados e sugeriram uma função custo de otimização para minimização do limite final em um aeropêndulo com dupla hélice fixadas lado a lado em uma extremidade da haste. Por fim, compararam os resultados de simulação com os resultados experimentais do sistema. Gültekin & Taşcioglu (2011) também utilizaram em seu trabalho um sistema aeropêndulo com dupla hélice para fins educacionais e mostraram a implementação de um controlador PD discreto para o controle de posição do pêndulo.

Para experimentos com o pêndulo Furuta, Rigatos *et al.* (2017) utilizaram este sistema para testar uma estratégia de controle não linear com norma \mathcal{H}_∞ . Wadi *et al.* (2018) projetaram uma estratégia de controle com modos deslizantes considerando distúrbios externos em um pêndulo Furuta. Madrid *et al.* (2017) desenvolveram um controle preditivo para este tipo de sistema, utilizando um modelo linearizado através da série de Taylor, o que permitiu considerar as restrições do equipamento no cálculo do sinal de controle. Pivovar *et al.* (2020) apresentaram a aplicação de um controle seguidor por realimentação de estados e a modelagem linear deste sistema.

Com base nas técnicas de controle avançadas apresentadas, é de fundamental importância que o estudante compreenda o funcionamento base destes sistemas, do ponto de vista das teorias de controle, descrito conforme segue.

Inicialmente, o aeropêndulo deve ser caracterizado como um sistema multivariável, de duas entradas e uma saída. Os dois atuadores (motores) representam as mencionadas entradas (variáveis manipuladas: empuxos), enquanto o ângulo de inclinação da haste consiste na saída do sistema (variável controlada: posição angular). Neste sentido, o estudante deve ter como objetivo projetar um controlador tal que, a partir de um ângulo desejado de inclinação (entrada desejada), e da medida da posição angular da haste, obtida pelo potenciômetro, admite-se como entrada a diferença destes sinais (erro) e calcule ações de controle, a serem aplicadas a cada um dos motores, a fim de minimizar o erro calculado. Na Figura 6, é apresentado um diagrama de blocos do sistema aeropêndulo em malha fechada com um controlador, a ser projetado pelo estudante.

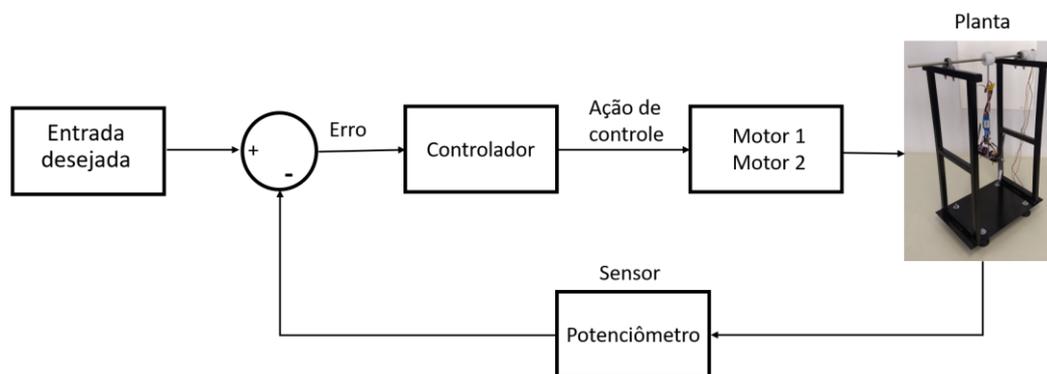


Figura 6: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada para o aeropêndulo.

De forma similar ao aeropêndulo, o pêndulo Furuta também é classificado como um sistema multivariável, porém há apenas uma entrada e duas saídas. O motor DC representa a única entrada (variável manipulada: torque aplicado), enquanto as posições angulares do braço (obtida pelo *encoder*) e da haste (obtida pelo potenciômetro) são as respectivas variáveis controladas. Neste sistema, o desafio ao estudante consiste em projetar um controlador que admite como entrada os sinais de erro referente às posições angulares do braço e da haste e, como saída, uma única ação de controle que leve a estabilização da haste na posição vertical (invertida) e também da posição angular do braço. Na Figura 7, é apresentado um diagrama de blocos do sistema do pêndulo Furuta em malha fechada com um controlador, a ser projetado pelo estudante.

Dadas as perspectivas metodológicas de ensino apresentadas nesta seção, observa-se que os protótipos desenvolvidos são opções válidas para atividades práticas de sistemas de controle, além de abordagens multidisciplinares.

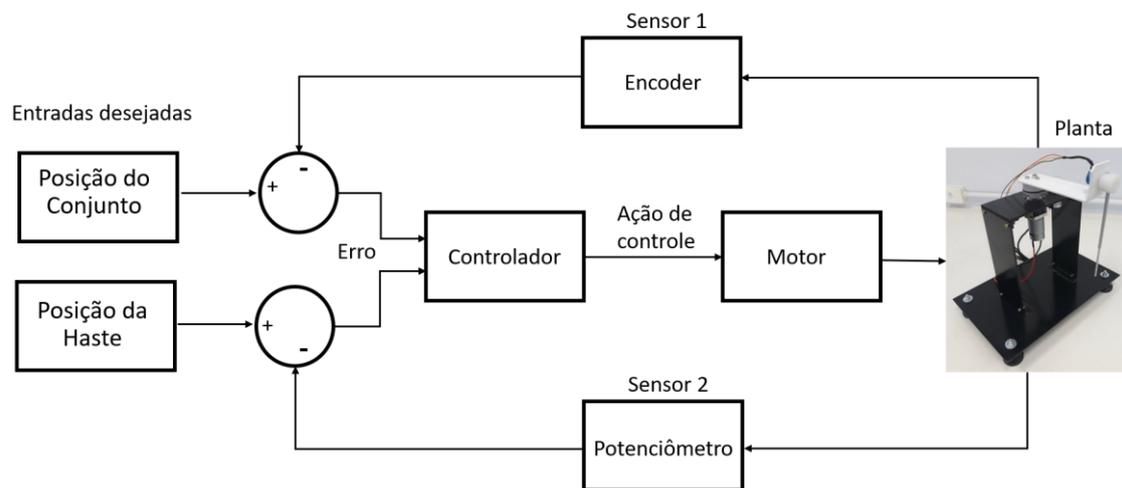


Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada para o pêndulo Furuta.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentado o desenvolvimento de dois protótipos de sistemas de pêndulo invertido, um aeropêndulo e um pêndulo de Furuta. O desenvolvimento de ambos os protótipos parte da premissa de que estudantes de Engenharia de Controle e Automação e áreas afins necessitam ter contato com metodologias alternativas que aplicam conhecimentos teóricos em situações práticas, mesmo que em escalas laboratoriais. O propósito dessa abordagem é propiciar a observação de simulações em situações reais, como sinais ruidosos, influências externas, perturbações, entre outras.

Como apresentado ao longo do trabalho, os sistemas de pêndulo invertido demonstram ser multidisciplinares, ou seja, além da utilização dos protótipos em componentes curriculares específicos de controle de processos, também podem ser considerados em componentes correlatos, por exemplo: na eletrônica, os estudantes podem projetar condicionadores de sinais;

na física, evidenciam-se o movimento rotacional e o empuxo; na introdução à engenharia, os conceitos introdutórios de projeto e dimensionamento podem ser abordados.

Em trabalhos futuros, pretende-se elaborar um guia de experimentos de sistemas de controle que contemplem a utilização dos protótipos apresentados neste artigo e, juntamente com docentes de outras áreas, um guia que proporcione investigações nos componentes correlatos.

5 REFERÊNCIAS

- Amorim, M. J. (2006). Desenvolvimento de Bancada Didático-Experimental de Baixo Custo para Aplicações em Controle Ativo de Vibrações (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- Balchen, J. G., Handlykken, M., & Tyso, A. (1981). The need for better laboratory experiments in control engineering education. *IFAC Control Science and Technology*, 2(14), 3363-3368.
- Boubaker, O. (2013). The inverted pendulum benchmark in nonlinear control theory: a survey. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 233(10), 1-9.
- Campo, A. B. (2007). Projeto e simulação de um controlador digital para um sistema aeroestabilizador. *Integração*, 48(1), 61-65.
- Cazzolato, B. S., & Prime, Z. (2011). On the dynamics of the Furuta pendulum. *Journal of Control Science and Engineering*, 2011(2011), 1-8.
- Gao, Z., Wijesinghe, S., Pathinathanpillai, T., Dyer, E., & Singh, I. (2015). Design and implementation a ball balancing system for control theory course. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 11(5), 2363-2374.
- Ghanbari, M., Bahraini, M., & Yazdanpanah, M. J. (2018). Continuous control of sampled data systems with robustness against bounded measurement errors. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 10(40), 3125-3133.
- Gültekin, Y., & Taşcıoğlu, Y. (2011, May). Pendulum Positioning System Actuated by Dual Motorized Propellers. *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, Turkey, 6-9.
- Habib, G., Miklos, A., Enikov, E. T., Stepan, G., & Rega, G. (2013, September). Experimental validation of the act-and-wait control concept through the aeropendulum. *11th International Conference on Vibration Problems*, Lisboa, Portugal, 1-10.
- Job, M. M., & Jose, P. S. H. (2015, March). Modeling and control of mechatronic aeropendulum. *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*. IEEE, Coimbatore, India, 1-5.
- Klassner, F., & Anderson, S. D. (2003). Lego mindstorms: Not just for k-12 anymore. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 10(2), 12-18.



- Lara, V., Vargas, H., Castro, C., Chacón, J., & Torre, L. (2018, October). Design and development of a flexible control laboratory plant for educational purposes. *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*. IEEE, Concepcion, Chile, 1-6.
- Leva, A. (2003). A hands-on experimental laboratory for undergraduate courses in automatic control. *IEEE Transactions on Education*, 2(46), 263-272.
- Lopes, J. V. B., Júnior, D. S., & Munareto, S. S. (2018, Setembro). Um projeto com abordagem multidisciplinar na formação do profissional de engenharia de controle e automação. *XLVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*, Salvador, BA, Brasil, 1-10.
- Lunetta, V. N. (1991). Atividades práticas no ensino da Ciência. *Revista Portuguesa de Educação*, 1(2), 81-90.
- Madrid, J. L. D., Querubín, E. A. G., & Ospina-Henao, P. A. (2017, October). Predictive control of a Furuta pendulum. *Colombian Conference on Automation Control (CCAC)*, Cartagena, Colombia, 1-6.
- OGATA, K. (2010). *Engenharia de controle moderno* (5a ed.). São Paulo: Pearson Prentice Hall do Brasil.
- Padula, F., & Visioli, A. (2013). An approach for teaching automatic control in a laboratory of mechatronics. *10th IFAC Symposium Advances in Control Education*, 17(46), 214-219.
- Pekelman, H., & Mello JR, A. G. (2004, Setembro). A Importância dos Laboratórios no Ensino da Engenharia Mecânica. *XXXII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, Brasília, DF, Brasil, 1-9.
- Pivovar, L. E., Breganon, R., Alves, U. N. L. T., Ribeiro, F. S. F., Barbara, G. V., Almeida, J. P. L. S., & Mendonça, M. (2020). A Tracking System Control Approach Applied on a Rotary Inverted Pendulum Model. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 10(06), 48-56.
- Rigatos, G., Siano P., Abbaszadeh, M., & Ademi, S. (2017, July). Nonlinear H-infinity control for the rotary pendulum. *11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*. IEEE, Wasowo Palace, Poland, 217-222.
- Silveira, A. S., Machado, E., & De Souza, J. A. (2018). Construction of a lowcost didactic bench for teaching control systems. *Brazilian Applied Science Review*, 1(3), 133-144.
- Taskin, Y. (2017). Fuzzy PID controller for propeller pendulum. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 1(17), 3175-3180.
- Wadi, A., Lee, J., & Romdhane, L. (2018, March). Nonlinear sliding mode control of the Furuta pendulum. *11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. IEEE, Sharjah, United Arab Emirates, 1-5.



COMO CITAR ESTE ARTIGO:

BREGANON, R., ALVES, U. N. L. T., RIBEIRO, F. S. F., BARBARA, G. V., ALMEIDA, J. P. L. S., PIVOVAR, L. E., MONTEZUMA, M. A. F., MENDONÇA, M. (2021) Desenvolvimento de Sistemas de Pêndulos Invertidos como Ferramentas Didáticas em Cursos de Engenharia de Controle e Automação. *Holos*. 37(5), 1-12.

SOBRE OS AUTORES**R. BREGANON**

Possui Graduação em Tecnologia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR (2006), Graduação em Engenharia de Produção pela Faculdade Estácio de Sá de Ourinhos - FAESO (2019), Especialização em Automação e Controle de Processos Industriais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR (2007), Especialização em Docência da Educação Profissional, Técnica e Tecnológica pelo Instituto Federal do Paraná - IFPR (2016), MBA em Gestão Pública pela Universidade Pitágoras Unopar - UNOPAR (2020), Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR (2020), Mestrado em Engenharia Mecânica (2009) e Doutorado em Engenharia Mecânica com área de concentração em Aeronaves pela Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - EESC/USP (2014). É Professor Efetivo no eixo de Controle e Processos Industriais do Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho desde 2010. E-mail: ricardo.breganon@ifpr.edu.br
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8203-8699>

U. N. L. T. ALVES

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro de Ensino Superior de Maringá (2011), Formação Pedagógica para a Docência na Educação Básica - Matemática pela Faculdade Educacional da Lapa (2019), Mestrado (2014) e Doutorado (2017) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP campus Ilha Solteira. Atualmente é professor no eixo de Controle e Processos Industriais do Instituto Federal do Paraná - IFPR, campus Jacarezinho. Atua principalmente nos seguintes temas: Controle Robusto, Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs), Controle com Estrutura Variável e Modos Deslizantes (CEV/MD), Sistemas Não Lineares Descritos por Modelos Fuzzy Takagi-Sugeno, Controle Sujeito à Restrições de Sistemas Lineares e Não Lineares. E-mail: wiliam.alves@ifpr.edu.br
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5820-9275>

F. S. F. RIBEIRO

Estudante do Programa de Pós-Graduação (Doutorado) em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho FEB/UNESP, campus Bauru - SP. Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho FEB/UNESP, campus Bauru - SP (2019). Formado em Engenharia Mecânica pela Universidade Paulista - UNIP, campus Assis - SP (2016). Possui formação de Técnico em Mecânica pelo Centro Paula Souza - ETEC Jacinto Ferreira de Sá, Ourinhos - SP. (2011). Atualmente, é servidor público, atuando como Técnico de Laboratório em Mecânica no Instituto Federal do Paraná, campus Jacarezinho - PR. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em processos de fabricação, manutenção mecânica e desenho técnico. E-mail: fernando.ribeiro@ifpr.edu.br
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9776-4482>

G. V. BARBARA

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2018), especialização em Engenharia Industrial 4.0 pela Universidade do Norte do Paraná (2020). Atualmente é técnico de laboratório do Instituto Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Engenharia Elétrica. E-mail: gustavo.barbara@ifpr.edu.br
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9853-5019>

J. P. L. S. ALMEIDA

Possui graduação em Tecnologia em Automação Industrial (2011), Mestrado em Engenharia Elétrica (2014), ambos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Cornélio Procópio, PR (UTFPR-CP) e Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (2019), pela UTFPR - Campus Curitiba. Atua como docente no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná - IFPR, Campus Jacarezinho. Tem experiência nas áreas de sistemas multirrobô, sistemas inteligentes e sistemas de controle. E-mail: joao.almeida@ifpr.edu.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6507-8410>

L. E. PIVOVAR

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná(2015), graduação em Física pela Universidade Federal do Paraná(2009) e especialização em Pós Graduação Lato Sensu em Metodologia do Ensino da Física e da Matemática pela Faculdade de Educação São Luís(2016). Atualmente é Professor Efetivo do Instituto Federal do Paraná. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Engenharia Mecânica. E-mail: luiz.pivovar@ifpr.edu.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9511-1832>

M. A. F. MONTEZUMA

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (1992), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (2003) e doutorado em Engenharia Mecânica com área de concentração em aeronaves pela Universidade de São Paulo (2010). É professor efetivo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná desde 1995. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Controle de Sistemas Dinâmicos de forma experimental, atuando nos seguintes temas: a) Sistemas de Controle Multivariáveis, Plataforma de Stewart, Sistema de Controle Seguidor. b) Identificação experimental de Características Inerciais como Momentos Principais de Inercia de Corpos Rígidos Não-homogêneos. c) Sistemas Embarcados utilizando Microcontrolador de 32 bits e DSP. d) Instrumentação de Sistemas Mecânicos e Controle em Tempo Real utilizando a técnica hardware-in-the-loop. E-mail: marcio.f.montezuma@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2072-3591>

M. MENDONÇA

Possui graduação em Engenharia Eletrônica - Universidade de Lins (1993), especialização em gerenciamento de software IME (instituto Militar de Engenharia-RJ)/FIL (Faculdade de informática de Lins(1995), especialização em engenharia de segurança Universidade Tecnológica Federal do Parana - Câmpus Cornélio Procópio (2018). Mestrado em Engenharia Industrial pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2011). Pós Doutor em Inteligencia Artificial pela Utfpr (2016). Atualmente é professor na area tecnologica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná . Tem grande experiência em pesquisa na área de Engenharia Elétrica, de forma especifica em robotica e controle avançado. Atuando principalmente nos seguintes temas: mapas cognitivos fuzzy, lógica fuzzy, redes neurais artificiais, visão robótica, controle inteligente, navegação autônoma e robótica de enxame. E-mail: mendonca@utfpr.edu.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7203-9241>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: FREDERICO FAGUNDES E MARCOS ROBERTO BOMBACINI



