

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DIDÁTICOS DE PÊNDULO INVERTIDO PARA PRÁTICAS DE ENSINO NO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Resumo: Os cursos de engenharia possuem grande carga horária de estudos teóricos. Neste sentido, o uso de bancadas/equipamentos didáticos para a realização de experimentos são uma ferramenta chave no processo de ensino/aprendizagem, permitindo que os alunos percebam a utilidade prática dos conteúdos estudados. Esta visão também se aplica aos conteúdos relacionados a controle de sistemas dinâmicos, muito presentes em cursos de engenharia de controle e automação. Neste sentido, é frequente o desenvolvimento de bancadas didáticas para a realização de experimentos em aulas relacionadas ao estudo de sistemas de controle. Assim, este artigo relata o desenvolvimento de dois sistemas de pêndulo invertido, um aeropêndulo e um pêndulo de Furuta (também conhecido como pêndulo invertido rotacional), com objetivos didáticos. Como pode ser observado na literatura, os sistemas de pêndulo invertido apresentam características desafiadoras ao projeto de controladores e podem ser utilizados como experimento padrão na comparação de diferentes leis de controle. Deste modo, os sistemas em desenvolvimento se apresentam como ferramentas valiosas no ensino de conteúdos relacionados ao controle de sistemas. Espera-se ao final do desenvolvimento dos protótipos que eles sejam utilizados como ferramenta pedagógicas para o ensino de controle e automação, a partir do desenvolvimento de roteiros de laboratórios em diferentes componentes curriculares, como Sistemas de Controle I e II, Sistemas Realimentados, Controle Multivariável e Controle Não Linear.

Palavras-chave: Ferramenta Pedagógica. Bancada Didática. Aeropêndulo. Pêndulo de Furuta.

1 INTRODUÇÃO

O curso de engenharia de controle e automação integra conhecimentos de diferentes áreas na formação de profissionais habilitados a construir e atuar na manutenção de equipamentos e/ou processos automatizados, apresentando característica interdisciplinar como apontado em Lopes *et al.* (2018). Uma grande parte deste curso é devotada ao estudo de sistemas de controle. Embora seja imprescindível a utilização de análises matemáticas e de simulações, o estudo de leis de controle é incompleto sem a possibilidade de implementação destas em sistemas reais. Neste sentido, a utilização de bancadas didáticas e protótipos em aulas práticas é essencial à aprendizagem significativa dos estudantes.

Segundo Lunetta (1991), as aulas práticas podem ajudar no desenvolvimento de conceitos científicos, além de permitir que os estudantes aprendam como abordar objetivamente o seu mundo e como desenvolver soluções para problemas complexos. Além disso, as aulas práticas servem de estratégia e podem auxiliar o professor a retomar um assunto já abordado, construindo com seus alunos uma nova visão sobre um mesmo tema. Quando compreende um conteúdo trabalhado em sala de aula, o aluno amplia sua reflexão sobre os fenômenos que acontecem à sua volta e isso pode gerar, consequentemente, discussões durante as aulas fazendo com que os alunos, além de exporem suas ideias, aprendam a respeitar as opiniões de seus colegas. De acordo com Pekelman e Mello (2004), para que isso seja possível, as instituições de ensino devem proporcionar aos acadêmicos a oportunidade de interagir, na prática, com os temas que estão sendo estudados em sala de aula.

O desenvolvimento de protótipos de sistemas didáticos que possibilitem o estudo de técnicas de controle pode resultar em benefícios para a apresentação de temas presentes num curso de controle (CAMPO, 2007; BALCHEN *et al.*, 1981). Afinal, com experiências em laboratório os alunos percebem a utilidade prática dos conceitos tratados nas aulas teóricas, muitas vezes abordados de maneira abstrata, sendo muito importantes no processo de ensino/aprendizagem de conceitos de controle automático (PADULA e VISIOLI, 2013). Ademais, o uso de experimentos em laboratório reproduz situações práticas do mundo real nas quais encontram-se incertezas nos parâmetros, sinais medidos com ruídos, entre outros obstáculos (LEVA, 2003).

Segundo Amorim (2006), bancadas didáticas são ferramentas indispensáveis ao ensino, levando em conta que os conceitos vistos apenas em sala de aula são muitas vezes insuficientes para o aprendizado. Para Giordani *et al.* (2003), bancadas didáticas são ferramentas de auxílio para a realização de experimentos que possibilitam ao professor montar diversos roteiros com a variação de parâmetros e ao mesmo tempo permitir que os alunos verifiquem na prática a teoria vista em aula.

A utilização de equipamentos/bancadas didáticas no ensino de conteúdos relacionados ao controle de sistemas já é encontrada na literatura. Lara *et al.* (2018) relatam 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 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, entre outros trabalhos que podem ser encontrados.

Em especial, os sistemas de pêndulo invertido são comuns em livros didáticos sobre teoria de controle, sendo desafiador seu controle por apresentar dinâmica não linear e ponto de equilíbrio instável (OGATA e SEVERO, 1998), sendo muito popular seu uso como experimento padrão na comparação de desempenho de controladores (BOUBAKER, 2013). O conceito de pêndulo invertido possui diferentes usos, tais como em sistemas de medição, métodos de sintonização Schuler, pêndulos acoplados e para fins de entretenimento (MILA e SUBHA, 2015).

Motivado pelo cenário descrito, neste trabalho relata-se o estágio atual de construção de dois sistemas de pêndulo invertido que serão utilizados em um curso de engenharia de controle e automação: um aeropêndulo e um pêndulo invertido rotacional (ou pêndulo de Furuta).

O aeropêndulo construído é um sistema composto por uma haste acoplada a um eixo rotacional com motores alocados em uma das extremidades, um em contraposição ao outro, de modo a gerar o empuxo necessário para que a haste gire livremente em torno do seu eixo de acoplamento.

O pêndulo de Furuta é um equipamento presente em vários laboratórios de pesquisa em controle e que consiste em um braço acionado por motor que se movimenta em um plano horizontal, no qual é acoplado um segundo braço que se movimenta livremente no plano vertical (CAZZOLATO e PRIME, 2011).

O restante do artigo é dividido como segue. Na Seção 2 são abordadas perspectivas do uso dos módulos em desenvolvimento no ensino de temas relacionados ao estudo de técnicas de controle em um curso de engenharia de controle e automação, referenciando trabalhos que abordam diferentes técnicas de controles aplicadas a estes módulos. Na Seção 3 são descritas as etapas de construção executadas até o momento com relação aos dois sistemas, sendo

detalhadas as estruturas projetadas. Na Seção 4 são descritas as conclusões e expectativas para a continuidade do trabalho.

2 PERSPECTIVAS DE ENSINO COM OS PROTÓTIPOS APRESENTADOS

O trabalho descrito neste artigo tem por objetivo desenvolver um conjunto de experimentos em dois sistemas de pêndulo invertido, um sistema aeropêndulo e um sistema de pêndulo invertido rotacional, para ensino/pesquisa de diferentes técnicas de controle com vistas à formação de recursos humanos na área de controle e automação.

O objetivo é trabalhar os conteúdos que tratam de modelagem, identificação e análise de sistemas dinâmicos, funções de transferência, estabilidade, projeto de controladores, e processamento dos sinais. A literatura exemplifica a utilização dos sistemas em desenvolvimento no estudo de diferentes técnicas de controle, podendo ser utilizada como base no desenvolvimento de roteiros de experimentos com estas bancadas.

Com relação ao sistema aeropêndulo, Job e Jose (2015) apresentaram a implementação em sistema aeropêndulo de um controlador PID, um controlador LQR e um controlador PID baseado em LQR, por fim, mostraram a comparação entre os três controladores. Um controlador PID clássico e um controlador Fuzzy PID foi utilizado por Taskin (2017) para o controle de posição angular de um aeropêndulo, resultados com e sem distúrbios externos mostraram a eficiência do controlador aplicado. Habib *et al.* (2013) apresentaram um controlador act-and-wait, derivado de um controlador proporcional simples, com realimentação em malha fechada, para controle de posição do pêndulo, aplicado em um sistema aeropêndulo, modelado como um sistema de primeira ordem.

Ghanbari *et al.* (2018) apresentaram um controlador contínuo para sistemas de dados amostrados e sugeriu 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 comparou os resultados de simulação com os resultados experimentais do sistema. Gültekin e Taşcioğlu (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.

Por outro lado, o pêndulo de Furuta é um experimento padrão utilizado em testes de controladores frequentemente empregado na literatura (BOUBAKER, 2013). Rigatos *et al.* (2017) utilizaram este sistema para testar uma nova estratégia de controle não linear com norma H_{∞} . Wadi *et al.* (2018) projetaram uma estratégia de controle com modos deslizantes considerando distúrbios externos em um pêndulo de 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.

Visto isso, os protótipos em desenvolvimento se apresentam flexíveis para se trabalhar com diferentes conceitos ligados ao estudo das técnicas de controle apresentadas nos cursos de engenharia, sendo adequados para compor os laboratórios destes cursos.

3 CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

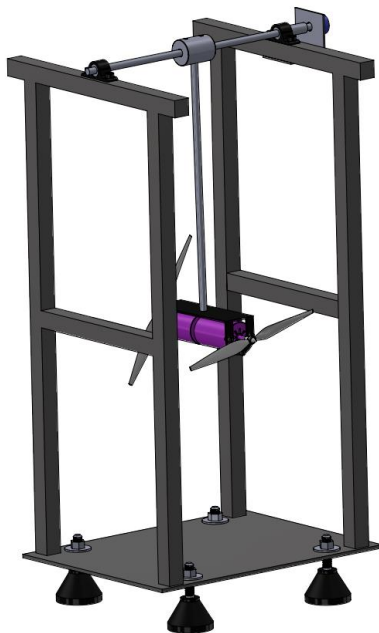
O primeiro equipamento proposto é denominado de sistema aeropêndulo, composto por um conjunto de dois motores brushless/hélices em configuração oposta, fixados na mesma extremidade de uma haste, com a finalidade de realizar o controle de posição de um pêndulo invertido.

Na Figura 1 (a) é apresentado o desenho em três dimensões do projeto do aeropêndulo produzido, que serviu como referência para a montagem e desenvolvimento do protótipo final

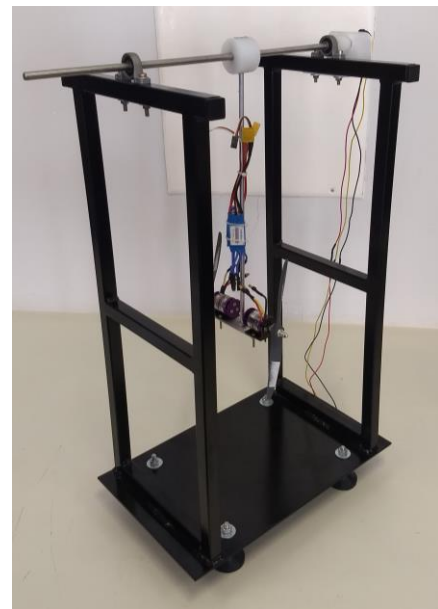
(Figura 1 (b)), objeto de estudo desse trabalho. Esse protótipo servirá como ferramenta de ensino para o desenvolvimento de modelos matemáticos e para a aplicação de técnicas de controle.

Após o projeto do controlador, este será implementado via software, em tempo real, através de uma placa controladora. Para o funcionamento da planta experimental, será enviado um sinal de entrada de posição do pêndulo para a posição da haste, tendo como atuação o empuxo das hélices pelo acionamento dos motores. O sistema será realimentado através de um sinal vindo de um potenciômetro instalado no eixo de giro do sistema, e a maneira com a qual o pêndulo atingir a posição desejada, ou seja, como o erro tender a zero, servirá como índice de desempenho para se medir a eficiência dos controladores utilizados. Com isso será possível mostrar na prática como funciona uma ação de controle em sistemas físicos reais, melhorando o entendimento dos estudantes de engenharia sobre o tema.

Figura 1 – Aeropêndulo. (a) Projeto. (b) Protótipo.



(a)

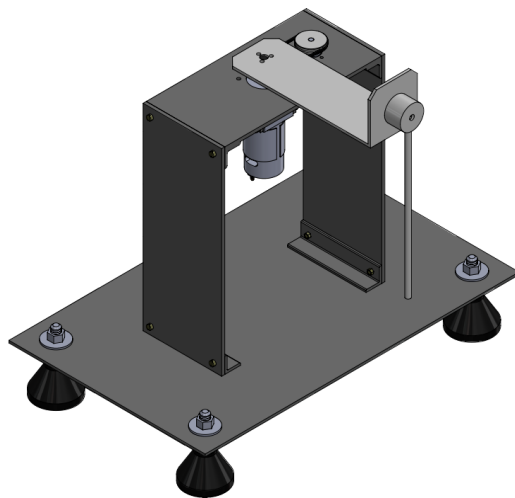


(b)

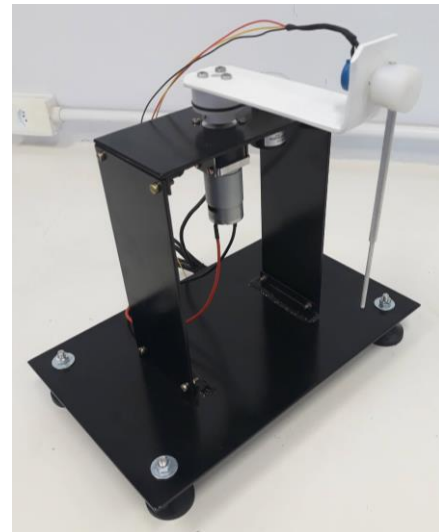
Fonte: autoria própria.

O segundo equipamento produzido é denominado de pêndulo de Furuta, sendo apresentado na Figura 2. Ele é composto por um motor elétrico de corrente contínua, com um sistema rotativo e um pêndulo instalando na sua extremidade. Quando o eixo do motor gira, impulsiona o pêndulo na posição vertical superior, sistema no qual a eficiência dos controladores desenvolvidos pelos alunos em sala de aula pode ser verificada através de testes.

Figura 2 – Pêndulo de Furuta. (a) Projeto. (b) Protótipo.



(a)



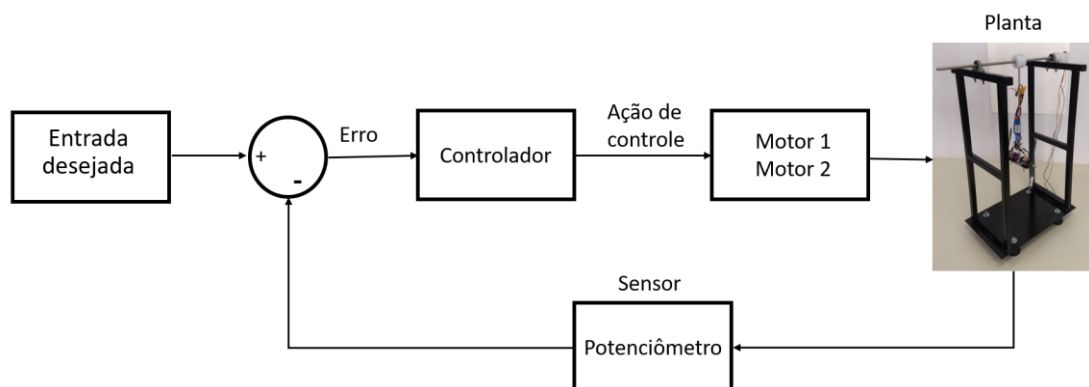
(b)

Fonte: autoria própria.

Assim como no primeiro sistema, antes de efetuar a montagem, foi realizado um projeto tridimensional do conjunto (Figura 2 (a)). Para executar o equilíbrio do pêndulo na posição vertical, um motor DC é acionado por um sinal de tensão variando de -12V a 12V na ação de controle, até a posição desejada. O sinal da posição desejada será adquirido através de um potenciômetro fixado na base da haste do pêndulo e o sinal da posição do conjunto será obtido através de um encoder instalado por um sistema de polias e correia na base do motor. A Figura 2 (b) apresenta o protótipo construído, que será utilizado em atividades em sala de aula.

Como ferramenta pedagógica no ensino de técnicas de controle para a engenharia, pode-se observar na Figura 3 um diagrama de blocos do sistema aeropêndulo, mostrando a representação da planta em conjunto com um controlador. Observe que o controlador é responsável por comandar os dois motores acoplados em uma extremidade da haste, e que isto é feito com base no erro entre o ângulo desejado para o pêndulo e o ângulo atual deste.

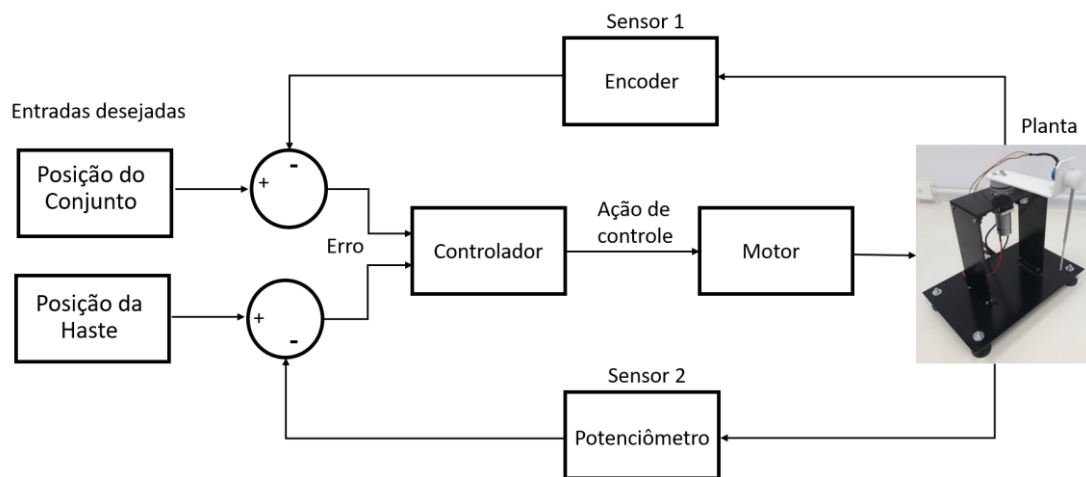
Figura 3 – Diagrama de blocos do sistema do Aeropêndulo.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 4 é apresentado um diagrama de blocos do sistema de pêndulo invertido rotacional. Neste sistema objetiva-se controlar a posição da haste em um ângulo de 90° com a horizontal, além da posição angular do conjunto. Portanto, o controle considerará o erro entre o valor desejado para essas duas variáveis e o valor real delas, para gerar o sinal de controle e acionar o motor.

Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema do Pêndulo de Furuta.



Fonte: autoria própria.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo descreveu-se o desenvolvimento de dois sistemas de pêndulo invertido, um aeropêndulo e um pêndulo de Furuta, que serão futuramente utilizados no ensino de conteúdos ligados a técnicas de controle em um curso de engenharia de controle e automação. Como apresentado no decorrer do trabalho, a utilização de bancadas/equipamentos didáticos no ensino é de grande valia, possibilitando que os alunos verifiquem na prática os conceitos estudados em sala de aula. Em especial, os sistemas de pêndulo são bastante utilizados em laboratórios de ensino/pesquisa em controle, como pode ser verificado na vasta literatura encontrada sobre esses sistemas. Na continuação da pesquisa espera-se finalizar o desenvolvimento dos módulos e criar roteiros de laboratório de modo que os estudantes os utilizem em componentes curriculares ligados ao controle de sistemas dinâmicos.

REFERÊNCIAS

AMORIM, M. J. **Desenvolvimento de Bancada Didático-Experimental de Baixo Custo para Aplicações em Controle Ativo de Vibrações**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BALCHEN, J. G.; HANDLYKKEN, M.; TYSSO, A. The need for better laboratory experiments in control engineering education. *In: IFAC Control Science and Technology*, v. 14, n. 2, p. 3363-3368, 1981.

BOUBAKER, Olfa. The inverted pendulum benchmark in nonlinear control theory: a survey. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 10, n. 5, p. 233, 2013.

CAMPO, A. B. Projeto e simulação de um controlador digital para um sistema aeroestabilizador. **Integração**, São Paulo. v. 48, p. 61-65, 2007.

CAZZOLATO, Benjamin Seth; PRIME, Zebb. On the dynamics of the Furuta pendulum. **Journal of Control Science and Engineering**, v. 2011, p. 3, 2011.

GAO, Zhen *et al.* Design and implementation a ball balancing system for control theory course. **International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology**, v. 5, n. 11, p. 2363-2374, 2015.

GIORDANI, R. E; JURACH, P. J; RODRIGUES, M. J. **Bancada didática de pneumática**. CEFET. Rio Grande do Sul, 2003.

GHANBARI, Milad; BAHRAINI, Masoud; YAZDANPANA, Mohammad Javad. Continuous control of sampled data systems with robustness against bounded measurement errors. **Transactions of the Institute of Measurement and Control**, v. 40, n. 10, p. 3125-3133, 2018.

GÜLTEKIN, Y.; TAŞCIOĞLU, Y. Pendulum Positioning System Actuated by Dual Motorized Propellers. In: **6th International Advanced Technologies Symposium**. 2011. p. 6-9.

HABIB, Giuseppe *et al.* Experimental validation of the act-and-wait control concept through the aeropendulum. In: 11th International Conference on Vibration Problems, 2013, Lisboa. **Proceeding** [...]. Lisboa, 2013.

JOB, Mila Mary; JOSE, P. Subha Hency. Modeling and control of mechatronic aeropendulum. In: **2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIECS)**. IEEE, 2015. p. 1-5.

LARA, Vanessa *et al.* Design and development of a flexible control laboratory plant for educational purposes. In: **2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

LEVA, Alberto. A hands-on experimental laboratory for undergraduate courses in automatic control. **IEEE Transactions on Education**, v. 46, n. 2, p. 263-272, 2003.

LOPES, João Victor Bonella; JÚNIOR, Dirceu Soares; MUNARETO, Saul da Silva. Um projeto com abordagem multidisciplinar na formação do profissional de engenharia de controle e automação. In: XLVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2018, Salvador. **Anais** [...]. Salvador, 2018.

LUNETTA, V. N. Atividades práticas no ensino da Ciência. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 2, n. 1, p. 81-90, 1991.

MADRID, J. L. D.; QUERUBÍN, E. A. G.; OSPINA-HENAO, P. A. Predictive control of a Furuta pendulum. In: Colombian Conference on Automation Control (CCAC), 2017, Cartagena. **Proceedings** [...]. Cartagena, 2017.

MILA, Mary Job; SUBHA, Hency Jose P. Modeling and Control of Mechatronic Aeropendulum, *In: ICIECS'15 International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems*, 2015, Coimbatore. **Proceedings** [...]. Coimbatore, 2015.

OGATA, Katsuhiko; SEVERO, Bernardo. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall do Brasil, 1998.

PADULA, Fabrizio; VISIOLI, Antonio. An approach for teaching automatic control in a laboratory of mechatronics. *In: 10th IFAC Symposium Advances in Control Education*, v. 46, n. 17, p. 214-219, 2013.

PEKELMAN, H.; MELLO JR, A. G. A Importância dos Laboratórios no Ensino da Engenharia Mecânica. *In: XXXII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 2004, Brasília. **Anais** [...]. Brasília, 2004.

RIGATOS, Gerasimos *et al.* Nonlinear H-infinity control for the rotary pendulum. *In: 2017 11th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*. IEEE, 2017. p. 217-222.

SILVEIRA, Alessandro dos Santos; MACHADO, Everton; DE SOUZA, João Artur. Construction of a lowcost didactic bench for teaching control systems. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 1, p. 133-144, 2018.

TASKIN, Yener. Fuzzy PID controller for propeller pendulum. **Istanbul University – Journal of Electrical and Electronics Engineering**, v. 17, n. 1, p. 3175-3180, 2017.

WADI, Ali; LEE, Jin-Hyuk; ROMDHANE, Lotfi. Nonlinear sliding mode control of the Furuta pendulum. *In: 2018 11th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)*. IEEE, 2018. p. 1-5.

DEVELOPMENT OF INVERTED PENDULUM DIDACTIC PROTOTYPES FOR TEACHING PRACTICES IN THE CONTROL AND AUTOMATION ENGINEERING GRADUATION COURSE

Abstract: *Engineering graduation courses have a great deal of theoretical study time. In this sense, the use of didactic equipment/benches to perform experiments can be a crucial tool in the teaching/learning process, allowing the students to notice the practical use of the studied themes. This point of view also applies to contents related to control systems theory, very present in control and automation engineering. In this sense, it is frequent to develop didactic benches aiming to perform experiments in classes related to the study of control systems. Thus, this paper reports the development of two inverted pendulum systems, an aeropendulum and a Furuta pendulum (also known as rotational inverted pendulum), with didactic purposes. As can be seen in the literature, the inverted pendulum systems have challenging features to design controllers and they can be used as benchmarks for comparing different control laws. In this way, the systems in development are valuable tools in the teaching of control systems issues. It is expected at the end of the development of the prototypes that they can be used as pedagogical tools for teaching control and automation topics, from the development of scripts in different curricular components such as Control Systems I and II, Feedback Systems, Multivariate Control and Nonlinear Control.*

Key-words: *Pedagogical Tool. Didactic Bench. Aeropendulum. Furuta Pendulum.*