



DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO PÊNDULO AMORTECIDO COMO FERRAMENTA PARA ENSINO EM DISCIPLINAS DE ENGENHARIA DE CONTROLE

Rejane de Barros Araújo – rejane.barros@ifpa.edu.br

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém
Avenida Almirante Barroso, 1155
66093-020 – Belém – Pará*

Domingos Charles Favacho Pereira – kelleaczaediana@hotmail.com

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém
Avenida Almirante Barroso, 1155
66093-020 – Belém – Pará*

Antônio Arcádio de Sousa – fotoimagemiso@gmail.com

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém
Avenida Almirante Barroso, 1155
66093-020 – Belém – Pará*

João Marcos Aires dos Santos – jma.santos1980@gmail.com

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém
Avenida Almirante Barroso, 1155
66093-020 – Belém – Pará*

Resumo: *Este artigo apresenta o desenvolvimento do projeto de um processo Pêndulo Amortecido (PAM), para ser utilizado como um kit didático para ensino em diferentes disciplinas, tais como: controle de processos, controle adaptativo, identificação de sistemas dinâmicos entre outras. Adicionalmente, o kit didático proposto, tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de ensino de baixo custo, fácil manutenção, modular, intuitiva e também de característica prática, podendo ser utilizado para ensino em disciplinas teóricas e/ou de laboratórios e também em pesquisa nos Cursos Técnico em Eletrônica e/ou Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação.*

Palavras-chave: *Pêndulo amortecido. Controle de processos. Eletrônica aplicada. Ensino em sistemas de controle. Controle digital*

1 INTRODUÇÃO

As práticas em laboratório são fundamentais na formação de profissionais de cursos técnicos e de engenharia, pois estas motivam os alunos e proporcionam um melhor entendimento dos conteúdos teóricos vistos em sala de aula. Segundo BERNSTEIN (1999), a educação deve ser um misto entre as partes prática e teórica, e o aprendizado é sempre melhorado pela prática direta, com exemplos concretos e de relevância no texto industrial real.

Assim sendo, no desenvolvimento da competência humana, a questão fundamental é tornar os laboratórios de ensino e pesquisa, um ambiente didático constante de ensino e aprendizagem, tornando as práticas mais frequentes, com soluções educacionais e

tecnológicas simples, moderna e de baixo custo. A relação teoria e prática exige uma renovação constante das ferramentas de ensino nos laboratórios (DEMO, 1998). Entretanto, um melhor compromisso do ensino com a experimentação de natureza prática, exige em muitos casos, uma grande infraestrutura de suporte material e tecnológico, tornando-se esta questão um ponto limitante, na maioria das instituições públicas de ensino, devido à escassez de recursos.

Destaca-se assim, um problema pedagógico central subjacente à educação em cursos técnicos e de engenharia: estabelecer a interdependência adequada e a ponderação correta entre a base teórica e prática. (FEISEL, 2005; KHEIR et al., 1996). Portanto, nota-se que as práticas laboratoriais na educação nos cursos técnicos e de engenharia, ultrapassam o caráter de uma atividade complementar ao processo de aprendizagem, assumindo um papel de protagonista, possibilitando um adequado compromisso entre teoria e prática. Por fim, o uso continuado das práticas em laboratório, associado ao desenvolvimento de novos equipamentos, materiais e aparatos de laboratório para ensino nos cursos técnicos e de engenharia, é um elemento imprescindível à formação de profissionais qualificados.

Para o desenvolvimento de um laboratório moderno, simples, de baixo custo e que atenda as necessidades dos cursos na área tecnológica, é importante que os processos industriais sejam reproduzidos em escalas menores, para serem utilizados nos laboratórios de ensino e pesquisa, pois assim o aluno terá contato com uma variedade de problemas relevantes encontrados no contexto industrial real, oportunizando assim o aluno em analisar e propor soluções em um cenário prático, no qual ele pode encontrar, chegando ao mercado de trabalho (Araújo, 2015).

A maioria das instituições públicas de ensino possuem dificuldades de recursos para equipar seus laboratórios, sobretudo quando estes laboratórios exigem equipamentos específicos, como é o caso, por exemplo, dos laboratórios dos cursos técnicos em eletrônica, eletrotécnica, mecânica, engenharias entre outros, que necessitam, em muitos casos, de equipamentos com custos elevados e de difícil manutenção. Portanto, adquirir e manter esses equipamentos vêm tornando-se quase que "inviável", devido à escassez de recursos, sendo essa realidade encontrada de norte a sul do país, dificultando aos professores e principalmente aos alunos, relacionarem o conteúdo teórico com experimentos práticos. Essa relação contínua entre teoria e prática, auxilia o aluno a consolidar com maior facilidade e rapidez os conceitos teóricos apresentados em sala de aula e, ao mesmo tempo desenvolve habilidades práticas que refletem o cenário industrial real.

A partir das informações apresentadas e da problemática abordada, o desenvolvimento do projeto do processo Pêndulo Amortecido (PAM), descrito neste artigo, surgiu da necessidade de se construir kits didáticos, na forma de protótipos, para serem utilizados no Laboratório de Controle de Processos Industriais (LACOPI) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus Belém. O LACOPI atende aos cursos técnico em eletrônica e engenharia de controle e automação, e é de fundamental importância para o ensino nas seguintes disciplinas: eletrônica aplicada, controle de processos, identificação de sistemas dinâmicos, engenharia de controle I e II, controle adaptativo entre outras.

O protótipo PAM, desenvolvido para ensino e pesquisa, possui como principais características a fácil implementação, o baixo custo na sua montagem e manutenção, e uma maior flexibilidade para permitir a realização de diversos experimentos com diferentes objetivos e aplicabilidade. Sendo assim, o protótipo é visto como uma contribuição alternativa de baixo custo, com o intuito de tentar suprir a necessidade de equipar e modernizar os laboratórios de instituições de ensino tecnológico.

Adicionalmente, é importante dizer que a motivação em desenvolver kits didáticos de baixo custo, surgiu depois da experiência de uma professora do IFPA Campus Belém em



ministrar a disciplina Eletrônica Aplicada ao curso técnico em eletrônica. A professora observou que os alunos dessa disciplina se mostraram bastante motivados ao desenvolverem projetos práticos de montagem de circuitos eletrônicos em placas de circuito impresso, chegando a um produto acabado, fazendo testes e validações. Portanto, a professora decidiu escrever projetos de fluxo contínuo para o desenvolvimento de protótipos de diferentes naturezas para ensino em engenharia.

Ressalta-se também que o protótipo PAM foi desenvolvido por alunos do curso técnico em eletrônica, onde o projeto serviu de estágio curricular aos alunos envolvidos no projeto, que já se encontravam no último semestre do curso técnico em eletrônica, necessitando de 240h de estágio curricular para a integralização do curso. Portanto, o estágio teve uma avaliação positiva, tanto para os alunos como para a professora coordenadora do projeto.

Finalmente, o objetivo do artigo é apresentar o desenvolvimento do protótipo do PAM, como ferramenta para ensino em sistemas de controle, oferecendo ao LACOPI do IFPA Campus Belém, um kit didático de baixo custo para ensino e pesquisa.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do projeto. A seção 3 descreve o desenvolvimento do processo pêndulo amortecido. A seção 4 aborda dos resultados alcançados. Finalmente, conclusões são mostradas na seção 5.

2 METODOLOGIA

No que diz respeito a metodologia seguida no desenvolvimento do processo PAM, fez-se no primeiro momento, uma revisão bibliográfica das obras consideradas relevantes na área, para se fundamentar teoricamente no projeto a ser desenvolvido. A pesquisa assentou-se na extração de informações de livros, revistas especializadas e artigos técnicos, concomitantemente ao desenvolvimento do projeto, fez-se:

a) Estudos dirigidos dos assuntos teóricos envolvidos e necessários para o perfeito cumprimento das atividades propostas (KHEIR et al., 1996; MALVINO,1999; BOYLESTEAD, 2004);

b) Reuniões técnicas com discussão de temas relacionados aos objetivos propostos. Foram realizadas reuniões técnicas quinzenais com o pessoal envolvido no projeto, com o intuito de debater os assuntos relacionados. Nessas reuniões os alunos tiravam dúvidas, propuseram sugestões e receberam orientação quanto ao desenvolvimento do trabalho;

c) Desenvolvimento do circuito eletrônico e a estrutura mecânica do protótipo;

d) Simulação do circuito eletrônico em um *software* específico na área de eletrônica, analisando-se o funcionamento do circuito e medindo-se todos os sinais de corrente e tensão envolvidos no projeto do circuito;

e) Levantamento dos materiais necessários para a montagem e confecção do kit didático;

f) Montagem do circuito eletrônico do protótipo em uma placa de circuito impresso e integração da placa com a parte mecânica, montagem do protótipo;

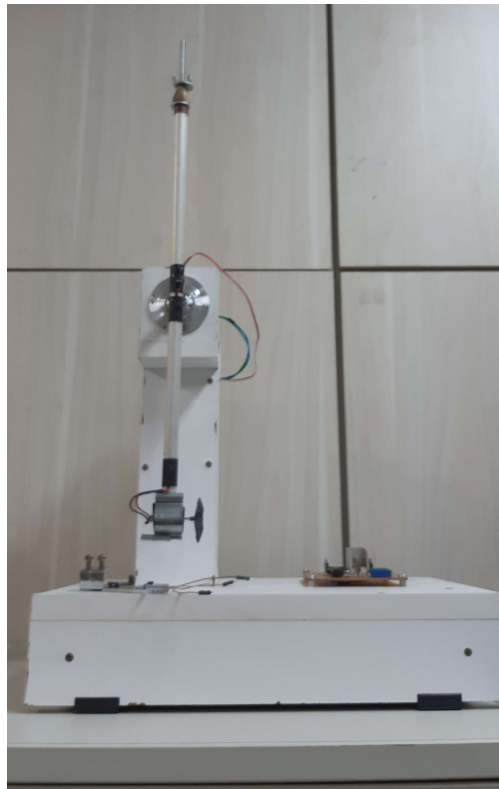
g) Integração do protótipo com a placa de aquisição e o computador, montagem e teste do kit didático;

h) Elaboração de artigo científico.

3 PROJETO PÊNULO AMORTECIDO

O protótipo desenvolvido é denominado de Pêndulo Amortecido (PAM), onde em uma das extremidades de uma barra vertical é acoplado um potenciômetro para medir a posição angular da barra e na outra extremidade existe um motor DC com uma hélice. A ideia do projeto é que no processo PAM, esteja acoplado um motor DC em uma das extremidades da barra vertical, cujo motor é responsável pela posição angular da barra, por meio de sua velocidade. O sinal de entrada do processo é a tensão do motor DC e a saída também é uma tensão, que corresponde à posição angular, isto é, o intuito é controlar a posição da barra para diferentes valores de referência. Na Figura 1 é possível observar a foto do protótipo PAM na sua forma de produto acabado e na Figura 2 o circuito projetado.

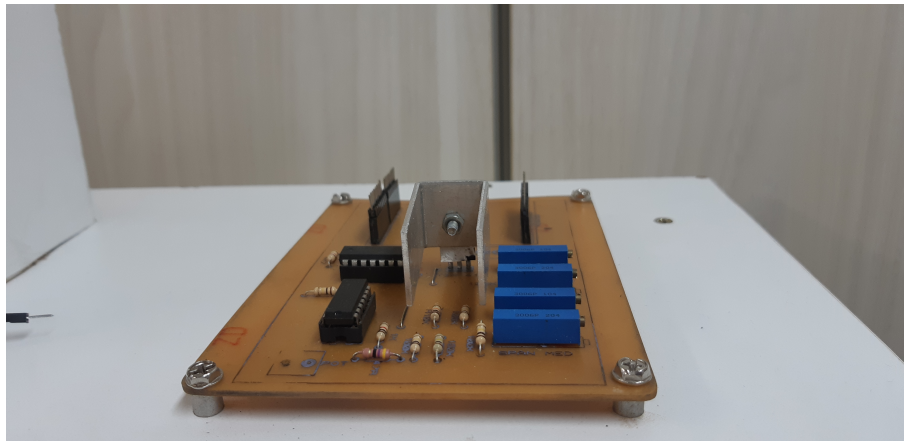
Figura 1 – Protótipo do Pêndulo Amortecido (PAM).



Fonte: Os autores

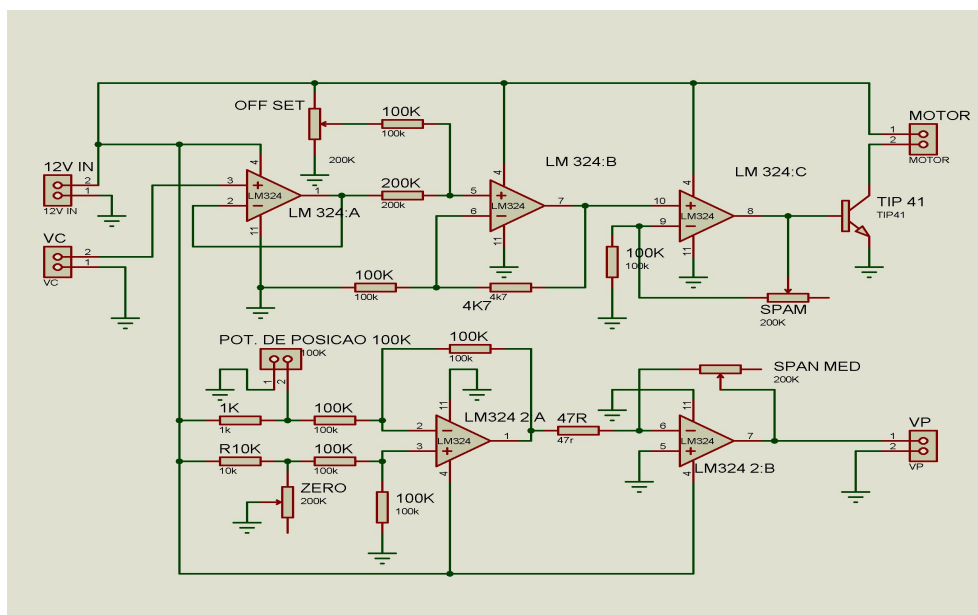
Os circuitos de medição e atuação operam em uma faixa de tensão de 0 a 5 V. O circuito do protótipo é conectado a uma placa de aquisição A/D e D/A, utilizando Arduino, e posteriormente é conectado ao computador para leitura e escrita dos sinais gerados. O sinal de saída representa a posição da haste do pêndulo (leitura do potenciômetro), e esse sinal é tratado pelo circuito de medição. O sinal de controle representa a atuação do motor, isto é, a velocidade com que o motor DC irá girar, e esse sinal é tratado pelo circuito de atuação. Na Figura 3 tem-se o esquemático eletrônico dos circuitos de mediação e atuação desenvolvidos no projeto.

Figura 2 – Circuito do Pêndulo Amortecido (PAM).



Fonte: Os autores

Figura 3 – Circuito eletrônico de acionamento e medição do PAM.



Fonte: Os autores

A parte mecânica é construída em madeira, acoplada a um rolamento de um aparelho de videocassete. Para a ligação entre o eixo e o potenciômetro que determina o ângulo da haste do pêndulo, é utilizada uma mangueira de combustível automotivo, por ser um material bastante resistente, flexível e que melhor atendeu as necessidades do projeto. O circuito eletrônico é projetado, simulado e construído sem muitas dificuldades, pois os conhecimentos necessários para a construção do circuito, já tinham sido explorados pelos discentes. Na parte eletrônica utiliza-se um motor DC de 5 V, retirado de um leitor de DVD de um computador. Utiliza-se também uma fonte de impressora 12V/5ª PWM, devido o circuito eletrônico necessitar de boa estabilidade de energia elétrica. Por fim, utiliza-se uma hélice profissional, comprada em uma loja especializada em revenda de drones (MARKUS, 2000).

É importante ressaltar que os materiais (componentes eletrônicos entre outros) que foram utilizados no desenvolvimento do projeto PAM, são de baixo custo e, alguns desses materiais foram fornecidos pelo projeto **Reestruturação do laboratório de protótipos e reaproveitamento de material eletroeletrônico**, existente no IFPA Campus Belém.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Com o desenvolvimento e conclusão do protótipo PAM, alcançou-se os seguintes resultados.

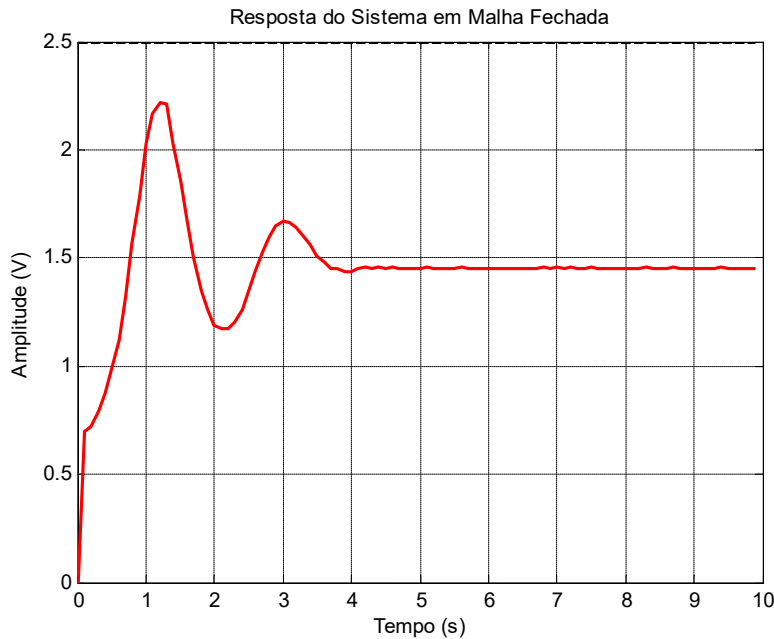
- a) Os alunos envolvidos no projeto do protótipo PAM se sentiram mais seguros no desenvolvimento de equipamentos eletrônico, aumentando-se assim o nível de conhecimento desses alunos, desenvolvendo também habilidades em pesquisas científicas, por meio do cumprimento das atividades propostas no projeto.
- b) Os alunos puderam adquirir um melhor entendimento dos conceitos de controle de processos, circuito impresso e eletrônica analógica e digital em aplicações práticas.
- c) O processo acabado do PAM em nível de protótipo, isto é, entregaram um produto finalizado e que já está sendo utilizado no ensino em disciplinas da área da engenharia e eletrônica.
- d) Sistema completo conectando o protótipo PAM ao microcomputador (algoritmos de identificação e controle), tendo como interface de comunicação o dispositivo eletrônico Arduino.
- e) Algoritmo para leitura do sinal de saída em malha aberta do processo PAM.
- f) Algoritmo de controle para gerar o sinal de controle que é aplicado ao processo PAM e leitura do sinal de saída em malha aberta do processo.

O projeto teve como resultado um protótipo de um PAM, que já está sendo utilizado nas aulas dos cursos técnico em eletrônica e bacharelado em engenharia de controle e automação. O protótipo PAM serve como uma ferramenta alternativa para aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de identificação de sistemas dinâmicos e controle de processos. Como já foi citado anteriormente, o protótipo PAM é construído em madeira, com uma haste presa a um sistema mecânico e acoplado a um circuito eletrônico para o acionamento e medição dos atuadores e sensores, respectivamente, conforme observa-se nas Figuras 1 e 3. Considera-se o protótipo PAM uma positiva contribuição ao ensino dos cursos técnicos em eletrônica e engenharia do IFPA Campus Belém.

Nas Figuras 4 e 5, observa-se os gráficos dos sinais de entrada e saída obtidos como resultado da experimentação no protótipo pêndulo amortecido.

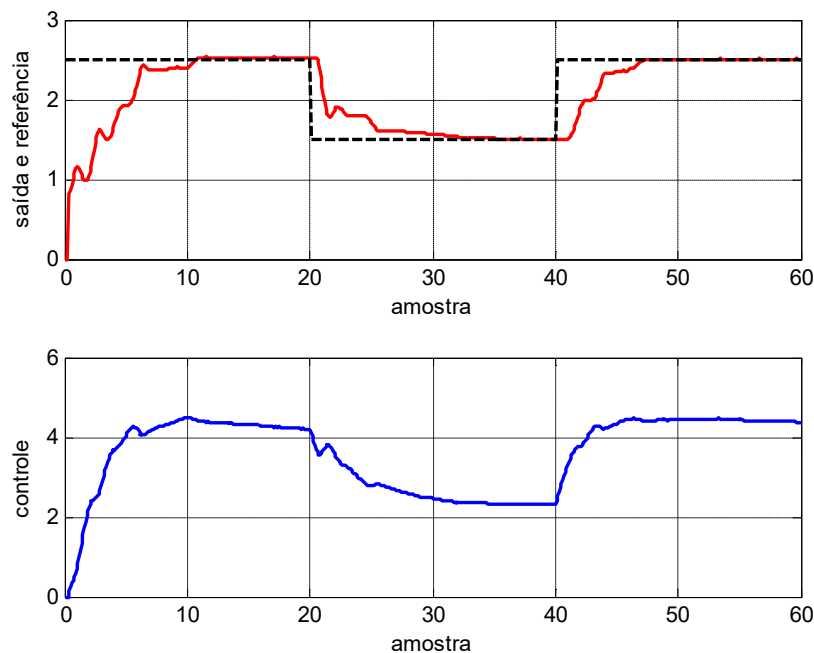
Na Figura 4 é possível observar o sinal de saída de malha aberta do processo PAM. Para obtenção desse sinal, utilizou um *software* de simulação que conecta o computador ao Arduino, sendo este último o dispositivo que faz a interface entre o computador e o processo PAM, convertendo os sinais analógicos em digitais e digitais em analógicos. Um sinal de 1,5 volts é enviado ao Arduino e consequentemente aplicado ao processo PAM, e na saída do processo PAM, por meio da leitura do potenciômetro, é enviado o sinal de saída ao Arduino e consequentemente ao computador. Com o sinal de saída em malha aberta da Figura 4, é possível obter a função de transferência do processo PAM, tanto no tempo contínuo como no tempo discreto, porém não é o foco deste trabalho.

Figura 4 – Gráfico do sinal de saída em malha aberta do processo PAM



Fonte: os autores

Figura 5 – Gráfico dos sinais de saída e controle em malha fechada do processo PAM.



Fonte: ao autores

Na Figura 5 observa-se os sinais de saída e controle do processo PAM em malha fechada, controlado por um controlador Proporcional-Integral (PI), cujo os ganhos são sintonizados por tentativa e erro, sendo o ganho proporcional ($K_c = 1,2$) e o tempo integral ($T_i = 0,1$) (OGATA, 2010). Observa-se na Figura 5, parte superior, que são realizadas 3 mudanças de

referência, e o sinal de saída (linha vermelha) consegue rastrear a referência de forma conservativa. Ainda na Figura 4, parte inferior, observa-se o sinal de controle (linha azul) com um comportamento bastante suave, isso se dar ao fato dos ganhos do controlador PI serem escolhidos para gerar um sinal de controle mais conservativo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo abordou o desenvolvimento de um protótipo denominado Pêndulo Amortecido (PAM) como uma ferramenta alternativa de baixo custo para ensino nos cursos técnicos em eletrônica e engenharia de controle e automação. O processo PAM já está sendo utilizado nas aulas das disciplinas de identificação de sistemas dinâmicos e controle adaptativo, juntamente com um software de simulação e a placa Arduino. O processo tem uma excelente aceitação pelos alunos, observa-se a motivação e o interesse dos alunos em aplicar seus algoritmos de identificação e controle no processo PAM para obtenção de resultados experimentais reais. Acredita-se que a experiência no desenvolvimento do protótipo PAM foi extremamente positiva, tanto para o professor quanto para os alunos e deseja-se construir pelo menos mais umas 4 unidades desse protótipo.

A maior dificuldade encontrada no desenvolvimento do projeto foi a falta de recursos financeiros para a compra de materiais especializados, materiais que não puderam ser reutilizado. Além da dificuldade financeira, encontrou-se dificuldades também na construção da parte mecânica do protótipo, ocasionando várias trocas de rolamento e motor até que se chegasse a um resultado satisfatório.

Por fim, tem-se como objetivo para trabalhos futuros, além da construção de mais alguns pêndulos, o desenvolvimento de outros protótipos como de temperatura, de controle de nível, pêndulo invertido, entre outros.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Rejane de Barros; JERONYMO, Daniel Cavalcante; COELHO, Antonio Augusto Rodrigues; GOMES, Francisco J. **PIPIMC: computational tool for teaching FOPDT model identification and PI-IMC**. IFAC Workshop on internet based control education – IBCE, Brescia. IFAC Workshop on IBCE Proceedings, 2015.

BERNSTEIN, Dennis S. **Enhancing undergraduate control education**. IEEE Control Systems, pp. 40-43, 1999.

DEMO, P. **Educar pela pesquisa**. Campinas: Autores associados, 1998.

FEISEL, Lyle D.; ROSA, Albert J. **The role of the laboratory in the undergraduate engineering education**. Journal of Engineering Education 1, pp. 121–130, 2005.

KHEIR, N. A.; ASTRÖM, K. J.; AUSLANDER, D.; CHEOK, K. C.; FRANKLIN, G. F.; MASTEN, M.; RABINS, M. **Control systems engineering education**. Automatica 32, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.

MALVINO, A. P. **Princípios de eletrônica**. McGraw-Hill, 1999.

MARKUS, O. **Ensino modular: sistemas analógicos - Circuitos com diodos e transistores**. São Paulo. Érica, 2000.

BOYLESTEAD, R. **Dispositivos e Teoria de Circuitos**. Ed. Prentice Hall Brasil, 2004.

DEVELOPMENT OF A DAMPED PENDULUM PROCESS AS A TOOL FOR TEACHING IN CONTROL ENGINEERING

***Abstract:** This paper presents the development of a Damped Pendulum process design to be used as a teaching kit for teaching in different disciplines, such as: process control, adaptive control, dynamic systems identification and others. In addition, the proposed teaching kit aims to develop a low-cost, easy-to-maintain, modular, intuitive and also with practical characteristics, being able to be used for teaching in theoretical and/or laboratory disciplines and also in research in the Technical Course in Electronics and/or in Control and Automation Engineering.*

***Key-words:** damped pendulum, process control, electronics applied, teaching in control systems, digital control.*