

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE BAIXO CUSTO PARA ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Everton Machado – everton@polo.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Trindade
CEP 88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina.

Alexsandro dos Santos Silveira – alex@polo.ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Trindade
CEP 88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina.

João Artur de Souza – jartur@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Trindade
CEP 88040-900 – Florianópolis – Santa Catarina.

Resumo: *Este artigo apresenta a construção de uma bancada didática na área de sistemas de controle objetivando a prática presencial laboratorial. O desenvolvimento do aparato experimental compacto teve como propósito permitir que alunos de cursos como engenharia de controle e automação apliquem seus conhecimentos teóricos na prática. Para tanto, uma revisão na literatura foi realizada e foram analisados trabalhos correlatos que contribuem para o desenvolvimento dessa linha de pesquisa. Em seguida, buscou-se descrever o aparato experimental de forma a detalhar o funcionamento e cada componente utilizado na montagem, entre estes componentes, destaca-se o uso do microcontrolador Arduino e módulo termoeletrico de efeito Peltier. Por fim, um controlador proporcional-integral foi projetado para validação do aparato experimental desenvolvido. Como resultado a bancada didática demonstrou ser capaz de avaliar diferentes tipos de controladores, bem como suas características e especificações inerentes aos requisitos de projetos de controle. A facilidade de montagem, manuseio, operação e o baixo custo de implementação são as principais vantagens da bancada didática. Além disso, a bancada pode ser usada como um projeto integrador unindo diversas áreas do conhecimento como eletrônica, mecatrônica e afins.*

Palavras-chave: *Bancada didática. Ensino de engenharia. Sistema de controle.*

1 INTRODUÇÃO

É notório que as mudanças encontradas nos currículos dos programas de graduação voltados a cursos de engenharia levaram as universidades a buscar soluções inovadoras, afim de aprimorar a formação dos engenheiros. Essas mudanças são decorrentes das alterações propostas na legislação brasileira no ano de 1996, onde foram criadas as diretrizes curriculares que buscam, entre outros fatores, uma forte vinculação entre teoria e prática.

Com esse panorama em voga, esforços estão sendo realizados para encurtar essa distância entre teoria e prática. Para Feisel, (2005) a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios. Entretanto, o autor considera a falta de objetivos de aprendizagem coerentes para os laboratórios e como essa falta limitou a eficácia dos mesmos e dificultou o desenvolvimento de pesquisas significativas na área de engenharia. Estudos voltados a área de controle de processos e análise de eficiência energética foram desenvolvidos de forma a contribuir nesse contexto. A proposta de Gomes *et al.* (2008) visou a implementação de um laboratório integrado que trabalha de forma aberta, atendendo à graduação, cursos de extensão, pós-graduação e possibilitará a realização de intercâmbios estudantis. O laboratório abrange também uma parte conceitual e uma parte prática, desmembrados em quatro módulos. Inicialmente os alunos começam a associar seus conhecimentos teóricos com as atividades práticas, ocorrendo o primeiro contato com *softwares* supervisórios, sensores, controladores e atuadores, componentes presentes em uma planta industrial. Como resultado o autor espera que o trabalho contribua no desenvolvimento de novos conhecimentos, habilidades e atitudes por parte dos alunos e professores da área de engenharia.

Os *softwares* de projeto assistidos por computadores são poderosas ferramentas usadas nos cursos de engenharia para desenvolvimento e simulação de sistemas de controle, porém esses ambientes virtuais geralmente abstraem dificuldades práticas encontradas no momento da implementação. Dessa forma, as bancadas didáticas têm um papel fundamental para formação prática do engenheiro, propiciando ao mesmo o contato físico com equipamentos de precisão, e plataformas abertas de baixo custo como o Arduino. Um estudo de caso proposto por Irigoyen *et al.* (2013) compara as plataformas de baixo custo (LEGO (R) MINDSTORM (R) NXT e Arduino) mais usuais para ensino em sistemas de controle dentro das universidades. O estudo revelou dois critérios para inserção das plataformas, sendo o primeiro voltado a percepção do professor com relação a incluir conteúdos mais didáticos, e o segundo voltado a percepção do aluno em adotar plataforma de baixo custo para uso em sala de aula.

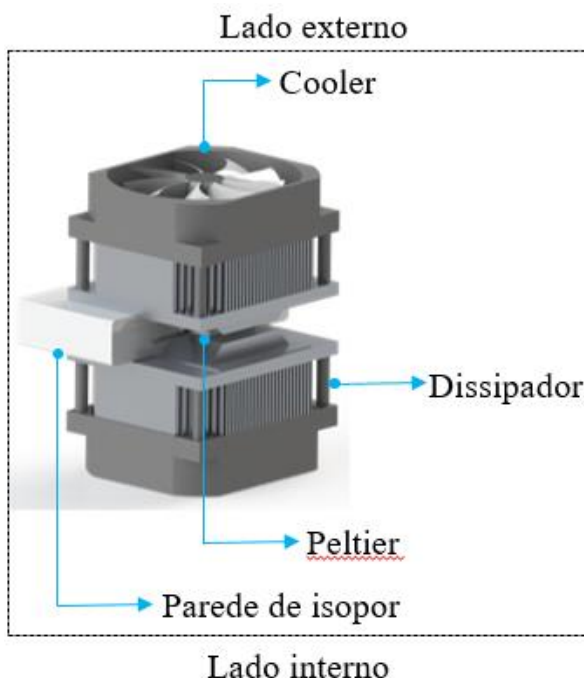
Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática compacta e de baixo custo para ensino de sistemas de controle. Além disso, um controlador PI foi projetado e implementado para validação da bancada. O artigo está estruturado em cinco seções, sendo a primeira esta introdução. A segunda seção aborda a construção da bancada, a terceira sobre sistema de controles e a quarta trata dos resultados experimentais. Na última seção apresentam-se as considerações finais.

2 BANCADA DIDÁTICA

A bancada didática conta com um box de isopor de 30cm de largura por 20cm de comprimento onde a temperatura interna é controlada através de um módulo termoeletrico de efeito Peltier. O módulo possui uma potência nominal de 72W e é alimentado com uma fonte de corrente contínua de 12 volts e corrente máxima de 5A. Dois dissipadores de calor foram acoplados ao módulo termoeletrico para realizarem a troca de calor entre o meio externo e interno e posicionados na caixa de maneira que o dissipador, que é mantido em contato com

uma das faces do módulo termoeletrico, ficasse totalmente inserido no interior da caixa. A Figura 1 mostra o posicionamento desses componentes.

Figura 1 - Posicionamento dos dissipadores de calor.



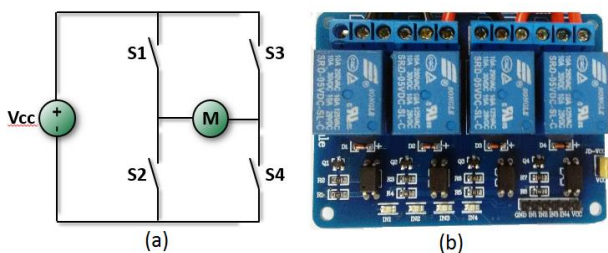
Fonte: Do Autor.

A medição de temperatura foi realizada através de termistores do tipo NTC. A curva que relaciona a resistência com temperatura foi obtida através da equação de Steinhart-Hart, Equação 1. Os coeficientes foram ajustados com dados fornecidos pelo fabricante do termistor.

$$T^{-1} = A + B \ln(R) + C \ln(R)^3 \quad (1)$$

O controle da temperatura interna da caixa é feito através da inversão das polaridades de tensão aplicada ao módulo termoeletrico. Para isso, foi utilizado um circuito eletrônico do tipo ponte H confeccionado em um conjunto de quatro relés eletromecânicos, disponíveis em uma placa comercial para uso em projetos onde há a necessidade de acionamento de cargas. O acionamento dos pares de relés, bem como a medição de temperatura são feitas através de um microcontrolador Arduino. A Figura 2 mostra o esquemático da ponte H e o módulo comercial usado em sua implementação.

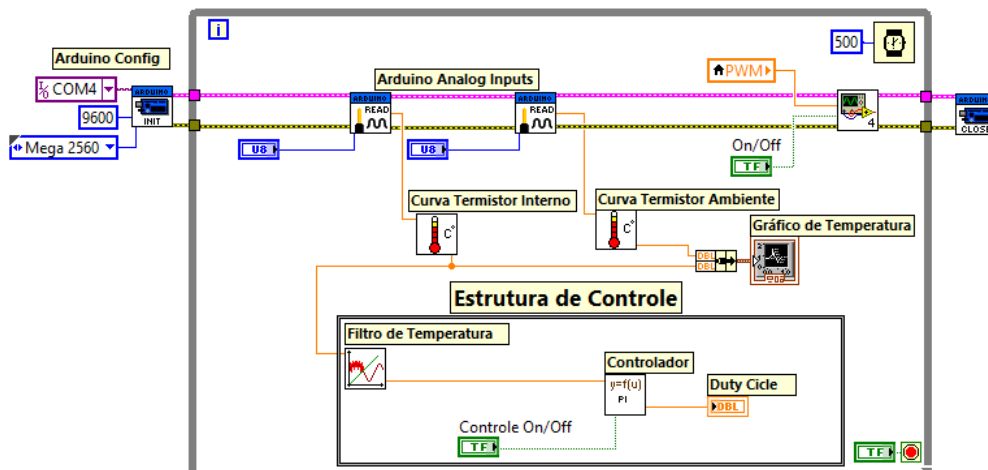
Figura 2 – (a) Esquemático da ponte H; (b) Módulo comercial com 4 relés.



Fonte: Do Autor.

O programa desenvolvido conta com interfaces de comunicação entre o microcontrolador Arduino e o software LabView. Como pode ser observado na Figura 3 o programa contém uma área específica para implementação de sistemas de controle em VI's (*Virtual instruments*).

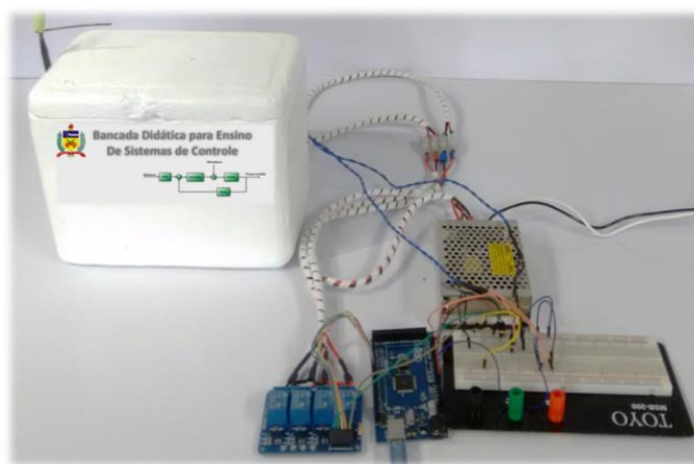
Figura 3 – Programação em LabView®.



Fonte: Do Autor.

A Figura 4 apresenta a bancada didática completa. É importante ressaltar o tamanho compacto da mesma, ideal para espaços reduzidos como laboratórios.

Figura 4 – Bancada didática.



Fonte: Do Autor.

Os custos aproximados de todo o aparato necessário para a elaboração deste protótipo são mostrados na tabela abaixo, podendo variar de acordo com a marca do produto e local de compra.

Tabela 1 - Tabela de preço.

Dispositivo E/S multifuncional 6003 - <i>National Instruments</i>		Aparato proposto no artigo	
COMPONENTE	PREÇO	COMPONENTE	PREÇO
Placa	R\$2.300,00	Microprocessador	R\$60,00
Módulo ponte H (4 relés)	R\$20,00	Módulo ponte H (4 relés)	R\$20,00
Termistores (2,7 K Ω) - 2un	R\$50,00	Termistores (2,7 K Ω) - 2un	R\$50,00
Resistores (1 K Ω) - 2un	Desprezível	Resistores (1 K Ω) - 2un	Desprezível
Módulo Peltier (72W)	R\$20,00	Módulo Peltier (72W)	R\$20,00
Dissipadores - 2un	R\$30,00	Dissipadores - 2un	R\$30,00
Coolers (12V) - 2un	R\$35,00	Coolers (12V) - 2un	R\$35,00
Total	R\$2.455,00	Total	R\$215,00

Fonte: Do Autor.

Percebe-se que a placa representa o custo mais significativo de todos os componentes, fato que pode ser minimizado empregando o módulo Arduino. Para enfatizar isso, o orçamento do lado esquerdo da tabela foi estimado levando em consideração a utilização do dispositivo multifuncional 6003 - *NI (National Instruments)*. Tal componente pode ser usado em diversas aplicações de controle pela sua simplicidade de ligação e acionamento de equipamentos. Ele possui 13 E/S digitais, 2 saídas e 8 entradas analógicas (16 bits de resolução).

O Arduino Mega possui 54 E/S digitais (sendo 15 com saída PWM) e 16 entradas analógicas (10 bits de resolução), reduzindo o custo em mais de 10 vezes e possibilitando implementar as mesmas lógicas de controle.

Vale ressaltar que o menor número de bits de resolução não interfere nos resultados de maneira significativa para o objetivo proposto e ambos microprocessadores conseguem se comunicar com o *software LabView*, possibilitando a mesma implementação.

3 SISTEMAS DE CONTROLE

Para validação da bancada didática proposta, um controlador do tipo proporcional-integral foi desenvolvido. A Subseção 3.1 detalha a obtenção dos modelos matemáticos usados no projeto dos controladores. As subseções seguintes abordam o desenvolvimento do sistema de controle proposto no trabalho.

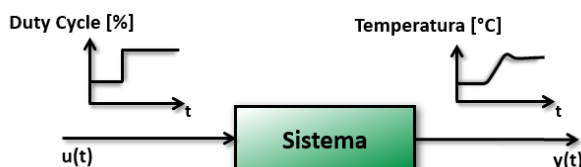
3.1 Identificação do sistema

A identificação de sistemas visa a obtenção de um modelo matemático que represente de maneira essencial as características de um determinado sistema dinâmico, (Coelho, 2004). O sistema de atuação da bancada didática consiste no chaveamento da polaridade aplicada ao módulo termoeletrônico. Foi definido um período de 10 segundos com frações de acionamento (*duty cycle*) de 0 a 95%. Assim, variações impostas ao *duty cycle* alteram a fração de tempo em

que o módulo termelétrico é mantido aquecendo ou resfriando, alterando assim a temperatura interna da caixa.

Os modelos matemáticos foram obtidos através de modelagem do tipo caixa preta baseada em resposta ao degrau, Figura 5 com variações de *duty cycle* em torno de pontos de operação específicos.

Figura 5 – Identificação de sistemas baseado em resposta ao degrau.



Fonte: Do Autor.

Um modelo de primeira ordem com atraso de transporte (*First Order Plus Dead Time - FOPDT*), Equação 2, foi ajustado através do método de Smith, (Aguirre, 2004). Foram obtidos quatro modelos para quatro pontos de operação varrendo toda a faixa de temperatura alcançada pela bancada didática.

$$G(S) = \frac{k_i}{\tau_i S + 1} e^{-\theta_i S} \quad (2)$$

Sendo k_i é o ganho estático, τ_i é a constante de tempo e θ_i o atraso de transporte, no ponto de operação i .

A Tabela 1 detalha os valores de ganho estático, constante de tempo e atraso de transporte obtidos em cada um dos quatro pontos de operação.

Tabela 2 – Coeficientes do modelo de primeira ordem para vários pontos de operação

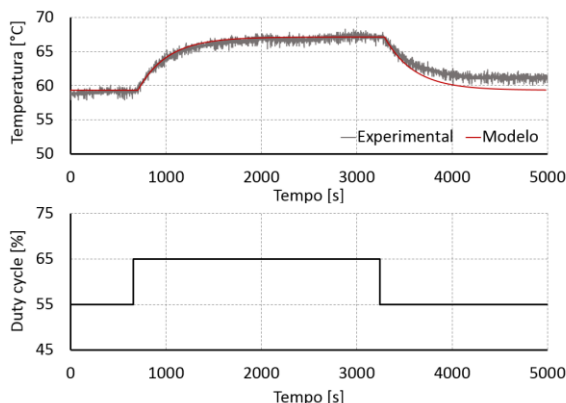
Ponto de operação	Faixa de temperatura [°C]	k_i	τ_i	θ_i
1	15,0 a 41,0	0,65	286,5	95,5
2	41,0 a 50,0	0,92	333,25	102,15
3	50,0 a 65,0	0,78	310,0	48,5
4	65,0 a 70,0	0,6	438,0	5,5

Fonte: Do Autor

A Figura 6 mostra um teste experimental de identificação em torno do ponto de operação 3 variando o *duty cycle* em 10% (de 55% a 65%). Existe uma boa aproximação entre modelo e

resposta dinâmica do processo, o que sinaliza que o sistema pode ser bem aproximado por um modelo de primeira ordem com atraso de transporte.

Figura 6 – Comparação entre modelo de primeira ordem e processo real.



Fonte: Do Autor.

3.2 Controlador PI

Para validação da bancada didática um controlador do tipo proporcional-integral foi sintonizado através da técnica de ajuste baseada na estrutura de controle IMC – *Internal model control*. O controlador PI possui uma parcela integral para garantia de erro nulo em regime permanente para referências do tipo constantes, e uma parcela proporcional ao erro, Equação 3.

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (3)$$

onde k_p é o ganho proporcional e t_i é o ganho integral do controlador. O controlador foi ajustado através da sintonia IMC, tomando como base um modelo médio que leva em consideração os quatro modelos obtidos. Os valores de k_p e t_i são calculados através das Equações 4 e 5.

$$k_p = \frac{2\tau + \theta}{2\lambda K} \quad (4)$$

$$t_i = \tau + \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

O valor de λ usado para ajuste do controlador foi de 2,5 com o intuito de fornecer uma resposta mais robusta do controlador. Para implementação em *software*, foi usado uma equação a diferenças, Equação 6, obtida através da discretização por aproximação *tustin* com período de amostragem de 10 segundos.

$$u(k) = u(k-1) + \alpha e(k) + \beta e(k-1) \quad (6)$$

onde $u(k-1)$ é o sinal de controle aplicado no período de amostragem anterior, $e(k)$ o erro atual e $e(k-1)$ o erro anterior. Os coeficientes α e β são apresentados na Tabela 2.

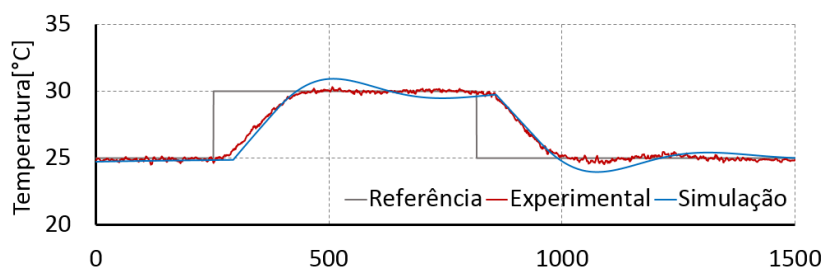
Tabela 3 – Coeficientes da equação a diferenças para o controlador.

Coeficientes	Valor numérico
α	3,640
β	-3,625

Fonte: Do Autor.

A Figura 7 mostra resultados de controle obtidos em simulações e a resposta real do controlador implementado na bancada didática.

Figura 7 – Validação do controlador proporcional-integral.

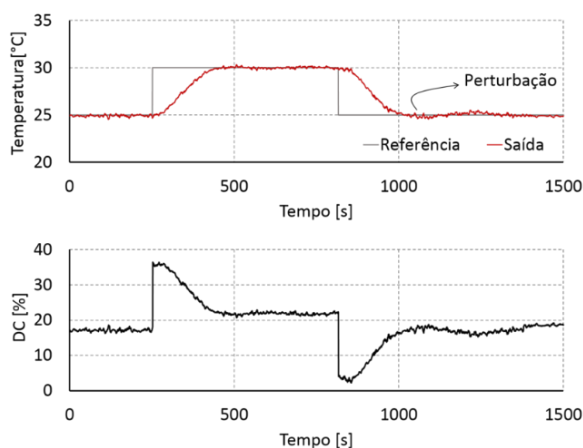


Fonte: Do autor.

4 RESULTADOS

Foram realizados testes experimentais para validação da bancada didática com controle em duas faixas de temperatura. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o sistema de controle atuando em torno de 25°C. No ponto identificado como perturbação, foi feita uma abertura de 30 segundos na caixa. A influência desta abertura é mínima devido a temperatura ambiente onde os testes foram realizados estar próxima a 25°C.

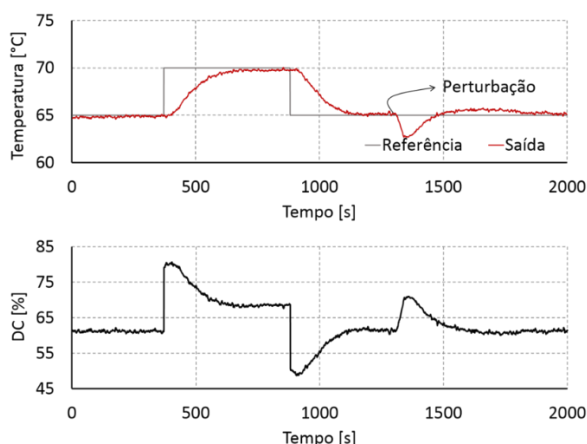
Figura 8 – Teste de seguimento de referência e rejeição de perturbação em torno de 65°C.



Fonte: Do Autor.

A Figura 9 apresenta o segundo teste de validação onde a temperatura interna da caixa foi controlada em torno de 65°C. Neste teste já é possível observar a influência da abertura da caixa na temperatura interna e o sistema de controle atuando para rejeitar essa perturbação.

Figura 9 – Teste de seguimento de referência e rejeição de perturbação em torno de 65°C.



Fonte: Do Autor.

Em ambos os testes é possível observar o seguimento de referência, requisito presente na grande maioria dos projetos de sistemas de controle.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma bancada didática constituída por componentes de baixo custo, foi desenvolvida e validada através da avaliação de um sistema de controle clássico. O tamanho reduzido e a simplicidade de construção deste aparato experimental o torna ideal para ser implementado em ambientes onde há restrição de espaço como laboratórios e a própria sala de aula. Além disso, a estrutura de *software* permite a implementação de diversos tipos de sistema de controle, desde controladores clássicos até sistemas de controle complexos e mais elaborados.

Os testes experimentais mostraram que o controlador desenvolvido mantém a temperatura interna da caixa em valores de referência definidos pelo usuário e rejeita perturbações de carga em toda a faixa da operação da bancada didática. Embora o sistema possua forte não linearidade, que pode ser observada pela diferença entre os modelos dinâmicos obtidos em diferentes regiões de operação, o controlador projetado através de um modelo médio apresentou bons resultados nas duas faixas extremas de temperatura (25°C e 65°C).

A característica não linear da bancada permite que ela seja usada em aplicações de sistemas de controle lineares, não lineares e técnicas de controle baseadas em inteligência computacional, como sistemas de controle neuro-fuzzy e controladores adaptativos baseados em aprendizado de máquina.

A possibilidade de implementação prática, demonstrou a potência que a bancada didática possui na influência mútua entre teoria e prática, proporcionando aos alunos dos cursos de sistemas de controle a oportunidade de aprimorar seus conhecimentos e habilidades com um investimento de aproximado de R\$ 215,00, esse custo representa um valor de 10 vezes menos comparado ao NI 6003 que é utilizado com a mesma finalidade em aulas práticas.

Como recomendações para trabalhos futuros sugere-se novas pesquisas relacionadas ao uso de técnicas de boas práticas com ênfase em engenharia e gestão do conhecimento, a fim de

intensificar ainda mais o compartilhamento e o fluxo do conhecimento entre professores e alunos.

Agradecimentos

Esse estudo contou com o apoio do programa EMBRAPPII (POLO/UFSC Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica). Os autores também gostariam de expressar sua gratidão ao inestimável apoio do (Núcleo de Estudos em Inteligência, Gestão e Tecnologias para Inovação IGTI/EGC/UFSC) por acreditar e orientar esse trabalho.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas–Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Editora UFMG, 2004.

COELHO, Antonio Augusto Rodrigues; DOS SANTOS COELHO, Leandro. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. 2004.

FEISEL, Lyle D.; ROSA, Albert J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **Journal of Engineering Education**, v. 94, n. 1, p. 121-130, 2005.

GOMES, Francisco José; PINTO, Danilo Pereira. Laboratórios Integrados para Controle de Processos e Análise da Eficiência Energética de Sistemas Industriais. In: **Proceedings of the XXXVI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. 2008.

IRIGOYEN, Eloy; LARZABAL, Ekaitz; PRIEGO, Rafael. Low-cost platforms used in control education: An educational case study. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 17, p. 256-261, 2013.

CONSTRUCTION OF A LOW COST DIDACTIC BENCH FOR TEACHING CONTROL SYSTEMS

Abstract: *This work presents the design, construction and validation of a didactic bench for control engineering courses aiming the laboratory practices. It was developed a compact experimental apparatus for supporting engineering students to apply their theoretical knowledge in practice. For this purpose, a review in the literature was carried out and related work that contribute to the development of this research field were analyzed. Details of construction, operation and assembly are also provided, including microcontrollers, thermoelectric modules and sensors used in the work. Finally, a proportional-integrative controller was designed for validating the proposed experimental apparatus. As a result, the didactic bench proved to be able to evaluate different types of control structures, with respect to performance requirements and reliability, inherent in control systems projects. The ease of assembly, handling and operation, associated to the low implementation cost make this prototype a powerful teaching tool. In addition, the workbench can be used as integrating project linking several knowledge areas present in engineering courses, such as, electronics, mechanics and software development.*

Key-words: Didactic bench. Engineering teaching. Control systems.