

UMA EXPERIÊNCIA DE MÉTODOS AVALIATIVOS BASEADO EM PROJETOS INTERDISCIPLINARES

BRUNO HENRIQUE DE OLIVEIRA¹, ARTHUR ENRICO CECI DOS SANTOS², RODRIGO DA PONTE CAUN³, WILLIAN RICARDO BISPO MURBAK NUNES⁴, AUGUSTO CESAR GRACETTO⁵

¹Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, campus Apucarana-PR, brunoh3n@gmail.com;

²Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, campus Apucarana-PR, arthursantos@alunos.utfpr.edu.br;

³Dr. em Eng. Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Apucarana-PR, rodrigocaun@utfpr.edu.br

⁴Dr. em Eng. Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Apucarana-PR, willianr@utfpr.edu.br

⁵Dr. em Química, Prof. Adjunto, UTFPR, campus Apucarana-PR, agracetto@utfpr.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: A proposta deste trabalho é evidenciar o impacto da seleção de componentes eletrônicos na análise dos resultados das diversas etapas em projetos de controle analógico envolvendo simulações e prototipagem. A ideia da problematização à concepção de soluções envolveu uma experiência alternativa de avaliação baseada em uma abordagem interdisciplinar entre Sistemas de Controle 1 e Eletrônica A do curso de Engenharia Elétrica. A proposta discutida considerou o projeto de controladores analógicos a plantas eletroeletrônicas, como o circuito RC. Nossos resultados demonstram que as características construtivas dos componentes eletrônicos definem o sucesso da validação teórica-experimental em atividades de ensino e pesquisa. Essas diferenças, certamente, não são esperadas pelos acadêmicos em suas primeiras experiências no estudo prático e, portanto, este cenário é discutido no âmbito do ensino de sistemas de controle na Engenharia Elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Interdisciplinaridade; avaliação baseada em projetos; componentes eletrônicos; controle linear.

AN EXPERIENCE OF EVALUATING METHODS BASED ON INTERDISCIPLINARY PROJECTS

ABSTRACT: The purpose of this paper is to highlight the impact of the selection of electronic components in the result analysis of the various steps in analog control design involving simulations and prototyping. From the idea of the problem to the solutions design brought an alternative experience of evaluation based on an interdisciplinary approach between Control Systems 1 and Electronics A of the Electrical Engineering course. The discussed proposal considered the design of analog controllers for electronic plants, such as the RC circuit. Our results demonstrate that the constructive characteristics of the electronic components define the success of the theoretical and experimental validation in teaching and research activities. Certainly, these differences are not expected by the academics on their practical study, therefore, this scenario is discussed within the scope of teaching of control systems in Electric Engineering.

KEYWORDS: Interdisciplinarity. evaluation based on projects; electronic components; linear control.

INTRODUÇÃO

Nas metodologias tradicionais de ensino, em que o professor conduz todas as ações de aprendizagem, o aluno torna-se um agente passivo e não é incentivado a problematizar, a questionar e nem a relacionar o que está sendo ensinado com o que já conhece, nem estabelece uma relação social e histórica com o seu ambiente (Leão, 1999). Por outro lado, o desenvolvimento de projetos como metodologia de ensino envolve a resolução de um problema, ou construção de um objeto, que

proporciona uma interação dinâmica e dialógica entre professores e alunos. Neste contexto, o aluno tem um contato mais próximo com o objeto em estudo, e no processo de “utilizar seu conhecimento adquirido” em sala de aula, ele levanta dúvidas e questiona, ao mesmo tempo em que pesquisa e cria soluções que auxiliam na construção do problema (Cunha, 2008). O trabalho através de projetos pode ser enxergado como um avanço em direção à interdisciplinaridade proposta nos documentos oficiais. Apesar desta metodologia não eliminar as barreiras impostas nas grades curriculares, um olhar mais atento mostra que o trabalho com projetos permite a integração de conteúdo, seja através de temas comuns, seja através de práticas comuns (Buss e Mackedanz, 2017).

Neste contexto, a concepção de projetos multidisciplinares permite ao aluno relacionar os conteúdos teóricos ao uso de tecnologias em aplicações práticas reais, inter-relacionando-os com as mais diversas disciplinas cursadas na grade curricular do curso. Atualmente, este processo tem sido adotado como método avaliativo nas disciplinas de Sistemas de Controle 1 e Eletrônica Analógica A do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR - Câmpus Apucarana, contido em uma proposta de projeto interdisciplinar de ensino (Caun e Almeida, 2019). A vantagem da proposta está na concepção das fases de projeto, ou seja: (a) escolha da planta/processo de aplicações na Engenharia Elétrica; (b) obtenção do modelo matemático da planta; (c) simulações eletrônicas em *software* livre (*LTSpice*, por exemplo); (d) projeto de controladores analógicos via técnicas de controle linear; (e) realização física do sistema em diagrama de blocos; (f) prototipagem do sistema de controle realimentado e, por fim, (g) testes de bancada de validação teórico-experimental.

A dificuldade nesta abordagem de avaliação é mais acentuada na fase de prototipagem da planta, bem como a malha de controle analógica. Este fato está associado a *expertise* do projetista (neste caso, o aluno) em selecionar os componentes eletrônicos mais adequados às características de operação do protótipo. Em vista das diversas opções existentes no mercado de componentes eletrônicos e de *softwares* computacionais, os discentes são provocados a aprimorar suas habilidades de análises técnico-científicas, que por sua vez expande sua capacidade crítica de decisão. Uma observação importante está no fato de que a concepção física do projeto expõe os discentes a situações adversas e não controladas que diferem, e muito, do modelo teórico.

Esse trabalho, portanto, objetiva uma análise da influência da seleção de componentes eletrônicos na compatibilidade dos resultados obtidos a partir de simulações teóricas, simulações eletrônicas e implementações práticas. Explora-se, ainda, as características ideais e reais dos modelos teóricos e experimentais, tornando a resposta temporal do sinal de saída da planta sensível a escolha adequada dos dispositivos analógicos. Ressalta-se, por fim, que no decorrer do projeto os alunos foram instigados a criar soluções que mitiguem as divergências encontradas entre as fases de simulações e implementações práticas.

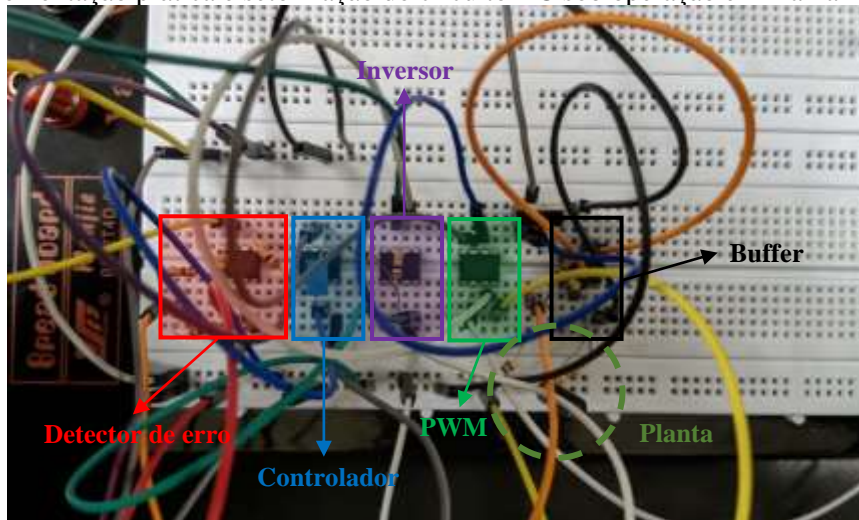
MATERIAL E MÉTODOS

O objeto de estudo deste trabalho é o projeto analógico de um sistema eletrônico, operando em malha fechada, de forma a avaliar os diferentes impactos na seleção de sua composição eletrônica. Para tanto, propõe-se analisar um circuito simples, porém um exemplo amplamente estudado em diversas ementas do curso, i.e., o circuito RC (Sanjaya, 2018; Bonatti, et. al., 2015, são exemplos). Nesta planta, define-se por entrada o valor médio da tensão de alimentação do circuito e, por saída, o sinal de tensão no capacitor.

Em linhas mais específicas, o valor médio da tensão de entrada (V_{cc}) é obtido via modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse-Width Modulation* – PWM), que representa o sinal do atuador na planta. Além disso, a realização física do projeto apresenta as seguintes características: (a) Os parâmetros construtivos da planta são $R = 1\text{ k}\Omega$ e $C = 22\text{ }\mu\text{F}$. Por razões práticas, um resistor de $40\text{ k}\Omega$ é associado paralelamente ao capacitor da planta para melhorar o tempo de carga/descarga do capacitor; (b) O detector de erro é representado por um amplificador operacional na configuração subtratora (com ganho unitário), perfazendo o sinal de erro entre a amostra da tensão de saída (via divisor resistivo de ganho 0,5) e o sinal de referência de 3V (o *setpoint* adotado para a tensão de saída de 6V); (c) O controlador é obtido pela configuração integradora do amplificador operacional parametrizado por $R_c = 1\text{ k}\Omega$ e $C_c = 220\text{ }\mu\text{F}$, cuja função é rastrear o sinal de entrada do tipo degrau; (d) É utilizado, ainda, um *buffer* de tensão para evitar um retorno de corrente no sensor de saída da planta e um amplificador inversor com ganho unitário, para inverter o sinal negativo provindo do amplificador integrador; (e) Por fim, um comparador entre o sinal de controle e o sinal de referência

possui a função de gerar o sinal de chaveamento PWM. A Figura 2 apresenta a proposta completa do sistema de controle implementado em matriz de contatos.

Figura 2. Implementação prática e setorização do circuito RC sob operação em malha fechada.



Note que um trabalho acadêmico, baseado na concepção prática, é permeado por etapas de execução, sendo um estágio de relevância a validação da proposta por meio de simulações. Em uma fase inicial, a validação teórica é obtida pela redução do diagrama de blocos, no domínio da Transformada de Laplace, cuja simulação foi realizada em *software Python 3.6* com as bibliotecas *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib* de uso livre. Neste ensaio teórico, o resultado alcançado atendeu as especificações de desempenho desejado do controlador, ou seja, a saída apresentou um leve *overshoot* e rápida estabilização. Em seguida, a etapa de validação prática é concebida via *software* de simulação eletrônica, no qual optou-se por alternativas de código aberto e, portanto, selecionou-se o *LTspice*. A escolha dos componentes eletrônicos (como por exemplo, amplificadores operacionais e transistores) não envolveu uma análise criteriosa. Este fato impactou sobremaneira na resposta do sistema, apresentando uma resposta de segunda ordem com um alto *overshoot*, tempo de estabilização lento e altamente oscilatório em relação aos resultados teóricos.

Após a fase de simulações, houve a implementação prática utilizando amplificadores operacionais LM741 e o transistor de efeito de campo IRFZ24, parametrizado pela simulação eletrônica. Nesta configuração, o sinal de saída tornou-se semelhante aos resultados simulados no *LTspice*. Esta problematização fomentou um estudo mais profundo nas características construtivas dos componentes com o objetivo de ajustar os erros entre os modelos teórico-experimental. Em vista disso, optou-se pelo uso do transistor 2N7000 e o amplificador operacional LM358 e, por consequência, a resposta prática tornou-se equivalente a simulação em *Python 3.6*. Note que, a seleção adequada dos componentes eletrônicos tornou-se o ponto central da divergência entre as simulações via *softwares*, no qual os alunos puderam efetivamente questionar os resultados e, conseqüentemente, buscar soluções em disciplinas correlatas, como na Eletrônica Analógica, que torna a construção do conhecimento uma proposta multidisciplinar.

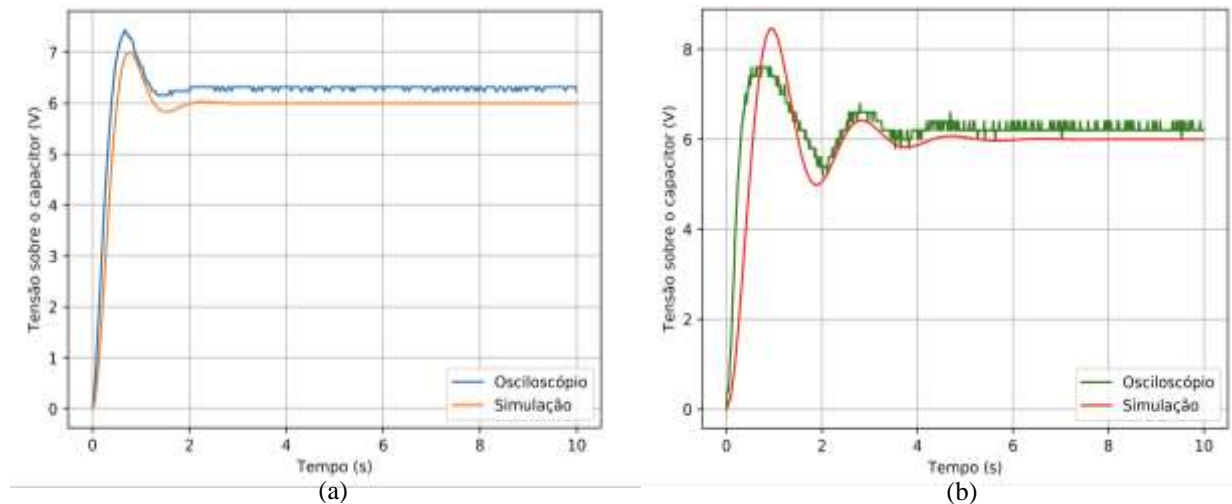
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados coletados durante a fase da concepção do projeto de controle do circuito RC. A Figura 2 (a) ilustra a resposta temporal do sistema baseado na simulação de funções de transferência por meio de um *script* escrito em linguagem *Python*. Um ponto positivo deste processo refere-se ao uso da plataforma *open-source* (isto é, código aberto), representando uma alternativa mais econômica frente ao uso de *softwares* proprietários. Nesta abordagem, que envolve o domínio da frequência, utilizou-se técnicas clássicas de controle linear e modelos aproximados que implicam em erros esperados em relação aos testes práticos, pois este último está sujeito às características reais dos componentes.

Em contraste, a Figura 2 (b) apresenta a tensão no capacitor na simulação eletrônica do *LTspice*. Observe que o período transitório é composto por uma oscilação sustentada que impacta no

overshoot e no tempo de estabelecimento, tornando-o incompatível com os resultados obtidos por função de transferência. Essas diferenças evidenciam que as características construtivas dos componentes eletrônicos são relevantes na prototipagem, devendo conduzir a um estudo mais profundo das características reais dos elementos que compõe o projeto.

Figura 2. Resultados teórico-experimentais. (a) Simulação em *Python 3.6* (*versus*) dados experimentais via LM358-2N7000; (b) Simulação em *LTSpice* (*versus*) dados experimentais via



LM741-RFZ24.

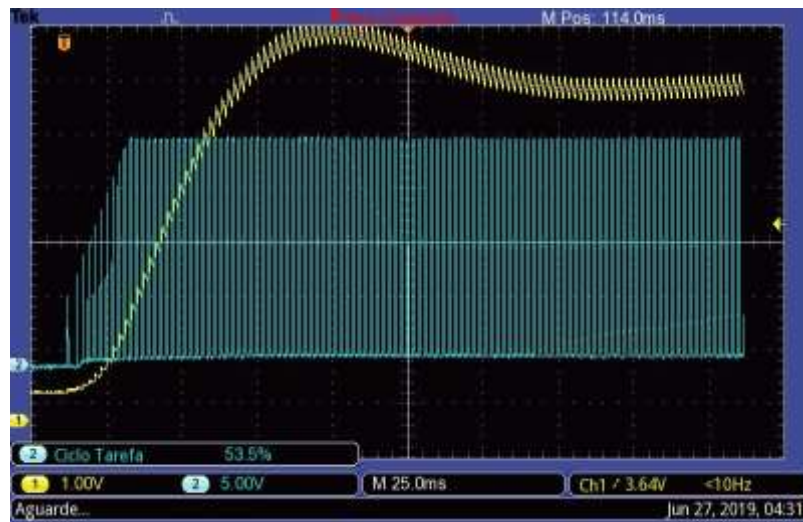
Na etapa de prototipagem optou-se, inicialmente, pelo conjunto LM741 e RFZ24. A resposta prática, capturada por um osciloscópio, pode ser visualizada na Figura 2(b). Neste caso é notória a validação com os resultados do *LTspice*. Observe algumas características dos dispositivos utilizados: (a) No LM741 a saturação negativa em *single supply*, na configuração comparadora, implica em uma tensão residual de saída positiva (tipicamente 1 a 2V) e sua operação é limitada a baixas frequências, devido ao alto *slew rate* (LM741 *datasheet*) e (b) No transistor IRFZ24, suas características dinâmicas são obtidas pelas capacitâncias de entrada ($C_{iss}=600\text{pF}$) e de saída ($C_{oss}=210\text{pF}$) e as características de chaveamento envolvem o atraso de tempo de ativação ($t_{on}=13\text{ns}$) e atraso de tempo de desligamento ($t_{off}=46\text{ns}$), cuja tensão *gate-source* de ativação varia entre 2 a 4V (RFZ24 *datasheet*). Pode-se elencar, portanto, que o fracasso da proposta inicial está no processo de chaveamento.

Em função da disponibilidade física do laboratório, selecionou-se o conjunto LM358 e 2N7000, que apresentam as seguintes características: (a) No dispositivo LM358 a saturação negativa em *single supply*, na configuração comparadora, implica em uma tensão de saída com nível GND e opera a frequências similares ao LM741 (LM358 *datasheet*) e (b) No transistor 2N7000 suas características dinâmicas são obtidas pelas capacitâncias de entrada ($C_{iss}=60\text{pF}$) e de saída ($C_{oss}=25\text{pF}$) e as características de chaveamento envolvem o atraso de tempo de ativação ($t_{on}=10\text{ns}$) e o atraso de tempo de desligamento ($t_{off}=10\text{ns}$), cuja tensão *gate-source* de ativação varia entre 0,8 a 3V (2N7000 *datasheet*). Note, aqui, que o fator decisivo está na geração adequada do sinal PWM e nas características dinâmicas do transistor.

Observe, ainda, que o máximo sobressinal (*overshoot*) M_s está correlacionado de maneira precisa e direta com a amplitude do pico de ressonância M_r da resposta em frequência (OGATA, 2010). Outro detalhe envolve a amplitude do pico de ressonância que é inversamente proporcional ao coeficiente de amortecimento (ξ) do sistema.

Portanto, os resultados obtidos na Figura 2 indicam que as características intrínsecas dos componentes LM358-2N7000 acarretam um coeficiente de amortecimento maior em relação ao par LM741-RFZ24, que por sua vez resulta em um *overshoot* menor. Por fim, a Figura 3 apresenta um detalhamento da resposta temporal do conjunto LM358 e 2N7000, ilustrando a eficácia do chaveamento no alcance da similaridade da simulação em *Python*.

Figura 3. Resposta temporal do sistema utilizando o conjunto LM358 e 2N7000, destacando o sinal de chaveamento (na cor azul) e a tensão com *ripple* sobre o capacitor (na cor amarelo).



CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a influência da seleção de componentes eletrônicos na adequação da resposta temporal em projetos práticos de sistemas de controle. Nossos resultados ressaltam a relação interdisciplinar dos conteúdos de uma grade curricular de Engenharia Elétrica. A inovação exposta neste trabalho está na mudança de paradigma de métodos avaliativos, cujo objetivo é construir o conhecimento a partir de estudos de casos reais que fomentam a problematização, a criação, a experimentação e a criticidade dos alunos. As etapas de concepção estratificam os desafios da gestão de projetos, que permeiam os conhecimentos técnicos exigidos na formação de um engenheiro e aprimora a capacidade crítica de avaliar os conceitos teóricos discutidos em sala de aula.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Engenharia Elétrica e a Diretoria de Graduação e Educação Profissional da UTFPR – Câmpus Apucarana, pelo apoio a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Buss, Cristiano da Silva e Mackedanz, Luiz Fernando. O Ensino Através de Projetos como Metodologia Ativa de Ensino e de Aprendizagem. Revista Thema. Vol. 14, n. 3, p. 122. 2017.
- Bonatti, I. S.; Lopes, A.; Peres, P. L. D.; Agulhari, C. M. Linearidade em Sinais e Sistemas. Editora Blucher, 1a. edição, São Paulo, 2015.
- Caun, R. P. e Almeida, T. E. P. Eletrônica de Controle: Uma proposta interdisciplinar baseada em projetos. Projeto de ensino homologado no Edital PROGRAD 32/2019, 3 p., 2019.
- Cunha, Maria Isabel da. Inovações pedagógicas: o desafio da reconfiguração de saberes na docência universitária. Cadernos Pedagogia Universitária USP, vol 6. São Paulo: Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo. 2008.
- Leão, Denise Maria Maciel. Paradigmas contemporâneos de educação: escola tradicional e escola construtivista. Cadernos de Pesquisa, n. 107, p. 187-206, jul. 1999.
- Ogata, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- ON Semiconductor. Datasheet, 2n7000G, 2n7000D. Literature Distribution Center for ON Semiconductor, 2015.
- Texas Instruments. Datasheet, LM741 Operational Amplifier. Texas Instruments Technology, SNOSC25D, 1999.
- Texas Instruments. Datasheet, LM358-N, LM258-N, LM158-N, LM2904-N Operational Amplifier. Texas Instruments Technology, SNOSBT3I, 2000.
- Vishay Siliconix. Datasheet, IRFZ24, ShIRFZ24. Vishay Intertechnology, 91000, 2019.
- W. S. Mada Sanjaya *et al.* Numerical Method and Laboratory Experiment of RC Circuit using Raspberry Pi Microprocessor and Python Interface. J. Phys.: Conf. Ser. 1090 012015, 2018.