

## SISTEMA DINÂMICO DUPLO RC PARA SÍNTESE E INTEGRAÇÃO DO CONHECIMENTO DA TEORIA DE CONTROLE

CAMILA BIAZETO DE SOUZA<sup>1</sup>, BEATRIZ MASQUETTI PELZ<sup>2</sup>, GABRIEL EVILACIO RISSA DE SOUZA<sup>3</sup>, WILLIAN RICARDO BISPO MURBAK NUNES<sup>4</sup> e RODRIGO DA PONTE CAUN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Elétrica, UTFPR, Apucarana-PR, souzac@alunos.utfpr.edu.br;

<sup>2</sup>Graduanda em Engenharia Elétrica, UTFPR, Apucarana-PR, beatrizpelz@hotmail.com;

<sup>3</sup>Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Apucarana-PR, gabrielsouza.2001@alunos.utfpr.edu.br;

<sup>4</sup>Dr. em Engenharia Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, Apucarana-PR, willianr@utfpr.edu.br;

<sup>5</sup>Dr. em Engenharia Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, Apucarana-PR, rodrigocaun@utfpr.edu.br;

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
4 a 6 de outubro de 2022

**RESUMO:** Frequentemente nos cursos de engenharia os discentes possuem dificuldades em assimilar os conceitos da teoria de controle para sistemas dinâmicos. Em um contexto educacional em que há limitação dos recursos financeiros, as universidades são desafiadas em propor atividades práticas que resultem em formação de excelência, bem como alcancem o aprimoramento de conhecimentos e habilidades no processo de ensino aprendizagem. Neste sentido, este trabalho propõe um sistema dinâmico que possui baixo custo de aquisição para ser empregado em aulas práticas de disciplinas na área de controle dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica. Com o sistema proposto pode-se desenvolver conhecimentos de: modelagem de sistemas; análise de sistemas contínuo no domínio da frequência; projeto, análise e desenvolvimento de compensadores utilizando função de transferência entre outros conceitos. Além disto, com a abordagem proposta é possível fortalecer habilidades de: programação e desenvolvimento de soluções em ambiente MATLAB; sintonia de compensadores e montagem de circuito eletrônicos analógicos. Resultados experimentais demonstram a viabilidade da abordagem proposta para a área de ensino de sistemas de controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas realimentados, controle analógico, amplificadores operacionais (amp-op), função de transferência.

### RC DUAL DYNAMIC SYSTEM FOR SYNTHESIS AND INTEGRATION OF CONTROL THEORY KNOWLEDGE

**ABSTRACT:** In engineering courses students have difficulties in assimilating the concepts of control theory to dynamic systems. In an educational context of limited financial resources, universities are challenged to propose practical activities that result in excellence training, as well as achieve the improvement of knowledge and skills in the process of teaching learning. In this sense, this work proposes a dynamic system that has low acquisition cost to be used in practical classes of disciplines in the area of control of undergraduate courses in Electrical Engineering. With the proposed system one can develop knowledge of: systems modeling; continuous systems analysis in the frequency domain; design, analysis and development of compensators using transfer function. In addition, with the proposed approach it is possible to strengthen skills: programming and development of solutions in MATLAB environment; tuning of compensators and analog electronic circuit assembly. Experimental results demonstrate the feasibility of the proposed approach for the teaching area of control systems.

**KEYWORDS:** Feedback systems, analog control, operational amplifiers (op-amp), transfer function.

### INTRODUÇÃO

Atualmente os projetos pedagógicos de cursos (PPCs) das engenharias passam por um processo de reformulação fomentada pelas novas diretrizes curriculares nacionais (DCNs). Neste âmbito, as discussões se intensificam em propor meios pelos quais os discentes realizem: *i*) atividades que articulem simultaneamente a teoria, a prática e o contexto de aplicação, necessárias para o

desenvolvimento das competências (Art. 6, § 2º); e *ii*) atividades acadêmicas de síntese dos conteúdos, de integração dos conhecimentos e de articulação de competências (Art. 6, § 7º) (BRASIL, 2022).

Entretanto, o cenário atual de retração econômica global e contingenciamento de recursos públicos para educação de ensino superior no Brasil não favorece a implementação de inovações e reformulações em PPCs que demandem altos investimentos. Assim, os cursos de Engenharia são desafiados a realizarem mudanças mesmo com restrições orçamentárias.

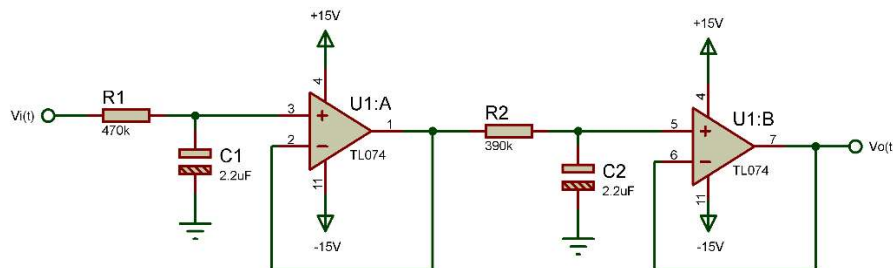
Especificamente na Engenharia Elétrica, os alunos possuem dificuldades em compreender conceitos básicos de análise, projeto e montagem de sistemas de controle. Diferentes contribuições buscam suprir a carência de materiais de atividades práticas na área, tais como: Pugliese *et al.* (2022) propondo a montagem de tanques acoplados; Oliveira *et al.* (2021), Mandanici *et al.* (2021) e Sanjaya *et al.* (2018) com circuito resistivo-capacitivo (RC); Vasquez, Kypuros e Villanueva (2021) com motor de corrente contínua (CC); entre outros.

Neste sentido, este trabalho apresenta uma proposta de projeto e desenvolvimento de protótipo de controlador para sistema duplo RC, que permite aos alunos o trabalho em equipe para a síntese e integração dos conhecimentos da teoria de sistemas de controle. Pode-se ainda destacar que a topologia do sistema dinâmico possui baixo custo e tem sido adotado como método avaliativo na disciplina de Sistemas de Controle 2 do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR - *campus* Apucarana.

## MATERIAL E MÉTODOS

O circuito duplo RC proposto como sistema dinâmico para projeto e validação experimental das técnicas de controle contínuo consiste em dois circuitos RC ligados em cascata e com desacoplamento de impedância proveniente do amplificador operacional montado como seguidor de tensão (*buffer*), conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Sistema dinâmico duplo RC.



A modelagem matemática deste sistema pode ser obtida por meio das leis de circuitos. Utilizando a leis dos nós e a transformada de Laplace, obtém-se que a dinâmica é de segunda ordem dada por:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{R_2 C_2 + R_1 C_1}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (1)$$

onde  $V_o(s)$  é a tensão de saída do sistema,  $V_i(s)$  é a tensão de entrada do sistema e os seguintes valores de resistências e capacitâncias dados por  $R_1 = 470k\Omega$ ,  $R_2 = 390k\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 2,2\mu F$ .

Substituindo os valores dos componentes obtém-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1,127}{s^2 + 2,132s + 1,127} \quad (2)$$

Analisando a equação característica proveniente de (2) determina-se que os polos são reais e distintos,  $p_1 = -0,912195$  e  $p_2 = -1,219805$ , conseqüentemente trata-se de um sistema superamortecido.

Aos discentes foi proposto: 1) comparar a resposta temporal do sistema em malha aberta e o realimentado com ganho proporcional  $K_p$  igual a 1, 5 e 8; 2) determinar o ganho de um controlador proporcional que alcance um erro de regime permanente de 12%; 3) encontrar os ganhos de um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) para obter uma resposta do sistema realimentado com performance de 4% de sobressinal e tempo de estabelecimento máximo de 6 segundos.

Para o projeto dos controladores foi utilizado o *software* MATLAB e o *app Control System Designer*. No âmbito de montagem foram utilizados componentes eletrônicos (TL074, resistores e capacitores), *protoboard* BB-2T4D, fonte de alimentação de bancada ICCEL PS-5000, gerador de funções MINIPA MFG-4225 e osciloscópio Tektronix TBS 1052B.

Os controladores proporcional e PID foram montados utilizando circuitos com amplificadores operacionais, indicados na Figura 2. Uma exemplificação de montagem do controlador PID e o sistema dinâmico duplo RC está indicado na Figura 3.

Figura 2. Circuito dos compensadores analógicos com amplificador operacional: proporcional e PID.

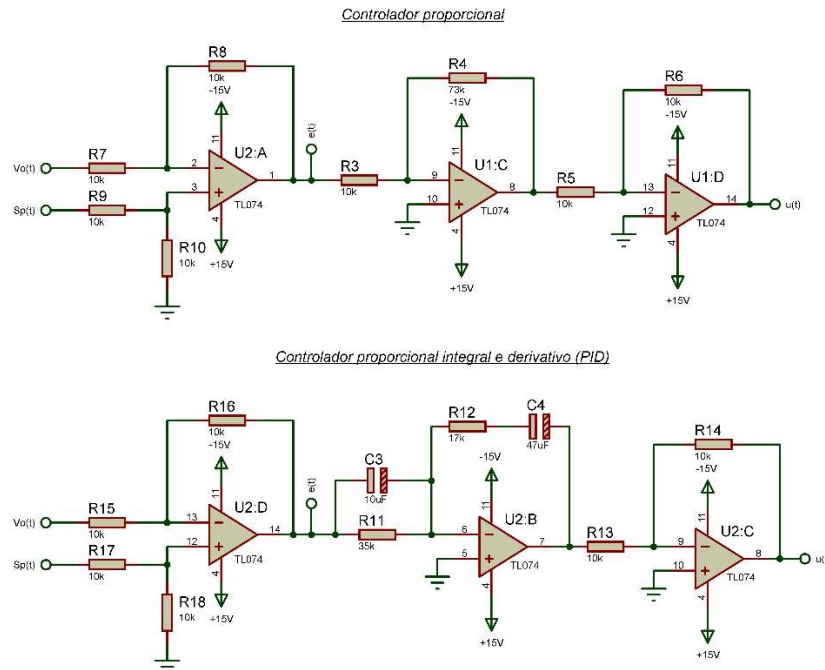
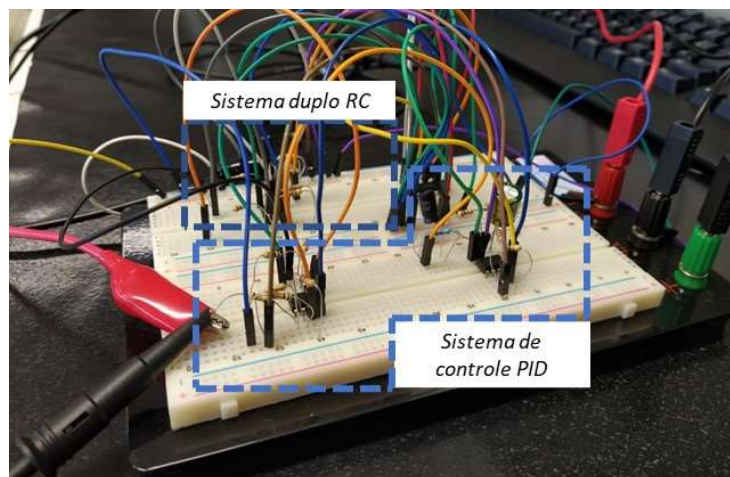


Figura 3. Montagem dos circuitos em *protoboard*: duplo RC e controlador PID.



Considerando a equação de erro de regime, pode-se encontrar o ganho proporcional e definir os valores dos componentes eletrônicos pela seguinte relação

$$K_p = \frac{R_6 R_4}{R_5 R_3} \quad (3)$$

Enquanto que a relação de ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  do controlador PID para implementação física com os componentes eletrônicos é dada por

$$K_p = \frac{R_{14}(R_{11}C_3 + R_{12}C_4)}{R_{13}R_{11}C_3} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{R_{14}}{R_{13}R_{11}C_4} \quad (5)$$

$$K_d = \frac{R_{14}R_{12}C_3}{R_{13}} \quad (6)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise comparativa do sistema realimentado com ganho proporcional alterou-se o resistor  $R_4$  para os valores de  $10k\Omega$ ,  $50k\Omega$  e  $80k\Omega$  correspondente respectivamente aos ganhos de  $K_p$  igual a 1, 5 e 8. A Figura 4 apresenta os resultados de validação experimental. O sistema realimentado com ganho proporcional apresenta erro de regime permanente para todos os casos, entretanto, conforme aumenta-se o ganho proporcional o erro é reduzido.

Considerando o requisito de projeto para o controlador proporcional, de erro de 12% obteve-se um ganho  $K_p = 7,333$  e adotou-se para a implementação prática os valores de  $R_4 = 73,33k\Omega$  e  $R_3 = R_5 = R_6 = 10k\Omega$ .

Utilizando a técnica de alocação de polos, via *Control System Designer*, obteve-se ganhos do controlador PID dados por  $K_p = 0,634611$ ,  $K_d = 0,17087$  e  $K_i = 0,589236$ . Para implementação prática foi necessário a associação de alguns resistores para se obter o ganho esperado. Entre os valores dos componentes definiu-se  $R_{11} = 35k\Omega$ ,  $R_{12} = 17k\Omega$ ,  $R_{13} = R_{14} = 10k\Omega$  e  $C_3 = 10\mu F$  e  $C_4 = 47\mu F$ . A Figura 5 apresenta os resultados dos controladores proporcional e PID baseado nas especificações de projeto. Note que o controlador PID alcança erro nulo e os demais índices de performance requisitados.

Figura 4. Análise comparativa da resposta temporal da saída para uma entrada degrau de 4 V com o sistema operando: a) em malha aberta; b) realimentado com  $K_p = 1$ ; c) realimentado com  $K_p = 5$ ; d) realimentado com  $K_p = 8$ .

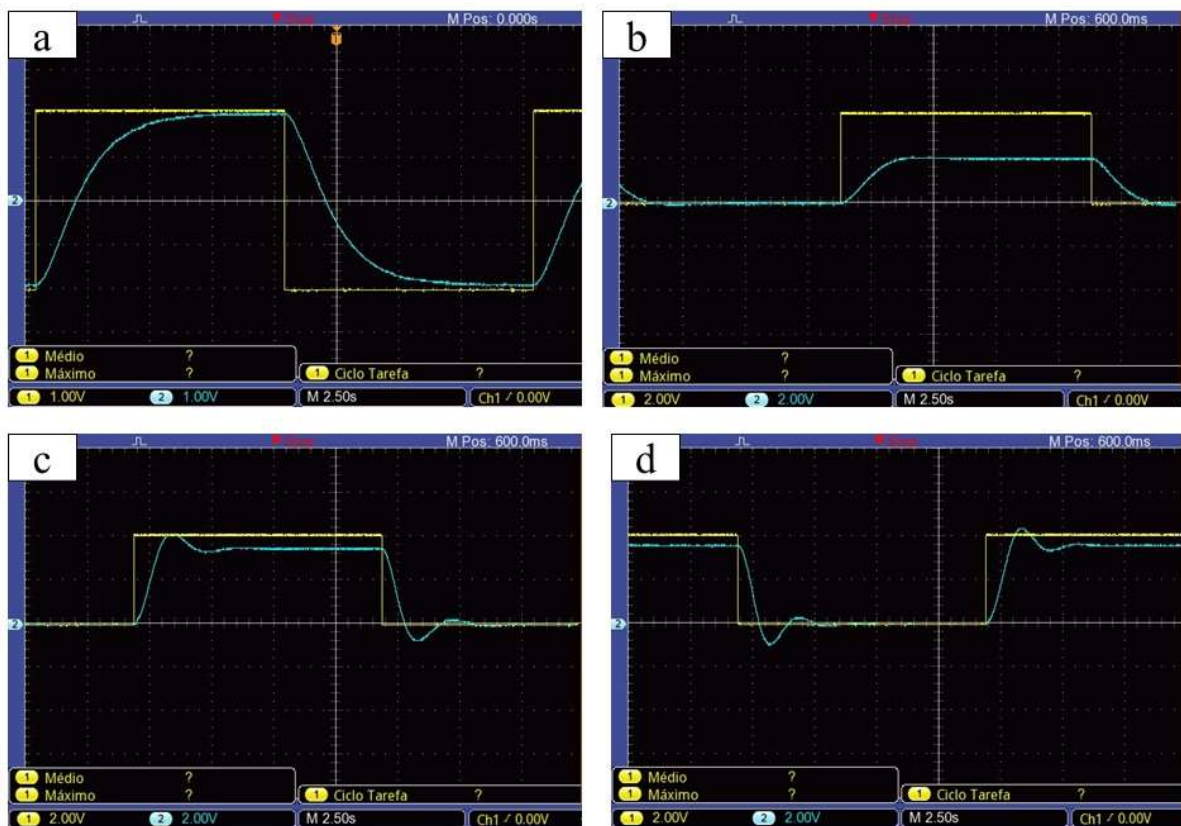
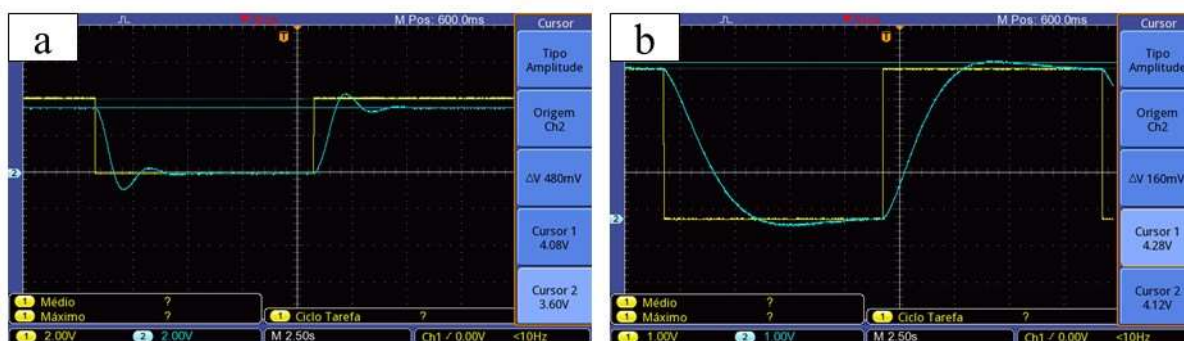


Figura 5. Saída do sistema dinâmico realimentado operando conforme especificações de projeto com: a) controlador proporcional; b) controlador PID.



## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de sistema de controle para a dinâmica de um circuito duplo RC. A abordagem apresentada é acessível e de baixo custo, sendo uma opção atrativa a ser adotada nos cursos de graduação em Engenharia.

Além disto, resultados obtidos em sala de aula demonstram que a proposta deste trabalho possibilita articular a teoria com a prática, elucidando os fundamentos de projeto na área de controle.

Por fim, espera-se que este material seja reproduzível e também contribua na formação de discentes de outras instituições de ensino.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. Resolução nº 2, de 24 de abril de 2019. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Brasília: Ministério da Educação, 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolu%C3%87%C3%83o-n%C2%BA-2-de-24-de-abril-de-2019-85344528>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- Mandanici, A.; Sarà, S. A.; Fiumara, G.; Mandaglio, G. Studying Physics, Getting to Know Python: RC Circuit, Simple Experiments, Coding, and Data Analysis With Raspberry Pi. *Computing in Science & Engineering*, vol. 23, n. 1, pp. 93-96, 1 Jan.-Feb. 2021.
- Oliveira, B. H. de; Santos, A. E. C. dos; Caun, R. da P.; Nunes, W. R. B. M.; Gracetto, A. C. Uma experiência de métodos avaliativos baseado em projetos interdisciplinares. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC), 2021. Goiânia. Anais... Goiânia, 2021.
- Pugliese, L. F.; Oliveira, T. G.; Silva, D. L. F. da; Rodor, F. F.; Braga, R. A. da S.; Amorim, G. F. Modeling and development of a low-cost didactic plant for teaching in multivariable systems. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 7, p. 1-17, 2022.
- Sanjaya, W S M; Anggraeni, D.; Sambas, A.; Denya, R. Numerical method and laboratory experiment of RC circuit using Raspberry PI microprocessor and Python interface. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1090. No. 1. IOP Publishing, 2018.
- Vasquez, H.; Kypuros, J.; Villanueva, R. Implementing and validating analog and digital controllers. In: 2008 GSW. American Society for Engineering Education, 2021.