

ABORDAGEM DIDÁTICA DE CONTROLE PSEUDO-DERIVATIVO EM SISTEMAS DE SEGUNDA ORDEM

FRANCISCO FERREIRA FILHO¹, ALEKSANDER DA SILVA TOTH², WILLIAN RICARDO BISPO MURBAK NUNES³ e RODRIGO DA PONTE CAUN⁴

¹Graduando em Engenharia Elétrica, UTFPR, Apucarana-PR, francisofilho@alunos.utfpr.edu.br

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

³Dr. em Engenharia Elétrica, Prof. Adjunto, UTFPR, Apucarana-PR, willianr@utfpr.edu.br

⁴Dr. em Engenharia Elétrica, Prof. Associado, UTFPR, Apucarana-PR, rodrigocaun@utfpr.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
7 a 10 de outubro de 2024

RESUMO: Sistemas de controle é uma área muito importante dentro da engenharia, pois assegura confiabilidade e segurança de sistemas industriais automáticos, bem como o alcance de desempenho eficiente em diferentes processos industriais. A técnica de controle mais empregada na indústria é o proporcional integral e derivativo (PID). Na graduação os estudantes aprendem diferentes conceitos e fundamentos teóricos da área de controle. É fundamental na formação de engenheiros que os conhecimentos teóricos dialoguem com o desenvolvimento de habilidades práticas. Nesse sentido, este trabalho propõe um objeto didático de aprendizagem para validação experimental de controladores com baixo custo de implementação. Além disso, geralmente a aprendizagem do controlador PID é realizado utilizando o tipo série ou paralelo. Neste trabalho é proposto uma concepção de controle PID, denominada de pseudo-derivativo, e uma comparação é realizada com um controlador clássico da literatura do tipo avanço-atraso de fase.

PALAVRAS-CHAVE: Metodologias ativas, aprendizagem baseada em problema, controle analógico, simulação de sistemas.

DIDACTIC APPROACH TO PSEUDO-DERIVATIVE CONTROL IN SECOND-ORDER SYSTEMS

ABSTRACT: Control systems represent a vital area within engineering, as they play a key role in ensuring the reliability and safety of automated industrial systems while also enabling the efficient performance of various industrial processes. The Proportional Integral Derivative (PID) controller is the most commonly employed technique in the industry. Undergraduate engineering programs typically cover a range of concepts and theoretical foundations related to control systems. It is crucial for engineering education to bridge theoretical knowledge with the development of practical skills. In this context, the present work introduces an educational tool designed to facilitate the learning of various control techniques through experimental validation on cost-effective hardware. Additionally, while the PID controller is traditionally taught in its parallel form, this work proposes a pseudo-derivative control approach. It compares it with classical controllers such as phase lead and phase lead-lag controllers.

KEYWORDS: Active methodologies, problem-based learning, analog control, systems simulation.

INTRODUÇÃO

Freqüentemente alunos de Engenharia enfrentam dificuldades significativas em assimilar conceitos teóricos na área de controle, devido à complexidade abstrata desses temas e à falta de atividades práticas que conectem teoria e aplicação real (Normey-Rico e Morato, 2024). No Brasil, essa deficiência nas aulas práticas pode ser explicada pelo alto custo de equipamentos importados e às restrições orçamentárias enfrentadas pelas instituições públicas de ensino superior.

Nesse sentido, o desenvolvimento de objetos de aprendizagem práticos e acessíveis é fundamental para capacitar graduandos de Engenharia, especialmente em um contexto de restrições orçamentárias, pois facilita a compreensão e a integração de conhecimentos teóricos e práticos essenciais para a formação competente em áreas como sistemas de controle.

Alguns trabalhos da literatura têm buscado suprir a falta de materiais didáticos para atividades práticas. Souza et al. (2022), Mandanici et al. (2021), Oliveira et al. (2021) e Sanjaya et al. (2018) propuseram uma abordagem com circuito resistivo-capacitivo (RC). Normey-Rico e Morato (2024), Vasquez, Kypuros e Villanueva (2021) utilizaram motor de corrente contínua (CC), enquanto Pugliese et al. (2022) propuseram a montagem de tanques acoplados.

Todos os trabalhos anteriores utilizam estratégia de controle convencional denominada de controlador proporcional, integral e derivativo (PID) do tipo paralelo ou série. Geralmente, a análise é baseada com um sinal de referência do tipo degrau. Entretanto, a ação derivativa pode levar o controlador para um estado de saturação momentânea, denominado de efeito *derivative kick*, podendo estressar o elemento atuador de modo indevido (Wang et al., 2015; Phelan, 1971).

Assim, este trabalho propõe uma abordagem didática de ensino aos estudantes de um controlador PI-D, ou seja, o ramo da derivada é modificado para realimentação da saída, denominado como ação pseudo-derivativo. A proposta é validada de maneira prática utilizando componentes de baixo custo e resultando em um conhecimento muito útil de sistemas de controle para aplicação industriais.

MATERIAL E MÉTODOS

O objeto de aprendizagem proposto neste trabalho consiste na montagem de uma estrutura composta por controlador e planta (ou processo) montado em *hardware*. A planta é um sistema de segunda ordem, denominado de duplo RC (Souza et al., 2022).

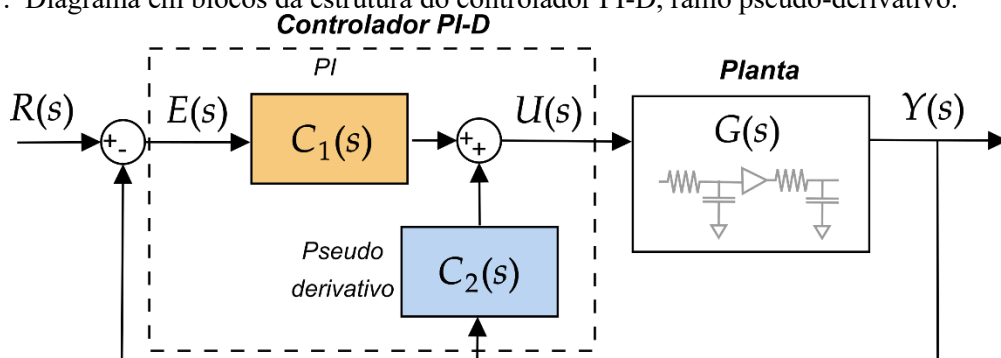
A abordagem de ensino-aprendizagem consistiu na exposição aos discentes sobre a necessidade de projetar e analisar diferentes estratégias de controle para alcançar diferentes índices de performance da resposta temporal. Considerando os valores $R_1 = R_2 = 470k\Omega$ e $C_1 = C_2 = 2,2 \mu F$, a planta analisada possui a seguinte função de transferência:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{R_2 C_2 + R_1 C_1}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}} = \frac{0,9353}{(s + 0,9671)^2} \quad (1)$$

A Figura 1 apresenta a topologia do controlador PI-D, que é composta por uma ação de controle proporcional-integral $C_1(s)$ baseada no erro e uma ação derivativa $C_2(s)$, aqui denominada de pseudo-derivativa, que é baseada na realimentação da saída (Wang et al., 2015; Phelan, 1971). Assim, a ação de controle $U(s)$ do PI-D é dada por:

$$U(s) = C_1(s) + C_2(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) + K_d s Y(s) \quad (2)$$

Figura 1. Diagrama em blocos da estrutura do controlador PI-D, ramo pseudo-derivativo.



Por meio da técnica de alocação de polos, via *Control System Designer* do MATLAB®, sintonizou o controlador com objetivo de alcançar as métricas de desempenho: sobressinal $M_p < 3.5\%$; tempo de estabelecimento $t_s < 6s$; e esforço de controle $\max(|u(t)|) < 7V$. Os ganhos do controlador PI-D foram tal que $K_p = 1.1935$, $K_i = 0.74$ e $K_d = 0.1$.

Além disso, foi proposta uma análise comparativa com um controlador avanço-atraso de fase (AvAtF). Conforme Ogata (2010), o AvAtF é um compensador composto por duas estruturas: a primeira é denominada de avanço de fase e a segunda, atraso de fase. O avanço de fase visa aumentar a margem de fase do sistema, melhorando a resposta transitória e reduzindo o sobressinal. Já o atraso de fase melhora a precisão em regime permanente, reduzindo o erro estacionário sem afetar significativamente a parte da resposta transitória.

Para a sintonia do AvAtF, inicialmente foi realizado o projeto da etapa do avanço de fase por meio do método da bisettriz (Ogata, 2010), considerando os polos desejados em $s_{1,2} = -0.978 \pm j0.8762$ e uma defasagem angular $\phi = 4.5965^\circ$. A partir disso, foram determinados o zero, o polo e o ganho do compensador avanço de fase, respectivamente $z_1 = -1.301$ e $p_1 = -1.326$, $K_{av} = 0.77248$. Definindo a constante de erro de posição como $K_p = 0.01$, determinou-se o zero, o polo e o ganho do compensador atraso de fase, respectivamente, $z_2 = -0.8094$, $p_2 = -0.006$, $K_{at} = 1.0102$. Dessa forma, a função de transferência do controlador AvAtF pode ser expressa como:

$$C_{AvAtF}(s) = K_{av} \left(\frac{s + z_1}{s + p_1} \right) K_{at} \left(\frac{s + z_2}{s + p_2} \right) = 0.78036 \left(\frac{s + 1.301}{s + 1.326} \right) \left(\frac{s + 0.8094}{s + 0.006} \right) \quad (3)$$

Após a sintonia dos controladores, a metodologia consistiu em realizar a simulação dos controladores no ambiente MATLAB® Simulink. A Figura 2 mostra a implementação do sistema simulado para o controlador PI-D. Com a confirmação dos resultados obtidos nas simulações, procedeu-se à montagem física dos controladores e da planta em uma *protoboard*. A Figura 3 apresenta a configuração física realizada dos controladores PI-D, AvAtF e planta.

Figura 2. Ambiente de simulação MATLAB® Simulink contendo controlador PI-D e planta.

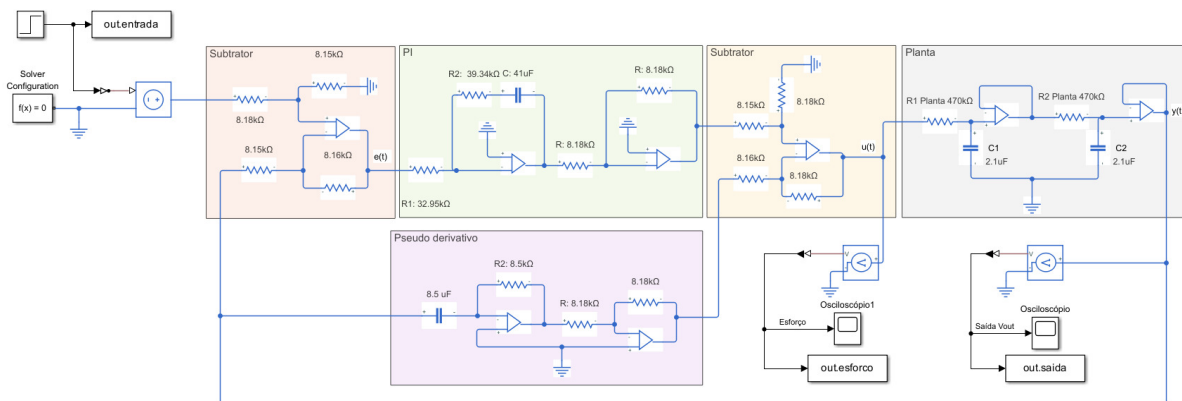
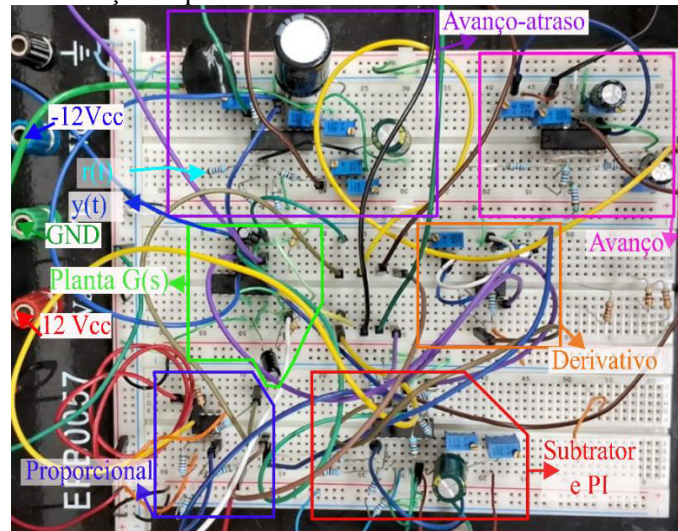


Figura 3. Montagem de validação experimental dos controladores: AvAtF e PI-D.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados dos controladores AvAtF e PI-D. Note que os resultados experimentais estão compatíveis com os obtidos na simulação. A Tabela 1 oferece dados de comparação dos índices de desempenho de cada controlador.

Em termos de sobressinal e erro em regime, ambos os controladores demonstraram resultados semelhantes. No entanto, o controlador PI-D teve um desempenho superior em relação ao em termos de tempo de estabelecimento. Por outro lado, o esforço máximo de controle do PI-D foi maior em comparação ao do AvAtF.

Figura 4. Resultados de simulação e experimental da resposta do sistema com controlador AvAtF e da respectiva ação de controle.

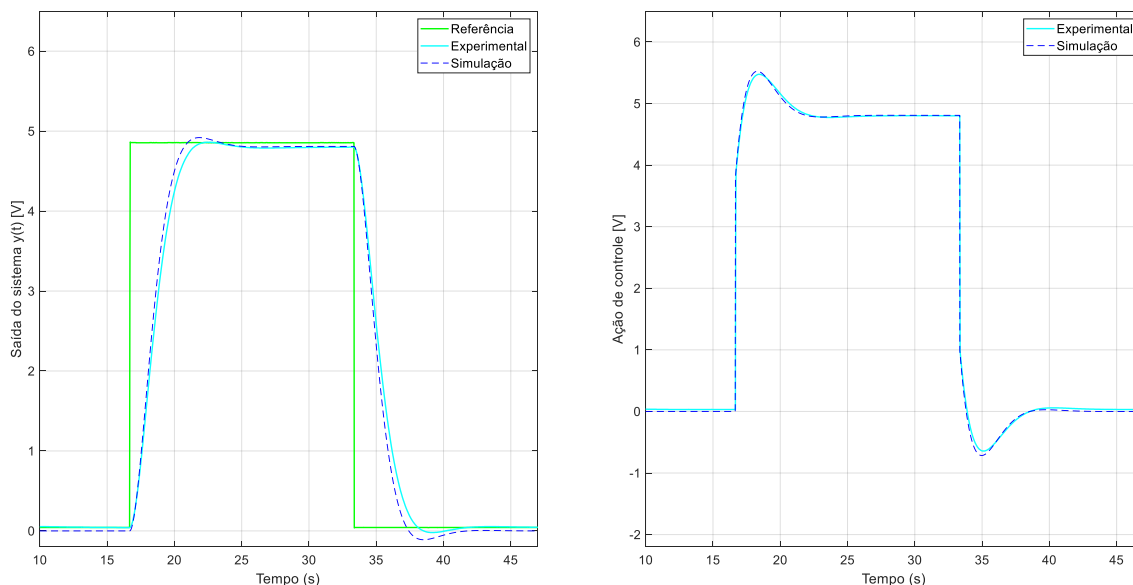


Figura 5. Resultados de simulação e experimental da resposta do sistema com controlador PI-D e da respectiva ação de controle.

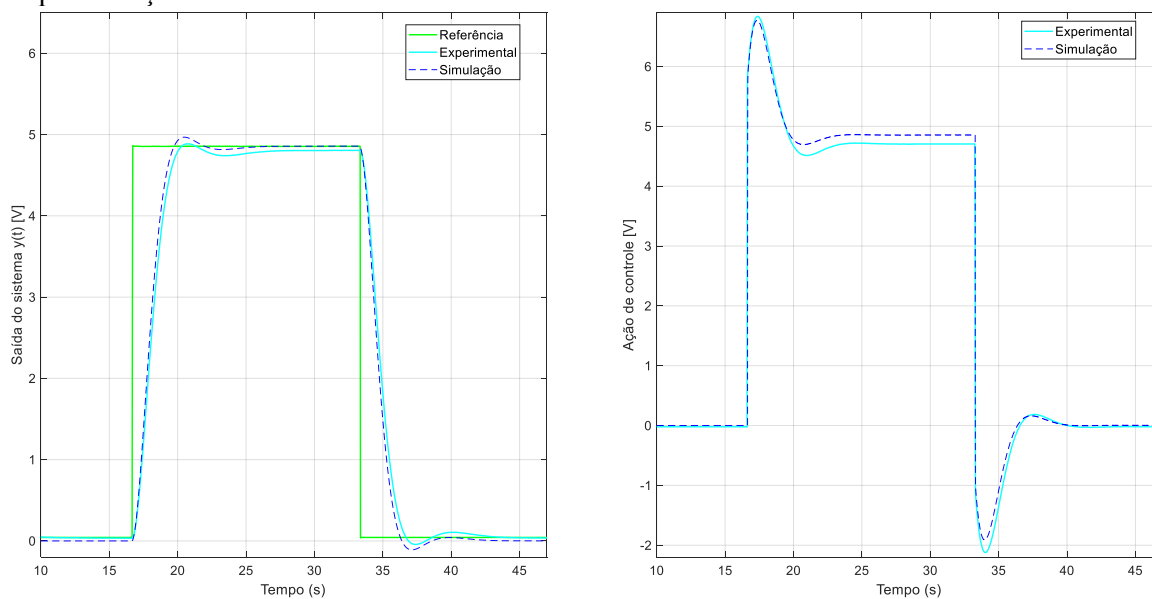


Tabela 1. Comparativo dos índices de performance entre os controladores.

Compensador	Parâmetro	Simulação	Experimental
AvAtF	Sobressinal (%)	2,5	1,7
	Tempo de estabelecimento (s)	5,8	5,2
	Erro em regime (%)	1,0	1,2
	Esforço máximo (V)	5,5	5,8
PI+D	Sobressinal (%)	2,1	1,8
	Tempo de estabelecimento (s)	4,2	4,5
	Erro em regime (%)	0	1,2
	Esforço máximo (V)	6,7	6,8

CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou uma abordagem didática que permite a validação de diferentes técnicas de controle utilizando componentes eletrônicos de baixo custo. Além disso, foram obtidos resultados satisfatórios tanto por simulação, quanto experimentalmente para os controladores PI-D e AvAtF.

Com isso, espera-se que essa abordagem possa ser útil para inspirar outras instituições de ensino para fomentar aulas práticas na área de controle em cursos de Engenharia, oferecendo aos estudantes uma rica experiência de aprendizagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio e suporte financeiro, especialmente à Coordenação de Engenharia Elétrica.

REFERÊNCIAS

- 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.
- Normey-Rico, J. E.; Morato, M. M. Teaching control with basic Maths: introduction to process control course as a novel educational approach for undergraduate engineering programs. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 35, n. 1, p. 41-63, 2024.
- Ogata, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São. Paulo: Prentice Hall, 2010.
- 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.
- Phelan, R. M. Pseudo-Derivative-Feedback (PDF) control. UCRL-51036, Lawrence Radiation Laboratory, University of California at Livermore, CA, 1971.
- 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.
- Souza, C. B. de; Pelz, B. M.; Souza, G. E. R. de; Nunes, W. R. B. M.; Caun, R. da P. Sistema dinâmico duplo RC para síntese e integração do conhecimento da teoria de controle. In: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e Agronomia-CONTECC, 2022. Goiânia. Anais... Goiânia, 2022.
- Vasquez, H.; Kypuros, J.; Villanueva, R. Implementing and validating analog and digital controllers. In: 2008 GSW. American Society for Engineering Education, 2021.
- Wang, J.; Yan, J. D.; Jiang, L. Pseudo-derivative-feedback current control for three-phase grid-connected inverters with LCL filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 31, n. 5, p. 3898-3912, 2015.