

Uma Contribuição Didática Ao Ensino De Sistemas De Controle No Contexto Pandêmico

Samuel Lessinger

Escola Politécnica - Engenharia Elétrica
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil
Email: samulesinger@unisinos.br

Alzenira da Rosa Abaide
CEESP

Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil
Email: alzenira@ufsm.br

Resumo—A Pandemia de COVID-19 forçou mudanças e adaptações na metodologia de ensino em todos os níveis. No contexto das graduações de engenharia, com proibições às atividades práticas, recursos de simulação tiveram que ser utilizados. Neste cenário, o uso de ferramentas *open source* se tornou fundamental para a continuidade das atividades. Este trabalho apresenta uma metodologia de aplicação do *software* Scilab®/Xcos em parceria com simuladores de circuito no ensino de sistemas de controle.

Keywords – Controle, Ensino, Modelagem, Pandemia, Simulação.

I. INTRODUÇÃO

O ano de 2020 ficará marcado como um dos mais complexos na história moderna da humanidade, certamente o impacto desde período modificará as relações de ensino, muito mais rapidamente do que o previsto.

As instituições de ensino em todo mundo foram forçadas com o grande desafio de utilizar recursos virtuais para a implementação de suas atividades. No contexto dos cursos de graduação em engenharia, em especial na área eletroeletrônica, laboratórios com atividades práticas, ficaram vazios [1], [2], [3].

O ensino de Sistemas de Controle mesmo presencialmente e com uso de estrutura de laboratório é complexa, conceitos abstratos exigem do aluno e do professor esforço constante para o processo de ensino e aprendizagem. Ferramentas de simulação são amplamente utilizadas no contexto do ensino de engenharia e sistemas de controle, no entanto as limitações de licenças forçam o uso de *softwares* livres e *open source*, pois os alunos estarão em ambiente remoto [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Após essa introdução apresenta-se a seção de trabalhos correlatos explorando-se aspectos próximos aos desenvolvidos neste trabalho. Na sequência apresenta-se a seção de sistema proposto, implementação, resultados e conclusões.

II. ESTUDOS CORRELATOS

Uma visão geral da complexidade do ensino no contexto da pandemia é apresentada. Em [1], um estudo sobre os profissionais de educação na Indonésia é implementado, revelando que 96% dos entrevistados se sentem confortáveis e preparados para o ensino *online*. Já [2] comenta que o principal desafio é

ensinar os futuros engenheiros a trabalhar e operar *hardware* real não disponível em casa e implementa o conceito *Digital Twin* para equipamentos industriais. Em [3] o impacto do ensino à distância na motivação e na taxa de sucesso dos alunos é discutida. Estes trabalhos focam em aspectos gerais do ensino remoto.

Em [4], aplica o Scilab® em atividades acadêmicas de computação numérica para engenharia, focando-se na facilidade da ferramenta de programação. Já [5], utiliza o Scilab®/Xcos como alternativa a ferramentas de simulação comerciais em especial o Matlab®/Simulink para ensino da teoria de sistemas de controle. Implementa alguns exemplos de aplicação.

Em [6], demonstra-se que o *software* Scilab® é adequado para o ensino de experimentos em eletrônica de potência em laboratório, também tirando vantagem que pode ser usado em plataformas Windows e Linux.

Já [7], mostra um modelo de motor *Stirling* desenvolvido no Scilab, com foco em sua utilização como máquina primária na simulação de geradores elétricos. A modelagem em *software* livre permite que alunos e pesquisadores usem e editem o modelo. Em [8], utiliza-se o Scilab® como auxílio ao estudo da dinâmica de processos em engenharia térmica e nuclear.

Os trabalhos apresentados ilustram o potencial que o Scilab®/Xcos possui como alternativa as ferramentas comerciais existentes. Como consiste em uma ferramenta *open source*, no contexto de ensino remoto, permite a continuidade do processo de ensino e aprendizagem, sem necessitar de qualquer licenças de uso.

Neste trabalho, uma metodologia de introdução ao ensino de sistemas de controle é apresentada. Considerando-se o fechamento de muitos laboratórios de ensino, onde atividades práticas eram realizadas, tais conteúdos precisam ser desenvolvidos com base em simuladores. Neste cenário utiliza-se o Scilab®/Xcos para simulação funcional e simuladores de circuito para comprovação do princípio de funcionamento.

III. SISTEMA PROPOSTO

No contexto de sistemas de controle, as atividades de modelagem e análise das características da planta em estudo estão contidas. Em laboratório, técnicas de identificação podem ser aplicadas para levantamento da dinâmica da planta, contudo em um ambiente de ensino remoto, o aluno fica

impossibilitado de tal alternativa. As tarefas necessárias devem ser aplicadas em ambiente de simulação com aulas remotas.

Tradicionalmente alunos cursando atividades de sistemas de controle, já estão familiarizados com a utilização e comportamento de componentes elementares como resistores, capacitores e indutores. Isso possibilita a adaptação dos conceitos de modelagem para algo usual, mais aplicado ao entendimento prévio do aluno.

Assim, uma topologia em formato de malhas RC acopladas é proposta, visualizada na Figura 1. Nesta topologia, a associação dos elementos desenvolve uma planta cujo comportamento depende das relações entre os elementos $R1$, $R2$, $R3$, $C1$ e $C2$. Observa-se que a planta apresentará um comportamento de atenuação, pela relação entre $R1$, $R2$ e $R3$, o que força a correção do erro estático da planta.

Utilizando-se valores comerciais de componentes eletrônicos, pode-se variar os resistores entre centenas de Ohms até algumas dezenas de kohms, valores típicos de capacitores na ordem de centenas de nanofarads até alguns poucos microfaraads.

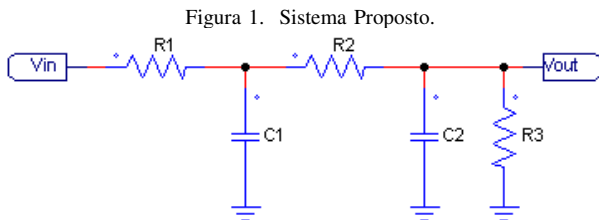


Figura 1. Sistema Proposto.

Autores.

Ao considerar o sinal V_{in} como entrada da planta e o sinal V_{out} como saída da planta, aplica-se os conceitos de modelagem, onde uma função de transferência genérica representará a planta. Desta forma, um sistema genérico como visto na Figura 2 é modelado pelo aluno.

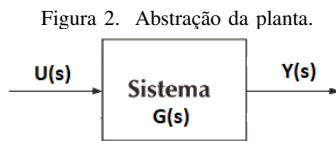


Figura 2. Abstração da planta.

Autores.

A topologia apresentada na Figura 1 é modelada consistindo-se na planta exibida na Figura 2 e será controlada a partir da elaboração de um sistema de controle em malha fechada, conforme exposto na Figura 3.

Desde ponto em diante, o aluno possui os subsídios necessários para o entendimento do processo de modelagem e análise de sistemas de controle. Naturalmente, as especificações requeridas em malha fechada não serão atendidas pelo sistema original em malha aberta, necessitando-se de projeto adequado do controlador visualizado na Figura 3.

Neste caso pode-se aplicar, o projeto de compensadores de avanço ou atraso de fase, utilizando-se a resposta em frequência como ferramenta de projeto. A resposta em frequência

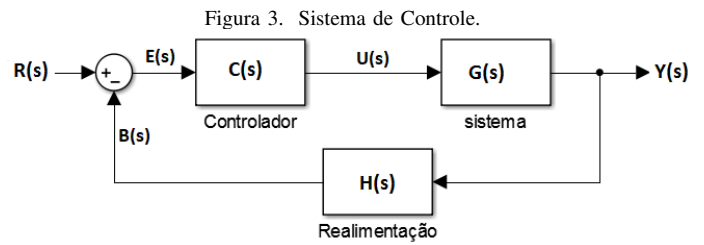


Figura 3. Sistema de Controle.

Autores.

fornece informações sobre a estabilidade, a resposta transiente e o erro estático do sistema, como por exemplo. As margens de ganho e fase podem ser analisadas e modificadas.

A margem de ganho é a variação de ganho que pode ser aplicada, na curva de módulo em malha aberta, até que o sistema alcance a estabilidade crítica. A margem de fase é a diferença de fase existente no sistema em malha aberta, entre a fase do sistema e o ângulo de 180° , avaliado na frequência em que a curva de módulo apresenta valor unitário (0 dB). [10], [11]. Como apresentado na Figura 4, utilizando-se a resposta em frequência de malha aberta da planta, sintetiza-se o controlador.

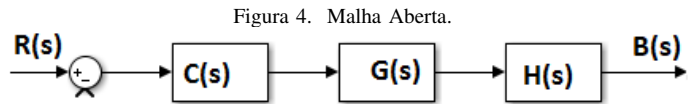


Figura 4. Malha Aberta.

Autores.

O objetivo do compensador de atraso, é a melhora da constante de erro estático, aumentando-se o ganho nas baixas frequências sem resultar em instabilidade, além de modificar a margem de fase do sistema obtendo-se a resposta transitória desejada [10], [11]. Assim, o ganho do sistema em baixa frequência pode ser elevado para obter-se um pequeno erro estático sem criar instabilidade. Este efeito estabilizante acontece porque o ganho em 180° é reduzido abaixo de 0 dB.

O compensador de avanço de fase aumenta a largura de banda, através do incremento da frequência de cruzamento em 0 dB [10], [11]. O resultado é um aumento na margem de fase e redução do sobressinal. Tanto o compensador de atraso de fase, como o de avanço de fase podem ser genericamente representados pela Equação 1. Na Equação 1 o parâmetro β representa o afastamento entre o zero e o polo da função de transferência. O parâmetro T a constante de tempo do compensador. Ajustando-se a curva de magnitude para interceptar 0 dB na margem de fase desejada, alcança-se tanto o erro estático desejado como a resposta transitória.

$$G_c(s) = \frac{1}{\beta} \frac{s + 1/T}{s + 1/\beta T} \quad (1)$$

IV. IMPLEMENTAÇÃO

Como exemplo de implementação didática aplica-se na topologia apresentada na Figura 1 os valores dos componentes listados na Tabela I. Naturalmente outros valores podem ser

aplicados considerando-se a quantidade de alunos na turma, os trabalhos podem ser em grupos ou individual.

Tabela I
VALORES DE COMPONENTES.

Item	Valor
R1	10 kΩ
R2	10 kΩ
R3	15 kΩ
C1	1 μF
C2	1 μF

Autores.

A aplicação de tais valores desenvolve a Equação 2 que representa a função de transferência da topologia apresentada na Figura 1. Nesta etapa o aluno aplica os conceitos de modelagem de sistemas, para desenvolver uma representação matemática que descreve o sistema.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{10000}{s^2 + 366,7s + 23333,3} \quad (2)$$

Considerando-se o cenário de aulas remotas, alunos sem acesso regular a estrutura de ensino, o uso de ferramentas e pacotes usuais de *softwares* como Matlab®, Maple® e Mathcad® não torna-se possível, pois tais licenças de uso encontram-se apenas nas instituições de ensino. O uso de ferramentas livres torna-se essencial.

O Scilab® é um *software* livre e *open source* para aplicações em engenharia e ciência. Modelador e simulador de sistemas dinâmicos em domínio de tempo discreto e contínuo. Xcos é um editor gráfico para projetar modelos de sistemas dinâmicos híbridos. Os modelos podem ser projetados, carregados, salvos, compilados e simulados [9].

Utilizando-se o Scilab® o aluno pode traçar o diagrama de Bode do sistema, recém modelado, verificando-se seu comportamento conforme Figura 5.

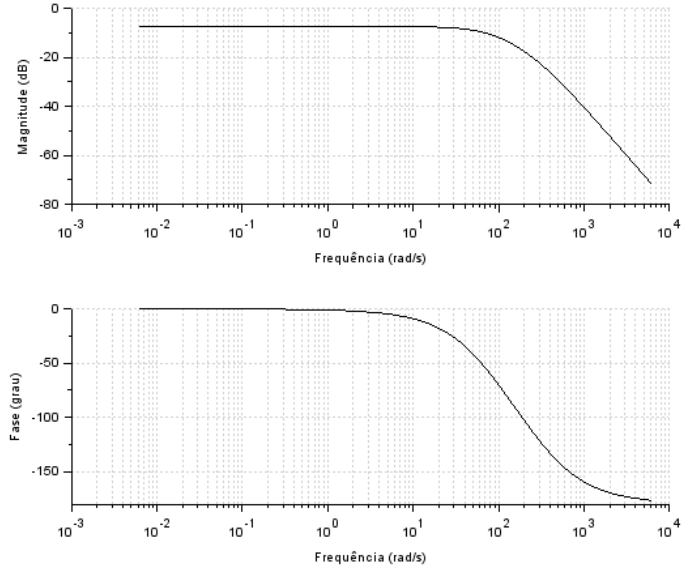
A análise pelo aluno do sistema em estudo, representado pelo diagrama de Bode, demonstra que a planta apresenta características de passa baixa. Também está presente uma atenuação para o sinal de entrada.

Um conjunto de especificações prévias podem ser fornecidas pelo professor como desafio para o aluno, de modo a guiar o desenvolvimento. Neste caso, vamos supor que deseje-se um erro em regime permanente de 5 % e um sobressinal máximo de 5 % para o sistema em malha fechada. Sugere-se utilizar um compensador de avanço, permitindo-se corrigir as características transitórias e o erro especificado.

Um sobressinal de 5 % requer um fator de amortecimento (ξ) de 0,69, implicando-se em uma margem de fase de 64,62°. Considerando-se que o sistema compensado em ganho para atender o erro estático terá uma margem de fase de 31,59°, o avanço em fase fornecido pelo compensador (ϕ_m) será de 38,16°, o ganho necessário para atender o erro estático será de 44,33 vezes. Segue um exemplo didático de implementação, onde considera-se uma folga em fase de 5,13° para o compensador [10], [11].

$$\phi_m = 64,62^\circ - 31,59^\circ + 5,13^\circ = 38,16^\circ \quad (3)$$

Figura 5. Diagrama de Bode da Planta.



Autores.

$$\beta = \frac{(1 - \sin(38,16^\circ))}{(1 + \sin(38,16^\circ))} = 0,2362 \quad (4)$$

A adição do compensador de avanço de fase, altera a curva de magnitude já ajustada. Para corrigir essa influência o ganho extra do compensador $|G_c(j\omega_{max})|$ deve ser eliminado. A determinação do ganho extra do compensador é descrito pela Equação 5.

$$|G_c(j\omega_{max})| = \frac{1}{\sqrt{\beta}} = \frac{1}{\sqrt{0,2362}} = 2,058 \quad (5)$$

Ajusta-se o compensador de avanço de modo que sua máxima contribuição de fase ocorra na mesma frequência em que seu módulo é corrigido. A Equação 6 determina a frequência (ω_{max}) em que o compensador de avanço aplicará a máxima contribuição de fase (ϕ_m) ao sistema. Essa frequência é de $\omega = 932,2$ rad/s para o sistema e será o novo ponto de 0 dB.

$$\omega_{max} = \frac{1}{2,058} = \frac{443300}{\sqrt{\omega^2 + 81,95^2} \cdot \sqrt{\omega^2 + 284,72^2}} \quad (6)$$

Na Equação 7 a constante de tempo do compensador T será determinada, com base nos parâmetros anteriormente calculados.

$$T = \frac{1}{\omega_{max}\sqrt{\beta}} = \frac{1}{(932,2 \cdot \sqrt{0,2362})} = 0,002207 \quad (7)$$

Assim prossegue-se com a alocação do zero e do polo do compensador nas Equações 8 e 9 respectivamente.

$$Z_{cav} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,002207} = 453,1 \quad (8)$$

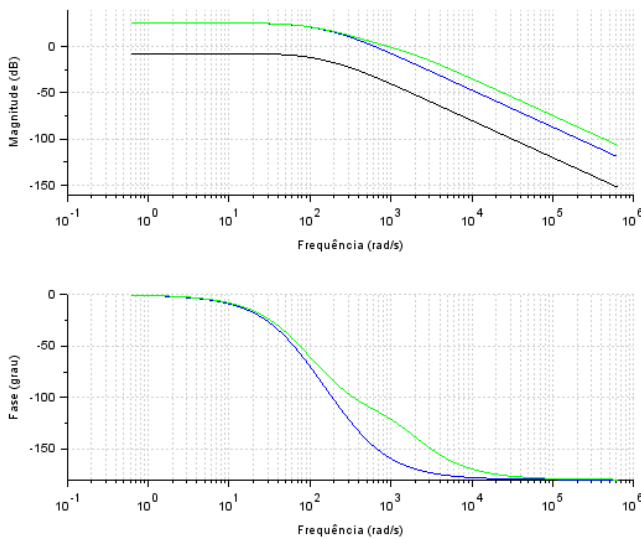
$$P_{cav} = \frac{1}{\beta T} = \frac{1}{(0,2362.0,002207)} = 1918,31 \quad (9)$$

Considerando-se ganho unitário, para não alterar o ajuste de ganho já realizado, a função de transferência do compensador de avanço é descrita na Equação 10.

$$G_{cav}(s) = \frac{4,23(s + 453,1)}{(s + 1918,31)} \quad (10)$$

Visualiza-se na Figura 6 o diagrama de bode para a malha aberta do sistema original em preto, o sistema compensado em ganho em azul e o sistema compensado em avanço de fase em verde.

Figura 6. Diagramas de Bode da Solução.



Autores.

Ao verificar a solução em nível de sistema, o segundo passo consiste na síntese do compensador como uma topologia de circuito. Desta forma, em paralelo a simulação funcional, uma simulação em ambiente de circuito eletrônico é realizada, ilustrando-se ao aluno que compensadores em sistemas de controle podem ser fisicamente implementados. Na Figura 7 um exemplo típico é apresentado, sua função de transferência é exibida na Equação 11.

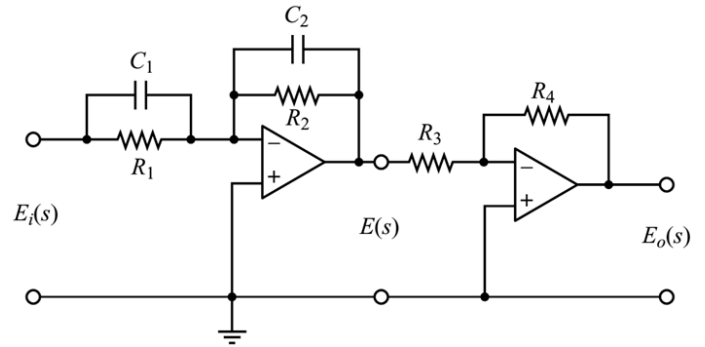
$$\frac{Eo(s)}{Ei(s)} = \frac{R_4 C_1 (s + \frac{1}{R_1 C_1})}{R_3 C_2 (s + \frac{1}{R_2 C_2})} \quad (11)$$

A realimentação pode ser implementada pelo circuito apresentado na Figura 8, constituindo-se de um amplificador diferencial [12]. Nesta topologia, V_2 será o sinal de referência, V_1 o sinal de realimentação e V_o será o sinal de erro que entrará no compensador.

Uma possível síntese do controlador de avanço de fase, pode ser realizada seguindo-se os passos na sequência, onde arbitrando-se C_1 e C_2 em $1 \mu F$, temos:

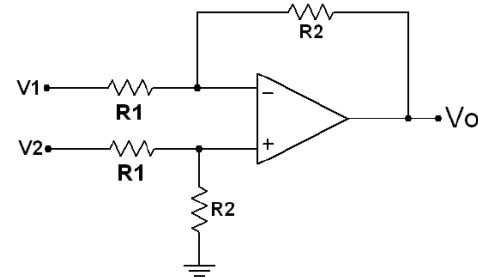
Cálculo de R_1 do compensador (zero):

Figura 7. Circuito genérico para o compensador.



Adaptado de [10].

Figura 8. Circuito amplificador diferencial.



Adaptado de [12].

$$Z_{cav} = \frac{1}{R_1 C_1} = 453,1 \quad (12)$$

$$R_1 = \frac{1}{(453,1 \cdot 1.1e^{-6})} = 2207 \Omega \quad (13)$$

Cálculo de R_2 do compensador (polo):

$$P_{cav} = \frac{1}{R_2 C_2} = 1918,31 \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{1}{(1918,31 \cdot 1.1e^{-6})} = 521,3 \Omega \quad (15)$$

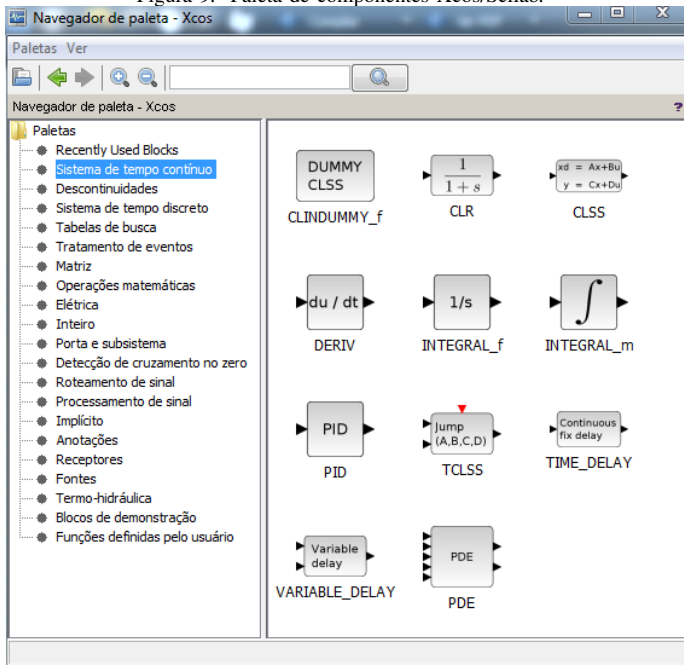
De modo a manter o ganho unitário, pode-se fazer $R_1=R_4$ e $R_2=R_3$. O ganho para garantir-se o erro estático será realizado no circuito amplificador diferencial, assim $R_1=1000 \Omega$ e $R_2=44330 \Omega$ no circuito da Figura 8. Naturalmente os valores podem ser modificados, aqui indicando-se uma referência de implementação.

V. RESULTADOS

No contexto de simulação e verificação dos resultados do procedimento de projeto anterior, a simulação em ambiente Xcos/Scilab® é possível. Na Figura 9 apresenta-se os componentes em nível de blocos funcionais que estão disponíveis para a construção dos modelos de simulação.

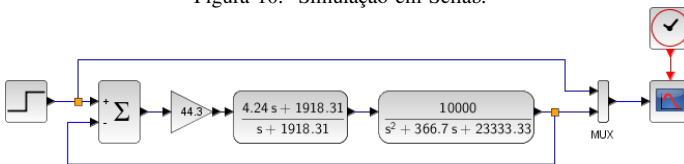
A partir de tais blocos funcionais o modelo de simulação implementado é apresentado na Figura 10, o aluno aplica os conceitos de modelagem e controle de sistemas.

Figura 9. Paleta de componentes Xcos/Scilab.



Autores.

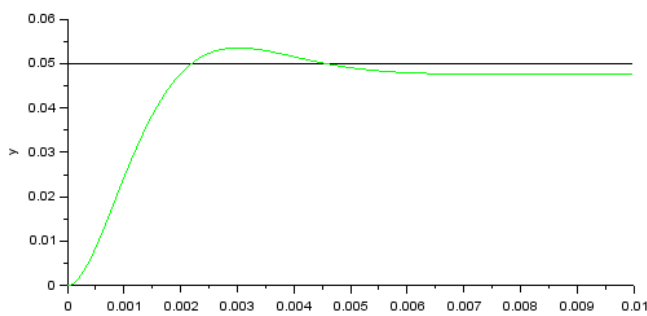
Figura 10. Simulação em Scilab.



Autores.

O resultado da simulação em malha fechada é apresentado na Figura 11, ilustrando-se a resposta ao degrau. Utiliza-se uma entrada de referência de 50 mV para exemplificar o funcionamento e permitir comparação com a implementação em simulação de circuitos. Verifica-se que a saída apresenta sobressinal superior ao especificado, indicando que o aluno necessitará reprojeter o controlador, uma interação lúdica é iniciada.

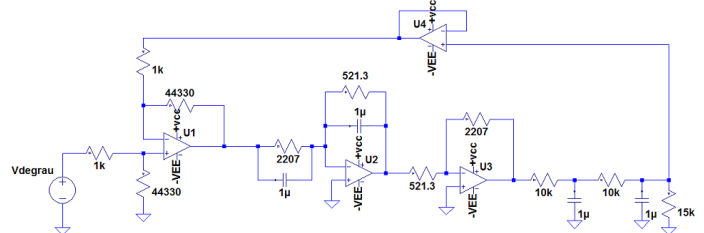
Figura 11. Resposta em malha fechada.



Autores.

A implementação da topologia de circuito para o controlador pode ser implementada em um simulador de circuitos de preferência do aluno. Neste caso, como exemplo utiliza-se o simulador LTspiceIV® que é até o momento deste trabalho disponibilizado gratuitamente. No entanto outros podem ser usados. Apresenta-se na Figura 12 a implementação da solução em ambiente de simulação em circuitos.

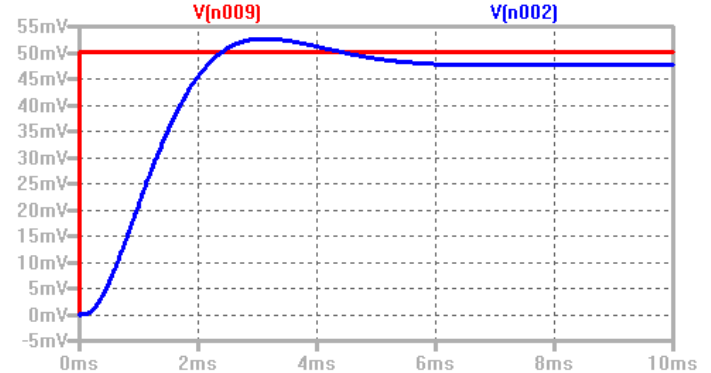
Figura 12. Simulação em ambiente de circuitos.



Autores.

Na Figura 13 ilustra-se a resposta ao degrau, utilizando-se uma entrada de referência de 50 mV para exemplificar o funcionamento e permitir comparação com uma possível implementação real. Verifica-se que a saída, apresenta o mesmo comportamento da simulação em ambiente de blocos funcionais da Figura 11.

Figura 13. Resposta em ambiente de circuitos.



Autores.

A interação entre as duas ferramentas distintas, simulação da lógica com blocos funcionais e simulação da topologia de circuitos, auxilia na interação do processo de ensino. O aluno visualiza a modificação do comportamento original da planta e realiza a síntese do compensador como uma estrutura física.

No momento em que existem restrições a realização de atividades práticas em laboratório, o uso de simulação se torna o caminho natural para consolidar os conceitos das atividades de sistemas de controle.

VI. CONCLUSÃO

Esta metodologia permite ao aluno um primeiro contato com as tarefas de modelagem, análise e desenvolvimento de sistemas de controle, auxiliando-se no processo de ensino e aprendizagem. Os resultados em sala de aula remota ao longo do ano de 2020 foram satisfatórios.

O aluno em ambiente remoto, muitas vezes com limitados recursos de conexão, interage em ambiente de simulação. O conjunto de ferramentas utilizadas, blocos funcionais no Xcos/Scilab® e simulação de circuitos, possibilita visualizar o comportamento lógico e funcional das topologias de compensadores. O aluno visualiza que um sistema de controle é uma estrutura aplicável na tarefa de modificar o comportamento original de uma planta ou processo.

Outras ferramentas livres podem ser exploradas, mas a utilização do ambiente Xcos/Scilab® tem se mostrado de fácil absorção pelos alunos, uma vez que um ambiente gráfico facilita a interação.

A metodologia apresentada neste trabalho é genérica o suficiente para ser estendida fora do contexto pandêmico, no gradual retorno das atividades práticas, uma grande contribuição ao aprendizado poderia ser a síntese física das estruturas em bancada, de maneira a aumentar a absorção dos alunos pelos conceitos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1] D. F. Murad, R. Hassan, Y. Heryadi, B. D. Wijanarko and Titan, "The Impact of the COVID-19 Pandemic in Indonesia (Face to face versus Online Learning),"2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), Surabaya, Indonesia, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243202.
- [2] L. Rassudov and A. Korunets, "COVID-19 Pandemic Challenges for Engineering Education,"2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Saint Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249285.
- [3] M. Konecki, "Impact of Distance Learning on Motivation and Success Rate of Students During the COVID-19 Pandemic,"2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Opatija, Croatia, 2020, pp. 813-817, doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245406.
- [4] W. Liao, N. Dong and T. Fan, "Application of Scilab in teaching of engineering numerical computations,"2009 IEEE International Workshop on Open-source Software for Scientific Computation (OSSC), Guiyang, 2009, pp. 88-90, doi: 10.1109/OSSC.2009.5416862.
- [5] W. Liao, N. Dong and T. Fan, "The application of Scilab/Scicos in the lecture of automatic control theory,"2009 IEEE International Workshop on Open-source Software for Scientific Computation (OSSC), Guiyang, China, 2009, pp. 85-87, doi: 10.1109/OSSC.2009.5416865.
- [6] B. P. Meneses, M. T. S. Quixadá, J. C. T. Campos and L. L. N. dos Reis, "Simulation of converters using Scilab/Scicoslab,"XI Brazilian Power Electronics Conference, Praiamar, 2011, pp. 1032-1036, doi: 10.1109/COBEP.2011.6085233.
- [7] R. Cordero, T. Estrabis, J. Onofre, F. A. Monteiro and A. Hayashi, "Modeling and Simulation of a Stirling Engine in SCILAB,"2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brazil, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065378.
- [8] E. I. Merzlikina and O. G. Prochina, "Laboratory Works on Control Theory Using Scilab/Xcos,"2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111704.
- [9] <https://www.scilab.org/> - Acesso em 28/01/2021.
- [10] OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5ªed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [11] NISE, Norman S. Engenharia de Sistemas de Controle. 5ªed. Rio de Janeiro: LTC,2011.
- [12] PERTENCE JÚNIOR, Antonio. Eletrônica analógica:amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório. 6ª edição. Porto Alegre:Bookman, 2003