



# Propostas de Experiências de Baixo Custo para o Ensino de Graduação na Área Controle

Autor: Anderson Santos Silva  
Orientador: Matheus Souza

**Resumo**—O principal objetivo deste trabalho é propor novos experimentos para disciplinas de controle afim de aumentar a autonomia dos estudantes no laboratório por meio da redução do uso de equipamentos educacionais, que têm altos custos de compra e de manutenção. Além de promover a autonomia dos estudantes e de exigir o conhecimento de áreas como computação e eletrônica, espera-se que estas novas experiências incentivem os estudantes a desenvolverem os seus próprios projetos. O projeto teve seu início no regime presencial de ensino (pré-pandemia) e foi continuado a distância, então, como não foi possível ter acesso a alguns itens necessários para o desenvolvimento da parte física do projeto, adaptamos os conceitos que gostaríamos de trabalhar com plantas físicas e circuitos elétricos, para simulações computacionais em softwares que simulam circuitos elétricos e sistemas de controle, sem perder dessa forma o norte do projeto, e ainda, possibilitando que os projetos laboratoriais abordados neste trabalho possam ser empregados nas disciplinas de controle em regime emergencial.

## I. INTRODUÇÃO

Como o controle e a automação estão diretamente ligados a inúmeras aplicações em engenharia, a proposição de experimentos que despertem o interesse de alunos por estas áreas pode contribuir fortemente para a formação de novos engenheiros. A proposição de roteiros para projetos práticos ou experiências em laboratórios, no entanto, pode ser desafiadora, pois estes devem ser suficientemente abrangentes para que sejam consideradas diversas técnicas de projeto normalmente vistas nos cursos teóricos da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

Na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da UNICAMP, conceitos de análise e de controle de sistemas dinâmicos fazem parte do final da formação profissional dos alunos dos cursos de Engenharia Elétrica e de Engenharia de Computação (Modalidade Sistemas e Processos Industriais). Estes tópicos estão distribuídos em quatro disciplinas, sendo duas teóricas – EA616 (Análise Linear de Sistemas) e EA721 (Princípios de Controle e Servomecanismos) – e duas práticas – EA619 (Laboratório de Análise Linear) e EA722 (Laboratório de Controle e Servomecanismos). Estes pares de disciplinas são complementares no seguinte sentido:

os principais conceitos e técnicas estudados em sala de aula nas disciplinas teóricas são revisitados nos laboratórios para o desenvolvimento de experiências simples.

As plantas usadas nos laboratórios da FEEC são fornecidas pela empresa americana *Educational Control Products* (ECP) [1]. Também cabe destacar a fornecedora canadense *Quanser*, outra empresa que atua no desenvolvimento de plataformas de ensino e de pesquisa em controle [2]. Os preços de equipamentos destes fornecedores custam dezenas (e, em alguns casos, mais de uma centena) de milhares de dólares e, além disso, muitos dos equipamentos exigem *softwares* com licenças pagas para serem utilizados nos laboratórios.

Alternativas a estas plataformas de ensino vêm sendo investigadas em diversas escolas de engenharia. Na FEM/UNICAMP, é comum que alguns alunos de Engenharia de Controle e Automação desenvolvam plantas simples para ensino em seus trabalhos de fim de curso. O desenvolvimento destas plantas custa, normalmente, algumas centenas de reais. No *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), pequenos veículos aéreos não-tripulados (VANTs ou *drones*) são utilizados como principal ferramenta prática de ensino de controle [3]. Estes drones, os *rolling spiders*, podem ser adquiridos por um custo extremamente menor (USD 60,00) do que o valor das plataformas utilizadas na FEEC.

As vantagens de utilizar plantas alternativas, como queremos propor, vão além do menor custo. O desenvolvimento de plantas de ensino envolve diversos ramos da engenharia e contribui para a formação geral dos alunos envolvidos. Ademais, plantas mais modernas ou mais desafiadoras podem ser consideravelmente mais motivadoras para a maioria dos alunos. A integração destas plantas a circuitos eletrônicos, microcontroladores ou a ambientes de programação é ainda outro desafio multidisciplinar que torna os experimentos mais realistas do que aqueles baseados em soluções prontas. Além disso, plantas de baixo custo concedem aos alunos autonomia, pois estes conseguem com mais facilidade para obter empréstimo dos materiais (não é permitido empréstimo ou utilização sem supervisão das plantas atuais) ou mesmo sua

aquisição, podendo desta forma, desenvolver projetos sem depender do ambiente laboratorial da faculdade. No desenvolvimento do projeto, nos concentramos em utilizar recursos de baixo custo, softwares e simuladores de acesso simples e gratuito para tornar nossa proposta viável.

## II. MÉTODO

O trabalho foi dividido em duas grandes partes: mapear e estudar os conceitos e softwares que deveriam ser abordados pelos experimentos; elaborar os experimentos e seus roteiros experimentais. O projeto se baseou fortemente no livro do Franklin [4], Geromel [5] e nas notas de aula do professor Matheus Souza, para a área de controle, para os conceitos de eletrônica o livro texto utilizado foi o Sedra [6]. A implementação da parte de sistemas embarcados foram baseadas em conceitos abordados no curso EA871 - Laboratório de Programação Básica de Sistemas Digitais, ministrada na FEEC. Os softwares utilizados são de fácil acesso, uso simples e possuem licenças de estudante concedidas pela Unicamp, todos podendo ser utilizados nas máquinas pessoais dos alunos. Utilizamos neste projeto: Matlab [7], Orcad [8](que pode ser tranquilamente substituído pelo QUCS [9] ou Pspice [10]) e Atmel Studio [11].

## III. RESULTADOS

Abaixo estão descritos os experimentos que foram implementados neste trabalho e os conceitos dos domínios de engenharia que abordam. Os relatórios contendo a teoria, as questões e o passo a passo das implementações, foram entregues em anexo, junto com o envio do Relatório Final, à banca avaliadora e depois de avaliado estará disponível.

### • Obtenção dos parâmetros e modelagem do motor de corrente contínua

Neste experimento, o aluno trabalhará os conceitos de Transformada de Laplace para modelar o motor de CC; utilizará programação de sistemas embarcados com linguagem C (utilizando o processador Atmega328 do Arduino UNO) abordando conceitos complexos como temporização, interrupção, comunicação serial e PWM para obter a velocidade instantânea do motor; utilizará o Matlab para tratar os dados amostrados e obter a curva de velocidade instantânea e por fim, utilizará os conceitos de Circuitos Elétricos e Máquinas Elétricas para identificar os parâmetros pertencentes a modelagem. Na Figura 1 podemos visualizar a montagem utilizada para a modelagem e na Figura 2 temos o comportamento do modelo e da planta física.

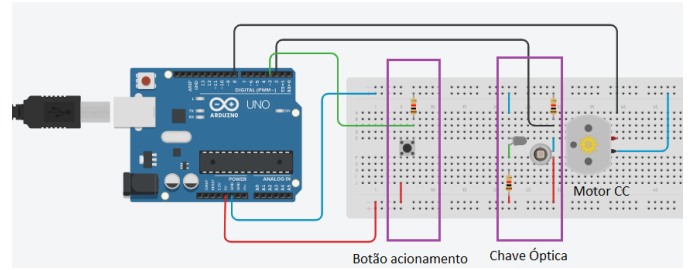


Figura 1. Esquema utilizado para medidas de velocidade Motor DC - Produzido no Tinkercad [12]

Função de transferência de primeira ordem obtida pela modelagem:

$$T(s) = \frac{0,008289}{[1,649 \times 10^{-5}s + 7,97 \times 10^{-5}]} = \frac{829,89}{1,649s + 7,97} \quad (1)$$

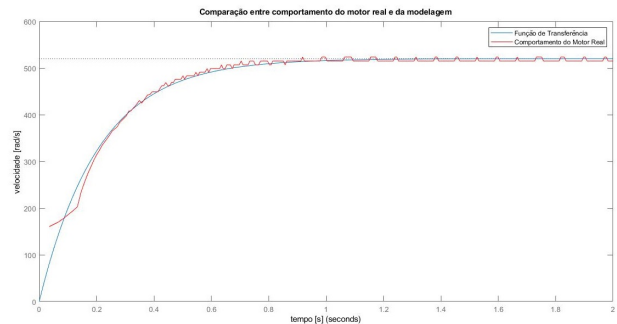


Figura 2. Resposta ao degrau da função de transferência modelada em Azul e em Vermelho a resposta do motor físico.

### • Implementação dos controladores Proporcional e Proporcional Integral

Neste experimento, após a modelagem, o aluno implementará usando Matlab, dois tipos de controladores, observando os efeitos causados pela escolha de ganhos nos dois casos. Objetivo desse experimento, é familiarizar os alunos a um dos controladores mais fundamentais e importantes, entendendo, o que cada parâmetro agrega ao projeto e suas limitações.

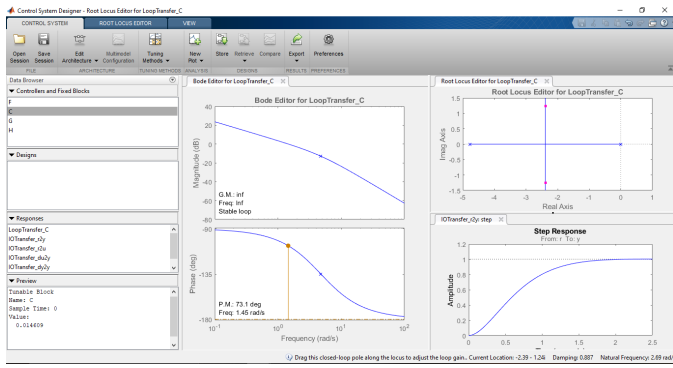


Figura 3. Janela aberta pelo comando sisotool no Matlab, onde é possível realizar análise sobre o diagrama de bode (janela esquerda), resposta ao degrau (janela inferior direita) e lugar das raízes; com objetivo de observar o comportamento do sistema como variação dos seus parâmetros.

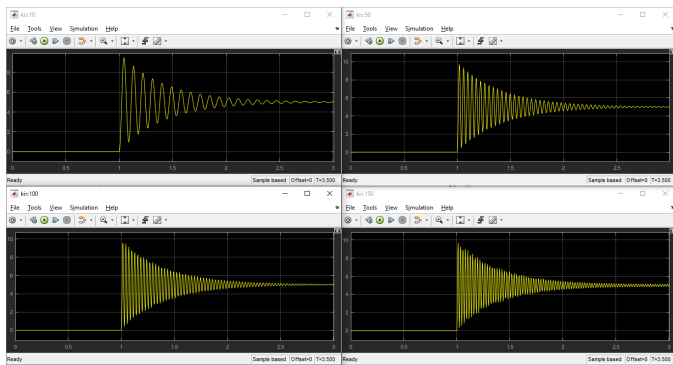


Figura 4. Análise do comportamento em malha fechada para 4 valores de  $k_i$  distintos. Superior esquerdo  $k_i = 10$ , superior esquerdo  $k_i = 50$ , inferior esquerdo  $k_i = 100$  e inferior direito  $k_i = 150$

• **Modelagem de Circuito Eletrônico com Cascata de Amplificadores Operacionais [5] [13];**

Neste experimento, modelamos um circuito eletrônico com 4 amplificadores operacionais (Figura 5), capacitores e resistores acoplados, de forma a obter uma função de transferência de quarta ordem. Esse experimento trabalha com conceitos de eletrônica básica e modelagem.

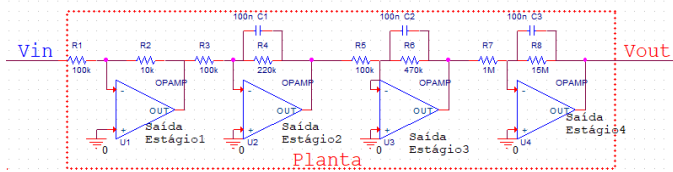


Figura 5. Cascata de Amplificadores Operacionais de ordem 3 montada no Orcad.

• **Controladores Atraso, Avanço e Atraso-Avanço**

Neste experimento, que pode ser dividido em três (um para cada controlador), trabalhamos com os conceitos relacionados à resposta em frequência da planta e a

métodos de controle usando diagramas de Bode. Primeiro, utilizando o modelo que obtemos da cascata de amplificadores e sua a função de transferência obtida, implementamos no Matlab um controlador do tipo atraso, e em seguida implementamos o controlador com circuito eletrônico correspondente, no QUCS [9]/Orcad [10]. Os outros dois controladores seguem os mesmos precedimentos. Esses experimentos exercitam, além dos conceitos de controle e eletrônica, a prática de um projeto: limitações e saturação dos componentes, suas respostas reais e as ponderações que são necessárias para que a implementação física se aproxime do projeto idealizado e satisfaça as especificações. Na Figura 6 podemos observar como a planta modelada e os controladores são dispostos.

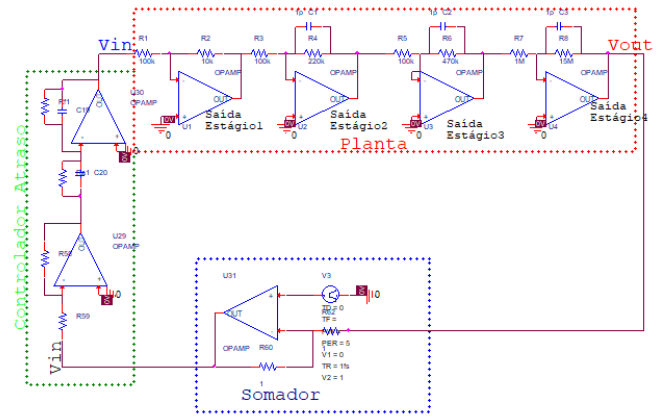


Figura 6. Circuito que contém o controlador Atraso (dois AmpOp's na vertical), a cascata que estamos usando como planta (horizontal encima) e um somador(embaixo).

IV. CONCLUSÃO

Para desenvolver a primeira parte do projeto, foi necessário um investimento de 70 reais, para compra do Arduino UNO e da Protoboard. A Faculdade de Engenharia Elétrica tem esses componentes à disposição dos discentes para empréstimo e também disponibiliza os demais componentes (resistores, motor DC, chave óptica, push-botom, etc) como itens de consumo, ou seja, é possível obter todos os recursos necessários dentro da instituição. Além disso, com exceção do Matlab, os softwares que estão sendo utilizados para a realização dos experimentos podem ser obtidos gratuitamente no site das empresas desenvolvedoras; no caso do Matlab, a Unicamp possui um contrato com a empresa, e os computadores da FEEC são equipados com o software. De qualquer forma, o Matlab poderia ser facilmente substituído por alternativas gratuitas como Octave ou Scilab.

Surgiram duas discussões interessantes durante a análise dos dados de projeto e os resultados obtidos pelos simuladores de circuitos. Apesar da teoria de controle ser a mesma para as respostas obtidas no Matlab e nos simuladores, os softwares partem de referências distintas, o que pode gerar resultados semelhantes porém não iguais. A maior divergência entre os

gráficos que foram obtidos, são a escala de tempo. Enquanto Matlab/Simulink/Sisotool nos ofereciam respostas tinham ordem de segundos, os simuladores de circuitos ofereciam respostas na base de milissegundos. Além disso, encontramos um problema na implementação do último controlador, nos simuladores de circuitos elétricos: enquanto no Qucs a resposta do que foi projetada coincidiu com o que esperávamos no projeto teórico e na implementação com Matlab, no Orcad, não conseguimos a mesma resposta. Ainda estamos estudando o que pode ter acontecido, porém para fins de validação, utilizamos a resposta que obtivemos no Qucs para concluir o relatório que guiará o docente. Estes são os pontos que consideramos importantes a serem pensados e melhorados quando o material for posto em uso.

Por fim, constatamos que é possível abordar os conceitos que hoje são necessários no ensino de controle, a nível de graduação, com um custo inferior 80 reais por aluno, para a instituição. Além disso, de acordo com as novas diretrizes do MEC para cursos de graduação em engenharia e tecnologia [14], se faz necessário que disciplinas tenham mais interdisciplinaridade entre as diferentes áreas do conhecimento e sejam mais propositivas por parte dos alunos, que os estimulem a projetar e desenvolver mais. Uma última observação é que com a pandemia, e as disciplinas adaptadas para o ensino a distância, foi necessário também adaptar os laboratórios, o nosso projeto se tornou ainda importante com essa nova realidade, já que permite a intersecção entre várias áreas do conhecimento, é possível de ser ministrado a distancia, e ser executado pelos discentes em suas próprias casas. Esta é, na nossa opinião, uma das principais contribuições das alterações propostas, neste projeto, à disciplina.

#### REFERÊNCIAS

- [1] [Http://www.ecpsystems.com/](http://www.ecpsystems.com/). Acessado em: 24/03/2019.
- [2] [Http://www.quanser.com/](http://www.quanser.com/). Acessado em: 24/03/2019.
- [3] [Http://fast.scripts.mit.edu/dronecontrol/](http://fast.scripts.mit.edu/dronecontrol/). Acessado em: 24/03/2019.
- [4] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. B. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*. Reading, MA: Addison Wesley, 1994.
- [5] J. C. Geromel and R. H. Korogui, *Controle Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, Ensaios Práticos e Exercícios*. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2011.
- [6] A. S. Sedra, D. E. A. S. Sedra, K. C. Smith, and K. C. Smith, *Microelectronic circuits*. New York: Oxford University Press, 1998.
- [7] [Https://fr.mathworks.com/products/matlab/student.html](https://fr.mathworks.com/products/matlab/student.html). Acessado em: 17/06/19.
- [8] [Https://www.orcad.com/orcad-academic-program](https://www.orcad.com/orcad-academic-program). Acessado em: 15/03/19.
- [9] [Https://sourceforge.net/projects/qucs/](https://sourceforge.net/projects/qucs/). Acessado em: 17/04/2020.
- [10] [Https://www.pspice.com/academic-user](https://www.pspice.com/academic-user). Acessado em: 17/06/2020.
- [11] [Https://www.microchip.com/mplab/avr-support/atmel-studio-7](https://www.microchip.com/mplab/avr-support/atmel-studio-7). Acessado em: 27/10/2019.
- [12] [Https://www.tinkercad.com/](https://www.tinkercad.com/). Acessado em: 15/10/2019.
- [13] [Http://www.fem.unicamp.br/grace/experiencia02.pdf](http://www.fem.unicamp.br/grace/experiencia02.pdf). Acessado em: 17/04/2020.
- [14] [Https://abmes.org.br/arquivos/legislacoes/Resolucao-CNE-CES-002-2019-04-24.pdf](https://abmes.org.br/arquivos/legislacoes/Resolucao-CNE-CES-002-2019-04-24.pdf). Acessado em: 05/01/2020.