

Uso de documentos interativos no Matlab para o ensino de sistemas de controle

Celso Jose Munaro * Moacir Rosado Filho **

* Departamento de Engenharia Elétrica, UFES, (e-mail: celso.munaro@ufes.br).

** Departamento de Matemática, UFES, (e-mail: moacir.rosado@ufes.br)

Abstract: One of the current challenges is to motivate students and, at the same time, update teaching methodologies in order to take advantage of the resources available in computational tools. This article presents control teaching methodologies based on the use of interactive documents, which bring together contents, code, results of code execution, graphic elements, and links to contents external to the document. Proposals are presented that motivate and challenge learning, making the most of existing resources in such environments that make some traditional methods obsolete. Proposals are discussed to support face-to-face teaching of control theory and practices, as well as the proposal for individual study and assessment activities using such environments. The result of the execution of such activities are documents that can be used for study, generation of reports, or serve as a base text for writing scientific articles. A survey carried out with students confirms that such proposals can contribute a lot for control education.

Resumo: Um dos desafios atuais é motivar os estudantes e, ao mesmo tempo, atualizar metodologias de ensino de forma a tirar proveito dos recursos disponíveis nas ferramentas computacionais. Neste artigo são apresentadas metodologias de ensino de controle baseadas no uso de documentos interativos, que reúnem conteúdos, código, resultados da execução de códigos, elementos gráficos, links para conteúdos externos ao documento. São apresentadas propostas que motivam e desafiam o aprendizado, explorando ao máximo os recursos já existentes em tais ambientes que tornam obsoletos alguns métodos tradicionais. Discutem-se propostas para apoio ao ensino presencial de teoria e práticas de controle, bem como a proposta de atividades de estudo e avaliação individual usando tais ambientes. Resultam da execução de tais atividades documentos que podem ser utilizados para estudo, geração de relatórios, ou servir de texto base para escrita de artigos científicos. Uma pesquisa feita com os alunos confirma que tais propostas podem contribuir muito para o ensino de controle.

Keywords: Control education; feedback control; modeling; didactic plants; PID control.

Palavras-chaves: Educação em controle; controle em malha fechada; modelagem; plantas didáticas; controle PID.

1. INTRODUÇÃO

Controle automático tem sido a ferramenta fundamental utilizada em processos de produção para melhorar sua funcionalidade, desempenho e eficiência. Novas áreas de aplicação têm surgido, tais como biomedicina, energia renovável, economia (J.A.Rossiter et al. (2023)). Além disso, atualmente, controle tem sido capaz de abordar novos campos de aplicação que eram impensáveis há tempos atrás, como robótica, veículos autônomos e exploração espacial. Paralelamente a isso, as novas ferramentas e tecnologias computacionais disponíveis, o uso da internet e a natural imersão das novas gerações em um mundo crescentemente permeado por ambientes digitais têm ampliado o foco sobre novas formas de ensino/aprendizagem de disciplinas da área de controle, além da aula didática convencional, que continua tendo papel importante, mas não tanto como era em tempos atrás. Por meio de tais ferramentas, o aluno pode explorar conceitos e aplicações muitas vezes

não adequadamente compreendidos, em virtude do rigor e linguagem matemáticos adotados na teoria. Vários autores têm destacado o papel da teoria de controle em resolver muitos dos futuros desafios da sociedade, e apontado direções para a evolução do trabalho de educação na área de controle (J.A.Rossiter et al. (2023), D. M. Pena and Dormido (2022), J. A. Rossiter and Murray (2018)). O uso de recursos computacionais e ferramentas da internet têm sido abordados por vários autores, como complementação ao processo de ensino/aprendizagem (A. Koch and Allgower (2020), A.Khan and L.Vlacic (2006), A.Eichler et al. (2013), J. C. Gonzalez and Berenguel (2013), A. Vergnaud and Autrique (2015)). De acordo com D. M. Pena and Dormido (2022), o ensino deve se concentrar em orientar o aprendizado dos alunos por meio de orientações coletivas e individuais para que eles possam aprender mais e melhor por si mesmos, para adquirir as habilidades do assunto que está sendo ensinado.

A pandemia de COVID-19 tornou compulsório o uso de novas e inovadoras tecnologias para viabilizar o ensino remoto, e este aprendizado deve ser aproveitado. Soma-se a isto a crescente digitalização da sociedade, que deve se refletir também na digitalização do ensino.

O uso de softwares livres é sempre uma alternativa melhor para ensino. Entretanto, o Matlab pode ser usado de forma online gratuitamente por até 20 horas por mês, com 10 *toolboxes* incluídos. Outra alternativa de baixo custo é o pagamento de 55 USD pelo chamado *MATLAB and Simulink Student Suite*, que inclui o Matlab e Simulink e os *toolboxes* mais utilizados, entre eles o de controle. Caso a instituição adquira a licença *Campus-Wide Access*, o acesso pode ser feito de forma irrestrita por usuários com conta institucional, com acessos via computador ou celular de forma online.

Neste artigo, propõe-se o uso de documentos interativos para o ensino de controle, que, no ambiente do Matlab, são denominados *live scripts*. Esses documentos permitem reunir textos com figuras, equações, links para documentos externos, código e o resultado da execução deste código (figuras, tabelas, valores, etc). Eles são utilizados durante aulas expositivas em substituição aos slides, em aulas práticas permitindo simulação, modelagem e controle de plantas físicas, e para atividades dirigidas e para fins de avaliação de aprendizado. Essa proposta se encaixa nas metodologias de aprendizagem ativa usando estudos de casos, nas quais o estudante revê o conceito, testa seu conhecimento e tem um retorno através do resultado da simulação (M. Hernández-de Menéndez et al. (2019)).

O artigo está organizado da seguinte forma. Na próxima Seção, os recursos dos documentos interativos utilizados são apresentados, destacando suas possibilidades de uso para o ensino de controle. As diferentes formas de integrar plantas físicas aos documentos interativos são discutidas na Seção 3. Na Seção 4, são apresentadas propostas para seu uso em aulas expositivas, aulas práticas, e para a realização de atividades dirigidas individuais. Uma avaliação dos alunos sobre o uso dessa ferramenta é apresentada na Seção 5, seguida das conclusões apresentadas na Seção 6.

2. USO DE DOCUMENTOS INTERATIVOS PARA EXPLORAR CONCEITOS DE CONTROLE

Nesta seção são descritos os recursos que podem ser utilizados nos documentos interativos do Matlab. A versão considerada aqui é a 2019a. Eles envolvem, basicamente, textos, interfaces gráficas, códigos, resultado da execução dos códigos, e *links* para documentos ou vídeos externos. A combinação desses elementos permite uma grande variedade de usos para apresentar e explorar os conceitos de controle. Eles são executados da mesma forma que os scripts e funções, acessando variáveis do *workspace*, porém, o que os diferencia é que os resultados são apresentados todos no documento. Um exemplo é mostrado na Figura 1, e será explorado nas próximas subseções.

O documento é dividido em seções, que podem ser executadas todas juntas ou individualmente, avançando em determinado assunto. O nome de uma seção pode ser automaticamente transformado em uma tabela com os

conteúdos do documento, clicando sobre o ícone “Table of contents”.

Resposta no tempo de sistemas de segunda ordem

Leia o material complementar para mais detalhes sobre os conteúdos utilizados.

Atividade 1 - Efeito do amortecimento sobre a resposta transitória

Seja o modelo do protótipo de segunda ordem dado por $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$, definido pela frequência natural não amortecida ω_n e pelo amortecimento ζ .

Analisaremos agora seu comportamento em malha fechada, dado pela função de transferência $M(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$, como mostrado na Figura 1.

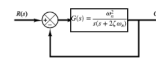


Figura 1

Varie ω_n e o amortecimento ζ e observe a resposta ao degrau resultante. Lembramos que sobrelevação SO se relaciona com o amortecimento ζ pela equação $SO = 100\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$, e para valores pequenos de ζ SO tende a 100%. Por outro lado, o tempo de estabelecimento é aproximado por $t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n}$, $0 < \zeta < 0.9$. Varie o ζ e ω_n nos botões deslizantes abaixo e observe seu efeito na resposta ao degrau unitário, previstos pelas equações dadas.

```
zeta= 0.3 ;
wn= 1 ;
m= f(mw*2, [1 2*zeta*wn wn^2]);
step(m);
```

Figura 1. Exemplo de *live script*

2.1 Recursos disponíveis

Código: Durante a edição do documento, podem-se inserir texto ou código. O código é executado da mesma forma que na linha de comando, porém apresentando todos os resultados (valores, tabelas, figuras, etc) no próprio documento. Os resultados também podem ser apresentados na lateral do documento. Há a opção de ocultar o código, mostrando no documento apenas o texto e os resultados da execução do código. Os botões *Run* e *Run Section* permitem executar todo o código ou apenas a seção atual.

Edição de texto: Pode-se adicionar texto da forma usual com diferentes formatações. Assim, conceitos importantes podem ser resumidos antes da proposta de atividades. No exemplo da Figura 1, o texto foi utilizado para relembrar os conceitos utilizados sobre a relação entre o amortecimento e a sobrelevação e a frequência natural não amortecida e o tempo de estabelecimento em um modelo tipo protótipo de segunda ordem. A seguir, é proposta a atividade para observar o conceito, alterando os parâmetros através dos controles deslizantes.

Equações: As equações são facilmente escritas no formato LaTeX, garantindo uma boa apresentação e um tratamento matemático adequado para os conceitos apresentados. Elas podem ser introduzidas diretamente por comandos LaTeX ou editadas selecionando os símbolos e estruturas desejados. Na Figura 1, elas foram utilizadas para introduzir o modelo $G(s)$ e as relações de seus parâmetros ζ e ω_n com a sobrelevação e o tempo de estabelecimento.

Figuras: As figuras podem ser introduzidas nos textos de várias formas. Se ela for estática, como na Figura 1 do exemplo, pode ser simplesmente copiada e colada no documento ou inserida clicando sobre o item correspondente (*insert Image*) e lendo a imagem do arquivo. Entretanto, as figuras também podem ser introduzidas por comandos no código. No exemplo, ao alterar o amortecimento, uma figura com a resposta ao degrau é mostrada. Outra alternativa é usar comandos como *imshow*, que lê uma figura em diferentes formatos e a insere no documento. Dessa forma, figuras podem ser selecionadas a partir de escolhas interativas feitas no documento.

Controles: Vários objetos gráficos podem ser introduzidos para escolhas de parâmetros ou fazer alguma seleção. Os controles deslizantes permitem atribuir graficamente valores a parâmetros. No exemplo da Figura 1, eles foram utilizados para variar o amortecimento de 0 a 1 e a frequência natural não amortecida ω_n , e atribuir seus valores às variáveis ζ e w_n , respectivamente. Os menus suspensos permitem fazer escolhas de itens pré-definidos. Um exemplo de utilização é a escolha da sintonia de um controlador entre as opções P, PI e PID. As caixas de seleção permitem fazer escolhas que se mantêm até que sejam alteradas. Por fim, campos de edição e botões também estão disponíveis. É importante destacar que a mudança de um parâmetro com esses controles permite executar o código da seção ou de todo o documento, mostrando o resultado para o novo valor do parâmetro.

Atividades Interativas: Várias atividades interativas já estão prontas para uso, podendo ser incorporadas diretamente ao documento. Um exemplo é a sintonia de controladores PID, mostrada na Figura 2. Após um texto introdutório, o modelo da planta é selecionado do *workspace*. Escolhe-se, então, as especificações de tempo de resposta e comportamento mais ou menos amortecido no transitório. Ao escolher o modelo, os limites para estas escolhas são apresentados. O tipo de resposta pode ser selecionado, com destaque para resposta ao degrau e distúrbios nos sinais de controle e saída. Ao executar a seção, ou fazer alterações, a sintonia é feita e o resultado é apresentado.

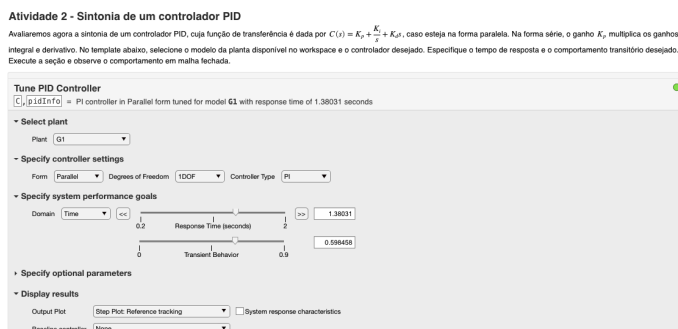


Figura 2. Exemplo de atividade interativa

Outra atividade interativa muito frequente é a identificação de modelos a partir de dados, que será comentada em breve.

Links externos: O uso de *links* externos permite enriquecer o documento interativo com outros documentos, áudios e vídeos, que estejam disponíveis na nuvem. Na Figura 1 é mostrado o *link* para um documento com notas detalhadas sobre a resposta de sistemas de segunda ordem. *Sites*, tais como Wolfram e Wiki, trazem explicações detalhadas sobre muitos conceitos matemáticos básicos. Sobre vídeos, há ainda canais no YouTube de conceituados professores brasileiros, por exemplo, o de L.A. Aguirre (2023), que explica detalhadamente conceitos básicos de controle. Tudo isso pode ser incorporado ao documento interativo e acessado com um clique.

Geração de relatórios: A geração de relatórios é um recurso valioso, pois permite a apresentação com qualidade de todo o conteúdo do documento interativo, reduzindo o

tempo requerido para editoração. São formatos possíveis: pdf, docx, html, LaTeX. Os relatórios são necessários em variadas situações, como, por exemplo, relatórios de atividades propostas, tanto teóricas quanto práticas, e de organização de testes e resultados em atividades de pesquisa. No último caso, o relatório pode se tornar o esqueleto de um artigo científico. Caso o relatório seja salvo em formatos LaTeX ou docx, ele pode ser enriquecido no ambiente dos respectivos editores.

Relatórios usados para avaliação são executados e dados automaticamente quando geram os documentos em formato pdf, que serão entregues. Essas atividades podem ser individualizadas com parâmetros, e o resultado de cada relatório pode ser gerado pelo professor com a chave de solução usada para avaliar. Os relatórios são depositados em nuvem, e os comentários são feitos diretamente sobre eles e devolvidos aos alunos.

2.2 Simulações

As simulações permitem observar o efeito dos parâmetros de modelos de baixa ordem na resposta transitória e de regime. Isso pode ser feito para modelos de primeira ordem, segunda ordem, com ou sem atrasos. Um exemplo é o mostrado na Figura 1, do efeito dos parâmetros ζ e ω_n na resposta ao degrau unitário. Modelos de sistemas elétricos, mecânicos, hidráulicos e outros podem ser ilustrados e ter seus parâmetros alterados para reconhecimento de seus efeitos no comportamento do sistema modelado. Esse tipo de análise é agradável ao usuário por reproduzir um comportamento, simplesmente alterando o valor de um parâmetro em um objeto gráfico, como feito na Figura 1, e observando seu comportamento.

Quando se deseja observar de forma comparativa esse efeito, uma pequena variação deste recurso deve ser realizada, de modo que múltiplas curvas sejam plotadas em um mesmo gráfico. Um exemplo é mostrado na Figura 3. Neste caso, o amortecimento ζ é variado e, a cada novo valor, uma nova curva é adicionada ao gráfico, com a respectiva legenda. O botão “inicialização” executa a seção anterior, inicializando as variáveis que armazenam as informações em cada simulação. Destaca-se a grande facilidade em gerar tabelas para análise dos resultados. Por exemplo, o comando $table(x,y,z)$ gera uma tabela de ótima qualidade no relatório, mostrando, em cada coluna, os valores dos vetores armazenados nas variáveis x, y e z .

2.3 Estimação de modelos

Modelos de primeira e segunda ordem podem ser obtidos, de modo determinístico, a partir da inspeção de sua resposta ao degrau. Esse método tem a vantagem de colaborar para o entendimento da relação entre os parâmetros desses modelos e as características da resposta. Por exemplo, a sobrelevação permite obter diretamente o amortecimento ζ em um protótipo de segunda ordem. Sinais ruidosos requerem uso de métodos tais como mínimos quadrados para obter os modelos. A atividade interativa *Estimate Process Model* pode ser incluída no documento para esta tarefa e permite selecionar os dados de treinamento e validação de entrada e saída disponíveis no *workspace*, bem como indicar o modelo contínuo cujos parâmetros se quer

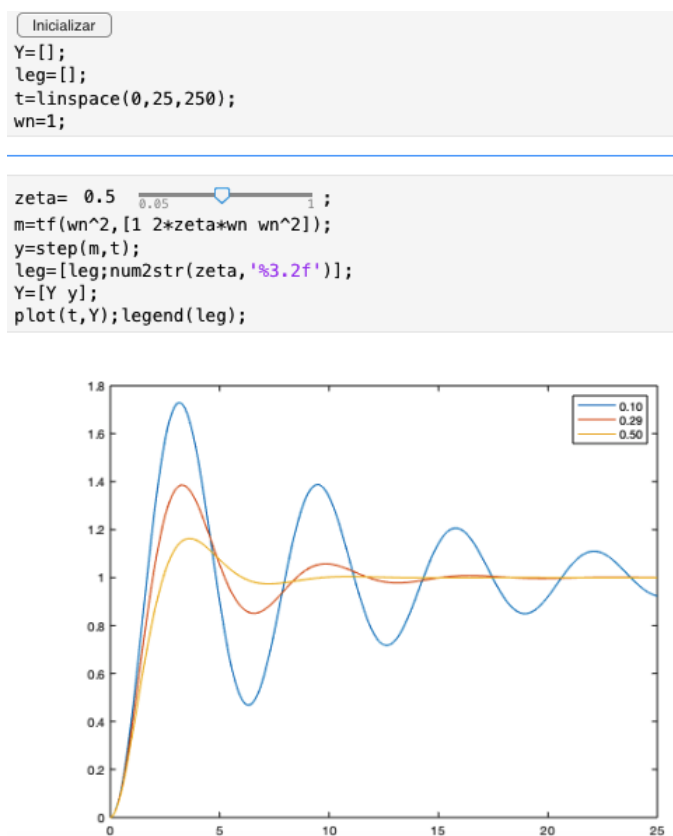


Figura 3. Exemplo de múltiplas análises e curvas

estimar. São apresentados como saída os dados utilizados e a validação, comparando dados medidos e estimados. A função *procest* é utilizada para estimar os parâmetros, realizando um procedimento iterativo de otimização por seis métodos diferentes que podem ser escolhidos. Este recurso é valioso ao tratar com plantas reais, pois os modelos são obtidos com facilidade usando os dados coletados e o estudante pode se concentrar no projeto e teste dos controladores.

2.4 O método do lugar das raízes

O método do lugar das raízes (LR) visa esboçar no plano s todos os valores assumidos pelas raízes de $1 + KG(s) = 0$. Problemas de análise e projeto podem ser colocados neste formato, e uma série de regras são fornecidas em livros didáticos para seu esboço. A questão que se coloca atualmente é o que deve ser ensinado, tendo em vista a disponibilidade de ambientes computacionais como o que ora descrevemos. Neles, os gráficos são traçados precisamente e rapidamente. Uma das regras para o esboço destes gráficos é encontrar os ângulos de partida e de chegada dos lugares das raízes para polos e zeros. Outra regra é para calcular o ganho que permite obter determinada raiz a partir da distância dos polos e zeros a este ponto. Essas regras são pouco úteis diante do LR desenhado pelo Matlab. Entretanto, interpretar o comportamento das raízes quando o ganho varia, saber qual o efeito sobre o LR ao se adicionar polos e zeros, relacionar a localização das raízes com a resposta no tempo, são exemplos de conhecimentos conceituais que permitem explorar esse método para análises e projetos, os quais a ferramenta não sabe

fazer. Uma proposta bastante didática é apresentar no documento as regras mais importantes para construção do LR, seguidas de atividades nas quais se consiga visualizar este efeito. Outra estratégia muito enriquecedora, nesse sentido, é gerar, de forma oculta, o LR para funções dadas, solicitando sua interpretação e seu uso.

2.5 Resposta em frequência

Os métodos de resposta em frequência ainda são abordados de forma intensiva em disciplinas de controle. Problemas tais como analisar e projetar controladores na presença de tempo de atraso, bem como tratar modelos de mais alta ordem, são relativamente simples com o uso destes métodos. Nesse contexto, aprender a esboçar gráficos polares e de Bode, e interpretar neles o efeito de ganhos, polos e zeros são conhecimentos que podem ser grandemente auxiliados usando os recursos aqui discutidos. Por exemplo, pode-se usar código para desenhar os gráficos polares no documento interativo e solicitar que sejam verificadas as condições para estabilidade em malha fechada. Questões sobre o efeito do ganho, polos, zeros, atrasos de tempo podem ser elaboradas, e a resposta checada diretamente no ambiente. Gráficos de Bode podem ser desenhados sem identificar a função de transferência utilizada, solicitando que sejam interpretados em relação à estabilidade relativa.

2.6 Sintonia de controladores

Os livros clássicos de controle (F.Golnaraghi and B.C.Kuo (2017)) tratam do projeto de controladores PID e compensadores avanço-atraso utilizando o método do lugar das raízes e os gráficos de Bode. Referências tais como Seborg et al. (2016) e K.J.Åström and T.Hägglund (2006) discutem métodos tais como o método do modelo interno e os métodos clássicos de sintonia de PID. Todos estes métodos podem ser facilmente incorporados ao documento, dispensando o estudante de efetuar os cálculos. Ele pode avaliar as escolhas de projeto, usando simulação, e revendo o projeto, caso o desempenho não seja o adequado. As ferramentas para análise do LR, por exemplo, permitem verificar instantaneamente a resposta temporal para as escolhas feitas. Atividades interativas, como a mostrada na Figura 2, devem ser usadas com cuidado, para que o estudante não se torne apenas um operador da ferramenta, sem deter os conhecimentos utilizados nas metodologias de projeto. Por exemplo, se o controlador projetado não atender o desempenho, ele deve saber como proceder.

2.7 Proposta de atividades individualizadas com relatórios

A proposta de trabalhos e atividades para explorar conceitos de controle fica grandemente facilitada pelo uso dos documentos interativos. Um *template* é fornecido com os enunciados, uma breve revisão dos conceitos e *links* para informações complementares. Para tornar compulsória a busca de solução para os problemas apresentados, os parâmetros para as atividades podem ser individualizados. Uma função de inicialização gera todos os parâmetros. O conteúdo da função pode ser ocultado usando a função *pcode*. Os códigos necessários podem ser parcialmente ou totalmente fornecidos, pois o objetivo é aprender os conceitos, e não aprender a programá-los, uma habilidade que não é comum.

É muito importante que as atividades requeiram reflexões, gerando interpretações dos resultados, a partir de escolhas e testes. Em uma época de abundância de dados, estimular esta habilidade ajuda na formação do engenheiro. Uma estratégia muito adequada é produzir o resultado gráfico e solicitar sua interpretação. Os modelos ou os parâmetros que geraram uma determinada resposta temporal podem ser solicitados. O resultado gráfico é uma figura gerada na função de inicialização, e mostrada com o comando *imshow*, de forma a não ser possível conhecer os parâmetros que a geraram. Essa atividade pode ser proposta para interpretar gráficos de Bode, de lugares das raízes, de simulações. De forma similar, a função de inicialização pode gerar dados que são plotados no documento e devem ser interpretados. Essa alternativa é particularmente vantajosa quando se deseja interagir com a figura, extraindo dela dados ao clicar sobre as curvas, o que não é possível com figuras estáticas. Os comandos *savefig* e *openfig* permitem salvar e abrir figuras no formato fig, permitindo o acesso a seus dados. Entretanto, na versão atual que usamos (2019b), as figuras abertas com estes comandos não são inseridas no relatório. Talvez futuras versões modifiquem esta deficiência.

2.8 Vantagens e desvantagens desta metodologia

Uma grande vantagem desta metodologia é não requerer dos estudantes conhecimentos de programação, pois até a manipulação de dados e funções muitas vezes representam obstáculos. Pode-se assim focar na exploração dos conceitos e interpretação dos resultados. A facilidade de gerar relatórios das atividades desenvolvidas também é um grande avanço. Embora seja importante que o engenheiro aprenda a elaborar relatórios, o caso de aulas práticas semanais, por exemplo, acaba sobrecarregando o estudante com atividades de editoração frequentes que poderiam ser melhor utilizadas. Um cuidado muito grande na criação desses documentos interativos é não tornar o estudante um mero “operador de software”. Saber exatamente o que as funções estão executando é fundamental para a correta interpretação dos resultados. Um bom exemplo é a função *stepinfo*, usada para obter os parâmetros de qualidade da resposta ao degrau. Ela não pode ser usada sem que seu usuário tenha pleno conhecimento sobre como extrair essas informações da resposta ao degrau. Ou seja, deve-se ver nas curvas a informação extraída pelas funções utilizadas.

3. ACESSO A PLANTAS FÍSICAS VIA DOCUMENTOS INTERATIVOS

A interação com plantas físicas é desafiadora e estimulante. A grande variedade de plantas disponíveis comercialmente para ensino de controle explora justamente esse interesse. Uma dificuldade recorrente é o custo para se disponibilizar múltiplas bancadas para ensino de controle. Muitos trabalhos têm sugerido como alternativa a construção de plantas de baixo custo. Outros sugerem o uso de plantas virtuais, ou o uso compartilhado de plantas físicas. Discutiremos agora como integrar essas plantas aos documentos interativos, de forma que possam ser tratadas de forma similar aos modelos usados para simulação. Em J. A. Rossiter and Murray (2018), propõe-se o uso de plantas de custo muito reduzido para os alunos levarem para casa (*take home*

activities) e realizarem seus trabalhos. Um exemplo é o chamado TClab para controle de temperatura.

3.1 Formas de interação

Muitas alternativas são disponibilizadas, há longa data, para o acesso a plantas físicas através do ambiente do Matlab ou Simulink. Bibliotecas estão disponíveis para acesso ao hardware de entrada/saída (E/S) dos principais fabricantes. O procedimento usual é enviar e receber dados através de linhas de comando, com coletas feitas em tempos de amostragem selecionados. É possível, dessa forma, efetuar experimentos coletando dados em malha aberta. Para testes em malha fechada, não há garantia de tempo real, principalmente para plantas rápidas.

Uma boa alternativa para controle em tempo real é gerar código, compilar e transferir para uma plataforma que o execute. O ambiente do Simulink permite fazer isto com grande facilidade, com a vantagem de monitorar as variáveis selecionadas em seu ambiente gráfico (*Simulink's external mode*). O próprio computador no qual o Simulink está rodando pode executar esse código, com uma placa E/S atuando como interface para a planta física. Exemplos de hardware que podem executar o código são controladores industriais e o Arduino (P.B.deMoura.Oliveira et al. (2020)). Essa solução permite que determinados parâmetros, como ganhos e amplitude de sinais aplicados, sejam alterados em tempo de execução. Mudanças mais complexas requerem recompilar e transferir novamente o programa.

O acesso a plantas industriais pode ser feito via padrão de comunicação OPC (*Open Platform Communications*), pois muitos ambientes industriais dispõem de servidores OPC. Como o Matlab tem uma biblioteca de cliente OPC, basta efetuar a configuração para ler e escrever variáveis diretamente no controlador industrial, de forma similar ao que é feito com placas de E/S. A vantagem desta forma de comunicação é a possibilidade de múltiplos clientes OPC acessarem uma mesma planta industrial, obviamente não de forma simultânea. Um protocolo da mesma natureza, porém mais leve, é o MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), que foi usado em R.BaccidiCapaci and C.Scali (2020) para que o Matlab atuasse como um serviço em nuvem para acessar dados de sensores e atuadores em plantas industriais, fornecendo diagnósticos. Por fim, pode-se pensar também em soluções *ad hoc*, como a apresentada em Ariza and Galvis (2023), na qual uma planta de controle de nível é acessada remotamente via navegador, com a possibilitar de visualizar as alterações de nível nos dois reservatórios por uma câmera de vídeo.

O acesso também pode ser feito por comunicação sem fio, usando modems conectados na porta USB para esta finalidade. Um exemplo de aplicação usando GUIs do Matlab e rede ZigBee para acesso aos dados pode ser visto em V.C.Khairnar and K.Sandeep (2018).

Por fim, uma alternativa que permite grande versatilidade e baixo custo é efetuar a comunicação com controladores populares (como PIC e Arduino) pela porta USB, emulando uma porta serial. Códigos bastante simples permitem a execução de tarefas tais como aplicação de sinais e coleta de dados com tempos de amostragem definidos,

implementação de controladores PID e outros, retornando o resultado de testes em malha fechada.

4. PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO

4.1 Aulas expositivas

O documento interativo pode ser utilizado para aulas expositivas, substituindo os slides por um documento atualizado em tempo real, explorando problemas de formas diversas. Seja, como exemplo, uma aula sobre critério de estabilidade de Nyquist e estabilidade relativa. O documento pode conter um breve resumo do critério, seguido de gráficos de Nyquist para exemplos que são gerados durante a aula. Os pontos de cruzamento sobre o eixo real são rapidamente identificados, permitindo obter as condições para estabilidade. A estabilidade relativa pode ser analisada juntamente no gráfico de Bode, variando polos, zeros, ganhos, atrasos, e quantificando seus efeitos sobre as margens de fase e ganho. Como o documento é fornecido antecipadamente para estudo e simulações, ele pode ser utilizado pelos estudantes durante a aula, bastando disporem de um *laptop* com o Matlab. O documento utilizado em aula, com comentários, pode ser utilizado posteriormente para estudo e referência.

4.2 Realização de trabalhos individuais

A proposta de atividades dirigidas beneficia-se grandemente desses documentos interativos. Um breve resumo dos conceitos é apresentado, complementado com *links* para as notas de aula, livros-texto, vídeos, etc. As atividades devem ser desenvolvidas com parâmetros individuais, estimulando o trabalho colaborativo, mas requerendo respostas relacionadas especificamente aos parâmetros fornecidos. Para isso, podem ser utilizadas funções de inicialização para gerar os parâmetros cujo código é oculto, usando a função *pcode*.

O relatório das atividades é entregue através de um arquivo pdf, depositado na nuvem. A avaliação das atividades é feita pelo professor diretamente sobre o documento fornecido, bastando compará-las ao seu *live script* com as soluções prontas parametrizadas.

4.3 Aulas práticas em laboratório

Descrevemos, agora, o uso dos documentos interativos para aulas práticas, na disciplina denominada Laboratório de Controle. O objetivo é realizar todas as etapas, desde a obtenção do modelo até o teste do controlador. Os testes descritos a seguir foram realizados com um motor CC alimentado por 12 V, tendo como interface com o Matlab um microcontrolador Arduino Due, que se comunica via porta serial emulada pela saída USB do computador. Na Figura 4, pode-se observar o motor CC com o *encoder* acoplado em seu eixo, a placa com os circuitos, o Arduino Due e a fonte de alimentação usados nas atividades aqui descritas. Um circuito amplificador com um transistor converte a saída PWM do microcontrolador em uma tensão média aplicada ao motor. A rotação do motor é medida por um *encoder*, cabendo ao Arduino transformar a contagem de pulsos em rpm. Os comandos do Matlab são enviados ao Arduino pela porta serial, que executa funções

e retorna os dados. Na função de coleta de dados, informa-se que sinal deve ser aplicado ao motor e por quanto tempo, podendo ser informado também o tempo de amostragem. A resposta é uma sequência de amostras com a resposta do motor em rpm. Na função de controle PID, informa-se a referência e os ganhos do controlador, podendo ser informado também o tempo de amostragem. O Arduino retorna os sinais de controle que foram calculados usando os ganhos fornecidos e a resposta de velocidade.

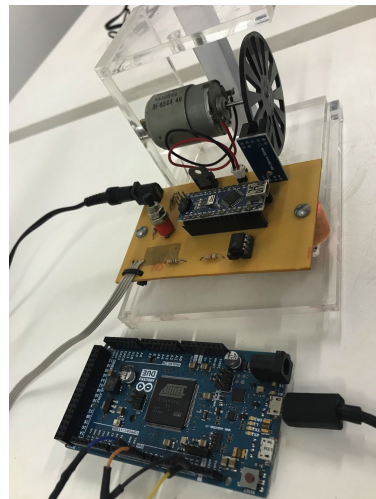


Figura 4. Motor CC usado em aulas práticas

Na Figura 5, são mostrados os passos para a coleta dos dados para uma sequência de degraus (vetor u) e a obtenção e validação do modelo. O objeto *obj* foi obtido ao estabelecer a comunicação com a porta serial usando o comando *serial*. Ao executar esta seção do documento, os dados são coletados, mostrados, o modelo de ordem 1, no caso, é identificado e, por fim, mostra-se sua validação, quantificada pelo índice *fit*. Esta etapa pode ser repetida, caso os dados ou o modelo não sejam bons. Nesta etapa, também pode-se verificar que se conseguem bons modelos se os degraus produzem variações não muito grandes em torno de uma rotação de operação definida.

Identificação de modelo e sintonia de um controlador PI.

```
[y,t] = coleta(obj,u,Tempo);
data=iddata(y,u,Ts);
plot(data);
data_d=detrend(data);
g=procest(data_d,'P1');
compare(data_d,g);
```

Figura 5. Parte do *live script* para coleta de dados e identificação do modelo

Passa-se, então, à etapa de projeto e teste do controlador, mostrada na Figura 6, na qual a referência é alterada de 1800 para 2100 rpm. Neste exemplo, utiliza-se o método do modelo interno, sendo especificada apenas a constante de tempo de malha fechada λ . Ao se alterar seu valor no campo correspondente e se pressionar a tecla *enter*,

os ganhos do controlador PI são calculados e aplicados à planta real, como se fosse uma simples simulação. A resposta para um teste realizado é mostrada na Figura 7, e rapidamente ficam claros os desafios de controlar uma planta real na presença de ruídos, saturação do sinal de controle, discretização dos sinais.

Outros assuntos explorados de forma similar nesse ambiente e com esse motor são: discretização e efeito do tempo de amostragem, efeito do ganho da resposta em malha fechada, efeito do ruído nas especificações e no projeto, saturação e limitações físicas em controle. Um sistema de aquecimento com resistência e microventilador também é utilizado, permitindo explorar seguimento de referência e rejeição de distúrbios (microventilador).

Dada $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$, usaremos o controlador PI dado por $C(s) = K_p \frac{s + K_i}{s}$, resultando na função de transferência de malha fechada $M(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{1}{2s + 1}$.

```
g1=tf(g.Kp,[g.Tp1 1])
Ref=1800;
lambda=0.05;
Kp=g.Tp1/(g.K*lambda);
Ki=1/g.Tp1;
[y,u,t]=controle_PI(obj,Ref+300,Tempo,Kp,Ki);
r=ones(size(y))*(Ref+300);
subplot(211);plot(t,[y r]);title('Saida');xlabel('Tempo(s)');grid;
subplot(212);plot(t,u);title('Sinal de controle');xlabel('Tempo(s)');
```

Figura 6. Parte do *live script* para projeto e teste do controlador

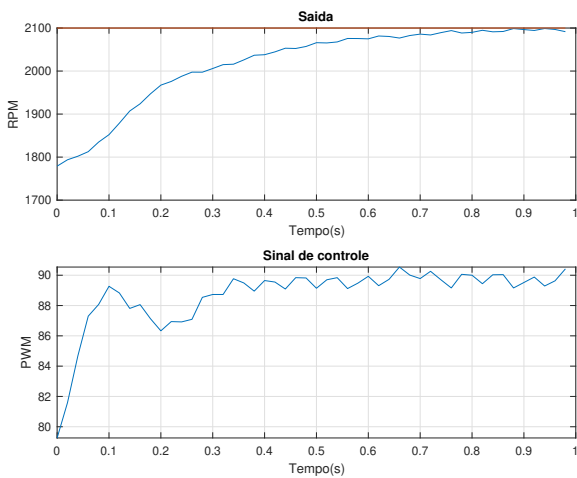


Figura 7. Teste do controlador PI no motor CC mostrado no *live script*

Um aspecto a ser considerado nesses ambientes é o envolvimento de alunos com conceitos mais avançados e pesquisas. Em C.Mejía et al. (2022), o kit de controle de temperatura TClab, descrito neste artigo, é utilizado como *benchmark* para estudo de problemas de controle, no caso, a presença de grandes tempos mortos em malhas de controle.

5. AVALIAÇÃO DO USO DOS *LIVE SCRIPTS*

Uma pesquisa foi realizada entre os estudantes das disciplinas Laboratório de Controle e Sistemas Realimentados, visando avaliar o uso dos documentos interativos nestas disciplinas. Na primeira disciplina, as aulas são semanais

com duração de duas horas, devendo ser entregue um relatório em cada aula, com até dois participantes. Um *template* de um documento interativo é fornecido, que deve ser executado e preenchido, à medida que se avança nas atividades propostas, mesclando simulações e testes com plantas físicas. Ao final da aula, gera-se um relatório em formato pdf que é submetido imediatamente ao ambiente de nuvem da universidade para avaliação do professor.

Na disciplina de Sistemas Realimentados, são quatro horas de aula semanais, e a avaliação é feita com provas em sala de aula e trabalhos realizados usando os *live scripts* fornecidos. Cada aluno tem parâmetros específicos que devem ser utilizados, que são posteriormente utilizados pelo professor para avaliar o trabalho, também entregue na forma de um arquivo pdf contendo o *template* modificado com as análises e simulações e as respostas às questões colocadas.

Foram realizadas as seguintes perguntas através de formulários do Google não identificados:

- (1) Qual era o seu nível de conhecimento sobre o Matlab no início da disciplina?
- (2) Qual foi seu grau de dificuldade para utilizar os *live scripts* fornecidos?
- (3) Qual foi seu grau de dificuldade para gerar relatórios a partir dos *live scripts*?
- (4) O uso dos *live scripts* ajudou na realização das aulas práticas de laboratório?
- (5) O uso dos *live scripts* ajudou na realização dos trabalhos da disciplina?
- (6) O uso de *live scripts* em aula expositiva ajudou no entendimento dos conceitos?
- (7) Usou *live scripts* em alguma outra atividade ou disciplina?
- (8) Acredita que os *live scripts* podem ser utilizados como forma de estudo?
- (9) Em sua opinião, os *live scripts* são motivadores para o estudo?

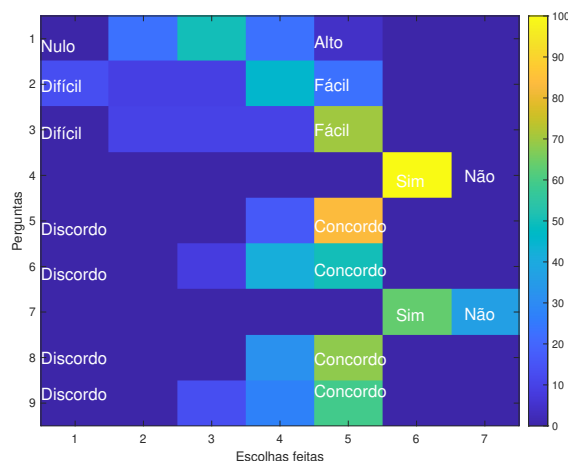


Figura 8. Resultado da avaliação feita pelos alunos

Destas perguntas, as de número 1, 2, 7, 8 e 9 foram apresentadas aos alunos das duas disciplinas, as perguntas 3 e 4, apenas aos alunos de Laboratório de Controle e as perguntas 5 e 6, apenas aos alunos de Sistemas

Realimentados. As escolhas feitas foram ponderadas pelo número de respondentes e são mostradas numa escala de 0 a 100 na Figura 8. Para as perguntas 4 e 7, as escolhas eram sim ou não. Para as demais perguntas havia uma escala linear de 1 a 5, identificadas na Figura 8.

A primeira observação é que, apesar dos alunos não terem conhecimento grande sobre o Matlab, a maioria achou fácil usar os *live scripts*, gerar os relatórios e fazer os trabalhos. A maioria concorda que o recurso ajudou no entendimento dos conceitos. Curiosamente, em torno de 60% dos alunos começaram a usar os *live scripts* em outras disciplinas, por iniciativa própria. Eles, inclusive, fizeram este comentário em sala de aula. Por fim, mais de 50% dos alunos concordam que o uso dos *live scripts* é motivador para o estudo e pode ser usado como forma de estudo individual. No espaço para comentários livres, escreveram: “É interessante pois introduz o formato *notebook*, bem difundido em outras ferramentas como o Colab”, “Apreciéi tanto o uso do *live script* que comecei a utilizá-lo em todas as disciplinas que requerem laboratório”, “Tirando alguns *bugs* do próprio *live script*, não possuo nenhum comentário negativo sobre a utilização dessa ferramenta. No meu caso as atividades no *live script* ajudaram a entender a matéria mais facilmente”.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo, o uso dos chamados documentos interativos foi utilizado para entusiasmar os alunos pelo ensino de controle, enriquecendo tanto aulas expositivas quanto práticas com estes recursos que permitem sua participação mais ativa. Um visão geral dos recursos disponíveis foi apresentada, com propostas de uso bem variado, envolvendo análises, simulações, obtenção de modelos e teste de controladores em plantas físicas. Uma pesquisa de avaliação feita com os estudantes mostrou que o efeito esperado aconteceu: eles gostam de usar a ferramenta e, por iniciativa própria, passaram a usá-la em outras disciplinas para realizar relatórios de aulas experimentais. Em uma época em que atrair a atenção dos alunos para o que se ensina é um tremendo desafio, percebe-se que são grandes as perspectivas de ganhos ampliando seu uso. Neste sentido, o uso de atividades para casa usando plantas de baixo custo é uma alternativa que será explorada, pois um microcontrolador Arduino Nano e a planta custam menos de 100 reais. A outra alternativa com grande retorno é a integração dos documentos interativos com uma planta industrial via comunicação OPC, um sistema multivariável e mais complexo. O controle é feito com um controlador industrial e, pelo *live script*, podem-se realizar testes em malha aberta e fechada com diferentes controladores.

Toda nova tecnologia exige um esforço inicial para sua implantação, mas o maior entusiasmo dos alunos e a possibilidade de acompanhar mais de perto (*feedback*) a evolução do aprendizado, com atividades parciais fáceis de fazer e de corrigir, são um grande incentivo para este investimento.

REFERÊNCIAS

A. Koch, M. Lorenzen, P.P. and Allgower, F. (2020). Facilitating learning progress in a first control course via matlab apps. *IFAC Papersonline.*, 53, 17356–17361.

- A. Vergnaud, J.F. and Autrique, L. (2015). Python based internet tools in control education. *IFAC Papersonline.*, 48, 43–48.
- A. Eichler, C. Hoffmann, C. Kautz, and H. Werner (2013). Design of tutorial activities and homework assignments for a large-enrollment introductory course in control systems. *IFAC Proceedings.*, 46, 43–48.
- A. Khan and L. Vlacic (2006). Teaching control: Benefits of animated tutorials from viewpoint of control students. *IFAC Proceedings.*, 39, 365–370.
- Ariza, J.A. and Galvis, C.N. (2023). Rasycontrol lab: A fully open-source and real-time remote laboratory for education in automatic control systems using raspberry pi and python. *HardwareX*, 1–34.
- C. Mejía, E. Salazar, and O. Camacho (2022). A comparative experimental evaluation of various smith predictor approaches for a thermal process with large dead time. *Alexandria Engineering Journal*, 12, 9377–9394.
- D. M. Pena, M. Dominguez, F.G.E.O.R.F.T. and Dormido, S. (2022). Overview and future trends of control education. *IFAC Papersonline.*, 55, 79–84.
- F. Golnaraghi and B.C. Kuo (2017). *Automatic control systems*. McGraw-Hill Education, New York.
- J. A. Rossiter, B. P. Duncan, S.D.L.V.B.J. and Murray, R. (2018). A survey of good practice in control education. *European Journal of Engineering Education*, 43, 801–823.
- J. C. Gonzalez, J. L. Guzman, S.D. and Berenguel, M. (2013). Development of interactive books for control education. *IFAC Proceedings.*, 46, 150–155.
- J.A. Rossiter, C.G. Cassandras, J. Hespanha, S. Dormido, L. Torre, G. Ranade, A. Visioli, J. Hedengren, R.M. Murray, P. Antsaklis, F.L. Labarrigue, and T. Parisini (2023). Control education for societal-scale challenges: A community roadmap. *Annual Reviews in Control.*, –.
- K.J. Åström and T. Hägglund (2006). *Advanced PID Control*. ISA, New York.
- L.A. Aguirre (2023). Bibo estabilidade. URL <https://youtu.be/8i087MVQ9ks>, accessed: 20.05.2023.
- M. Hernández-de Menéndez, A.G., Martínez, J., Alcántara, D., and Morales-Menéndez, R. (2019). Active learning in engineering education, a review of fundamentals, best practices and experiences. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 13, 909–922.
- P.B. de Moura Oliveira, J.D. Hedengren, and J.A. Rossiter (2020). Introducing digital controllers to undergraduate students using the tclab arduino kit. *IFAC PapersOnLine*, 2, 7524–17529.
- R. Baccidi Capaci and C. Scali (2020). A cloud-based monitoring system for performance assessment of industrial plants. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 59, 2341–2352.
- Seborg, D.E., Edgar, T.F., Mellichamp, D.A., and Doyle III, J.F. (2016). *Process dynamics and control*. John Wiley Sons, New York.
- V.C. Khairnar and K. Sandeep (2018). Induction motor parameter monitoring system using zig bee protocol & matlab gui: Automated monitoring system. In *2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics*, 1–6.