

## CONSTRUÇÃO DE UMA FERRAMENTA INTERATIVA APLICADA AO ESTUDO DE SISTEMAS DINÂMICOS

CAIO MAURO S. COSME<sup>1</sup>, RODOLPHO VILELA ALVES NEVES<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> *Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus UFV, CEP: 36570-000, Viçosa, MG*

<sup>2</sup> *Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/n, Campus UFV, CEP: 36570-000, Viçosa, MG*

*E-mails: caiomaurosantanacosme@gmail.com, Rodolpho.neves@ufv.com.br*

**Resumo** — Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta interativa com interface gráfica, projetada para o estudo de sistemas dinâmicos, com foco no aprimoramento do ensino e aprendizagem em disciplinas de controle. Utilizando o software de código aberto SCILAB, a ferramenta oferece uma plataforma acessível e prática para a análise e simulação de sistemas dinâmicos, incluindo a aplicação de controladores PID. O projeto busca aliar a teoria com a prática, fomentando a compreensão de conceitos fundamentais por meio de simulações interativas e metodologias ativas de ensino, incentivando maior engajamento de estudantes e docentes. Além disso, são demonstradas as capacidades do SCILAB como uma alternativa gratuita e eficaz, com potencial para democratizar o acesso a recursos avançados no estudo de engenharia.

**Palavras-chave** — Sistemas dinâmicos, controladores PID, interface gráfica, SCILAB

### Introdução e Objetivos

O objetivo de descrever matematicamente fenômenos naturais remonta a centenas de anos, desde os esforços notáveis de Galileu, que associou o estudo da geometria ao movimento dos planetas, passando por René Descartes e a geometria analítica, até a culminação da mecânica clássica elaborada por Newton. No entanto, devido aos avanços em diversas áreas, especialmente ao longo do último século, a Dinâmica, ramo da mecânica clássica, evoluiu para o que hoje conhecemos como Teoria dos Sistemas Dinâmicos. Essa teoria tornou-se um tema interdisciplinar que utiliza equações diferenciais, ou suas variantes discretas, para descrever o comportamento dinâmico de um sistema, sendo aplicada em uma ampla gama de áreas [1].

Um sistema dinâmico pode ser definido como uma sequência de estados possíveis em um espaço, governados por uma regra que relaciona os estados atuais aos anteriores, partindo de uma condição inicial. Em termos simples, trata-se de um sistema que sofre alterações ao longo do tempo. Em outras palavras, sistemas dinâmicos são caracterizados por uma sequência de estados regidos por uma regra que define a evolução do sistema a partir de uma condição inicial [2].

A compreensão desses conceitos fundamentais, embora abstratos, pode ser dificultada quando analisada sob a ótica de metodologias pedagógicas tradicionais e passivas, nas quais o aluno assume o

papel de mero receptor de conteúdo, em vez de construtor ativo do conhecimento. Nesse contexto, as informações podem facilmente se perder entre os diversos conceitos apresentados. Por isso, a aplicação de metodologias ativas de ensino-aprendizagem tem ganhado destaque, utilizando ferramentas que colocam o aluno no centro do processo. Programas como MATLAB e SCILAB atuam como complementos essenciais nessa construção do conhecimento, permitindo a realização de simulações práticas que reforçam o aprendizado.

O amplo uso do MATLAB é inquestionável, sendo adotado em universidades em todo o Brasil e no mundo, além de estar fortemente associado a publicações em renomados portais e revistas de engenharia. No entanto, sua utilização enfrenta barreiras financeiras significativas, especialmente em instituições de grande porte sem recursos próprios ou para usuários finais que precisam pagar licenças anuais de US\$ 55. Uma alternativa viável para democratizar o acesso a programas de cálculo computacional é o SCILAB, uma ferramenta de código aberto e gratuita que oferece uma interface e funcionalidades semelhantes às do MATLAB. Compatível com os sistemas operacionais mais comuns, o SCILAB permite desenvolvimentos que rivalizam em desempenho com seu equivalente comercial.

Com base na premissa de reduzir as barreiras no ensino e na aprendizagem por meio do uso de ferramentas e metodologias ativas, este trabalho

tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta interativa e educacional no SCILAB, voltada para o ensino e a aprendizagem de disciplinas de controle em Engenharia Elétrica. Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos: desenvolver uma interface gráfica que desperte o interesse pela ferramenta e pela disciplina, comprovar a eficácia do SCILAB como programa de processamento numérico e exercitar conhecimentos teóricos por meio de simulações práticas. Dessa forma, o trabalho busca não apenas oferecer uma solução técnica, mas também contribuir para a democratização do acesso a ferramentas educacionais.

### Revisão de literatura

#### SCILAB como software de processamento

Conforme explica [3], o SCILAB é um software de código aberto utilizado para aplicações científicas e de engenharia. Ele é um ambiente de programação numérica e científica, semelhante ao MATLAB, que emprega uma linguagem de programação própria, facilitando a transição entre os dois. O programa oferece uma ampla variedade de funções numéricas para manipulação de matrizes, álgebra linear, estatísticas, otimização e muito mais. Além disso, possui ferramentas poderosas para a criação de gráficos e visualizações de dados, essenciais para a análise e interpretação de resultados. A extensibilidade do SCILAB permite que ele seja adaptado às necessidades específicas do usuário, possibilitando a criação de funções personalizadas e módulos. O software está disponível para várias plataformas, incluindo Windows, Linux e macOS [3].

O SCILAB oferece uma extensa biblioteca de blocos que facilita a modelagem eficiente de sistemas, tanto lineares quanto não lineares, permitindo a construção simplificada de modelos complexos. Além disso, proporciona a simulação interativa dos modelos desenvolvidos, permitindo uma análise detalhada do comportamento dinâmico do sistema. É amplamente utilizado em engenharia de controle, sistemas dinâmicos, simulação de processos industriais e pesquisa acadêmica [4].

#### Sistemas Dinâmicos

Sistemas dinâmicos são representações matemáticas de fenômenos físicos, nas quais seu comportamento é governado por equações que relacionam o estado atual aos estados anteriores, com base em condições iniciais. Em tempo contínuo, sua evolução é descrita por equações diferenciais [2,5], que derivam da dinâmica e podem descrever desde processos de movimento até processos biológicos.

Um aspecto relevante das equações diferenciais e dos sistemas dinâmicos descritos por elas é a linearidade. Um sistema é chamado de linear quando segue o princípio da superposição, permitindo que a resposta a múltiplas entradas seja a soma das respostas individuais. Essa característica facilita a análise de sistemas complexos e a previsão de seu comportamento em diferentes condições [6].

#### Identificação e Modelagem de sistemas dinâmicos

A modelagem dos sistemas dinâmicos fornece uma representação matemática abstrata, porém permite compreender e controlar sistemas em diversas áreas de engenharia, como plantas elétricas, mecânicas, térmicas e hidráulicas. Esta etapa envolve escolha de parâmetros e variáveis relevantes ao sistema, que descrevam de forma relevante seu comportamento ao longo do tempo [7].

Para identificação destes sistemas se utiliza de dados reais para ajustes de modelagem às condições práticas. Métodos como análise ao degrau, impulso e técnicas paramétricas ajustam modelos e aprimoram sua precisão [8].

Uma técnica aplicada para a modelagem de sistemas dinâmicos não lineares é a linearização em torno de um ponto de operação específico. Este ponto representa um estado de equilíbrio onde as variáveis do sistema mudam de forma previsível. O método mais comum de linearização é a expansão de Taylor de primeira ordem, permitindo o estudo e aplicação de ferramentas de controle [1].

#### Para alguns

Os modelos de planta e modelagens das equações das funções de transferências das plantas serão as seguintes:

- a. Controle de tensão no capacitor para o circuito RLC [9];
- b. Controle de corrente no circuito RLC [9];
- c. Controle de temperatura da água na saída do tanque [9];
- d. Controle de ângulo no pêndulo invertido [10];
- e. Controle de nível em um tanque escoando [11];
- f. Planta genérica a ser definida pelo usuário;

#### Projeto e Sintonia de Controladores (PID)

Os controladores PID são amplamente utilizados no controle de sistemas dinâmicos devido à sua eficácia e simplicidade, visando garantir estabilidade e desempenho ideal. A sintonia desses

controladores depende dos parâmetros proporcional, integral e derivativo que os compõem, podendo ser realizada por diversos métodos, desde abordagens simples, como Ziegler-Nichols, até técnicas mais avançadas de otimização [12].

O método de sintonia de Ziegler-Nichols pode ser aplicado de duas formas: pelo método da resposta ao degrau, que utiliza a curva de reação do sistema, ou pelo método da oscilação contínua, que determina um ganho crítico e um período crítico a partir da resposta oscilatória do sistema [12].

O projeto e a sintonia dos controladores são fundamentais para garantir precisão, estabilidade e uma resposta ágil com desempenho otimizado. O controlador PID é composto por três ganhos, representados pela seguinte equação [9]:

$$G_{pid}(s) = K_p + K_d * s + K_i * \frac{1}{s} \dots\dots\dots (1)$$

Sendo, respectivamente:

- Ganho Proporcional: Kp
- Ganho Integral: Ki
- Ganho Derivativo Kd

Ganho proporcional – Kp

O ganho O ganho proporcional é essencial em sistemas de controle, pois atua de forma diretamente proporcional ao erro, ou seja, à diferença entre a saída do sistema e o valor de referência.

A principal vantagem do controlador proporcional é a redução do tempo de resposta, tornando-o eficaz para sistemas simples. No entanto, suas limitações incluem a incapacidade de eliminar completamente o erro em estado estacionário e a tendência a gerar sobressinal [7,12]

Ganho Integrador – Ki

O ganho Ki pode ser decomposto entre o produto do ganho Kp e o inverso do tempo integrativo (Ti). Este tempo é o tempo para que a saída do integrador atinja o valor Kp para a entrada unitária.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \dots\dots\dots (2)$$

A porção integradora do controlador se destaca pela capacidade de eliminar o erro acumulado entre a saída do sistema e o valor de referência, se baseando na integral desta diferença e eliminando o erro em estado estacionário [13, 14].

No entanto, o ganho integral pode impactar na dinâmica da resposta, tornando-a mais lenta e aumentando o sobressinal.

Ganho Derivativo – Kd

O ganho Kd pode ser decomposto entre o produto do ganho Kp e o do tempo derivativo (Td). Este é o intervalo de tempo em que a ação derivativa antecede a ação de controle proporcional.

$$K_d = K_p * T_d \dots\dots\dots (3)$$

Complementar aos ganhos proporcional e integrativo, o ganho derivativo baseia-se na taxa de variação do erro ao longo do tempo, contribuindo para a estabilização da resposta dinâmica do sistema. Na prática, ele reduz o sobressinal e o tempo de estabilização [15,16].

Entretanto, em controladores puramente derivativos, uma entrada em degrau pode causar o efeito de chute na saída, pois a ação derivativa responde à taxa de variação abrupta do erro. Esse fenômeno, comum em sistemas sensíveis a transientes bruscos, pode ser atenuado por meio da filtragem da ação derivativa, do uso da derivada do erro filtrada e da redução do ganho derivativo [16].

Resposta ao impulso

A resposta de um sistema dinâmico ao impulso unitário é útil para determinar o comportamento transitório do sistema, como estabilidade, velocidade de resposta e amortecimento.

Segundo [9], a resposta ao impulso também é útil para determinar a função de transferência. A resposta ao impulso é especialmente utilizada em processamento de sinais e para avaliar como um sistema reage a excitações de curta duração.

Resposta ao degrau

Segundo [17] a resposta ao degrau fornece uma análise de como um sistema dinâmico se comporta a uma mudança repentina e fixa de entrada, abrindo caminho para avaliação de seus parâmetros de desempenho. É uma forma de analisar o comportamento de dinâmico de sistemas lineares, sendo amplamente utilizada em testes práticos.

Para obter os parâmetros de desempenho da planta é preciso aplicar a resposta ao degrau em malha fechada, dada pela equação da planta em malha fechada com feedback negativo.

$$G_{MF} = \frac{G_p * G_{pid}}{1 + G_p * G_{pid}} \dots\dots\dots (4)$$

Sendo a Gp a resposta da planta em malha aberta, segundo o sistema,

Parâmetros de desempenho

Considerados resultantes da análise à resposta ao degrau, os parâmetros de desempenho são objeto de estudo quando se trata da aplicação de controladores em sistemas dinâmicos [9].

Tempo de pico: Corresponde ao tempo em que a

resposta atinge o valor máximo durante o regime transitório. Este parâmetro é particularmente relevante em sistemas onde a presença de oscilações é comum, estando diretamente relacionado ao fator de amortecimento.

**Sobressinal:** Este parâmetro refere-se ao quanto a resposta de um sistema ultrapassa percentualmente o valor de referência antes de estabilizar. Ele é uma medida crítica em sistemas onde oscilações são indesejadas, com controles mais precisos.

**Tempo de subida:** É o parâmetro utilizado para avaliar a rapidez que um sistema reage a uma mudança de entrada. Usualmente é o intervalo que o sistema leva para sair de um percentual de 10% a 90% do valor final, segundo

**Tempo de acomodação:** É o parâmetro que mede o tempo para que um sistema permaneça dentro de uma margem de erro aceitável do valor de regime permanente. Geralmente as margens são definidas entre 2% a 5% do valor final.

**Valor em estado estacionário:** Este parâmetro mede o valor que o sistema atinge em estado estacionário após o comportamento transitório. Ele é um indicador direto da precisão do sistema de controle

## Metodologia

### Design e Desenvolvimento da Ferramenta

#### I. Requisitos funcionais

Os requisitos funcionais da ferramenta foram objetivados na capacidade de simular sistemas dinâmicos diversos, com enfoque em cinco plantas pré-definidas e uma planta de grau designada pelo usuário, com parâmetros físicos ajustáveis e implementação opcional de um controlador PID através da entrada de seus coeficientes proporcional, integrativo e derivativo. A ferramenta ainda deve apresentar a resposta gráfica para as funções de transferência da planta com e sem o PID, bem como uma tabela de comparação entre os parâmetros de performance das plantas com controle e sem controle do PID.

Quanto a necessidade de simular sistemas dinâmicos, o enfoque foi dado a cinco plantas e suas respostas características. O usuário deverá escolher a planta de simulação dentre as pré-definidas, o programa irá alterar os campos de entrada de parâmetros físicos, e apresentará em uma janela separada da interface gráfica o exemplo matemático da planta selecionada. Os campos para entrada dos parâmetros físicos irão mudar para cada seleção de planta, apresentando as grandezas e

dimensões necessárias para o cálculo da função de transferência.

Abaixo dos campos de parâmetros físicos, a ferramenta terá campos para entrada dos coeficientes do controlador PID da planta. Quando zerados, o controlador será considerado um controlador proporcional com  $K_d=0$ ,  $K_i=0$  e  $K_p=1$ .

A ferramenta deve ser capaz de mostrar a função de transferência em malha aberta para o controle da variável citada na opção escolhida pelo usuário, bem como a função de transferência da planta com a ação do PID.

Por fim, a ferramenta deverá ter a capacidade de exibir graficamente as respostas ao degrau e impulso das plantas, tanto a inserida pelo usuário, quanto a da planta com a aplicação do controlador desenvolvido diretamente por ele. O usuário poderá selecionar se deseja ver as respostas citadas, ou apenas uma resposta exclusivamente, além de definir o tempo da simulação. Caso não seja especificado o tempo de simulação, o programa considerará o tempo de cinco segundos.

Por fim, o programa deve apresentar uma tabela de comparação entre os parâmetros de performance entre as duas plantas simuladas

#### II. Requisitos não funcionais

A ferramenta foi desenvolvida com intuito didático e não se presta a obter resultados de precisão profissional, apenas para questões de ensino aprendizagem. Destacados estes pontos, a ferramenta objetiva ser uma ferramenta com usabilidade por parte de alunos, com ampla compatibilidade de sistemas operacionais, suportado pela compatibilidade da versão 2024 do SCILAB e da versão 4.2.3 do Guibuilder. O seu desenvolvimento visou interatividade e simplicidade para que o usuário possa identificar com rapidez os locais onde deve inserir os dados necessários para as simulações, resultando em valores concisos e assertivos em todas as simulações. A produção da ferramenta também tinha como requisito ser uma simulação com uma resposta rápida e que não onere o sistema em que for executada e que não apresentasse falhas e quebras constantes.

#### III. Tecnologias utilizadas

O software de escolha para o desenvolvimento da ferramenta foi o SCILAB, o grande motivador desta escolha foi o fato de o SCILAB ser um programa gratuito, com um poder de processamento numérico similar ao do MATLAB,

um programa largamente utilizado dentro do departamento de Engenharia elétrica da UFV que necessita de licenças pagas para uso. O SCILAB conta também com a característica de ser open-source, o que reforça as melhorias propostas pela comunidade online. O SCILAB tem sua própria linguagem de programação e que orientada à análise numérica fornece bibliotecas nativas para simular sistemas de complexidade avançada.

Além das bibliotecas e funções nativas, ele permite construção de funções externas como foi feito para que a ferramenta se tornasse funcional. A função criada `_step_info` foram responsáveis por determinar os parâmetros de performance de curvas.

Por último, para desenvolvimento da interface gráfica de usuário, também chamada de GUI, foi utilizado o GUIBUILDER que é um módulo do SCILAB. Ele tem como característica facilitar essa construção da interface do usuário, permitindo o desenvolvedor construir o front-end da ferramenta com cliques e arraste, conceito conhecido como “drag and drop”. Toda esta facilidade foi utilizada para construção da ferramenta voltada para a interação com o usuário final.

## Implementação da ferramenta

### I. Arquitetura do sistema

A construção da ferramenta foi feita de forma que a arquitetura dela da resultasse em módulos destacados da seguinte forma:

#### a. Definição da planta a ser simulada

Neste módulo, a entrada é a escolha da planta, dando as cinco opções a simular: RLC série para controle de tensão no capacitor, RLC série para controle de corrente, planta térmica para controle

de temperatura, planta mecânica para controle do ângulo do pêndulo invertido, planta hidráulica para controle de nível do tanque e uma planta personalizada. Ele abre uma janela com imagem demonstrativa da planta, seus parâmetros físicos e a sua função de transferência.

#### b. Definição dos parâmetros físicos e dos coeficientes do PID

Este módulo recebe a entrada dos parâmetros desejados pelo usuário e faz os cálculos matemáticos para determinar a função de transferência da planta e da função do PID. Ele dá como retorno uma área onde mostra as funções calculadas.

#### c. Área de demonstração gráfica das plantas

Nesta seção o programa requer como entrada uma das respostas para as funções de transferência, bem como perguntar a visualização da saída da planta controlada e/ou sem o controle PID. A saída será a resposta gráfica das plantas em si.

#### d. Módulo de cálculo de desempenho

Neste módulo são feitas as análises de desempenho das plantas lado a lado em uma tabela para mostrar a diferença entre eles com e sem a ação do controlador PID.

## RESULTADOS

Para explorar os resultados da ferramenta desenvolvida neste trabalho, será usado como exemplo os coeficientes que modelam

A figura 1 representa a interface gráfica da ferramenta sem nenhuma alteração e ao longo do exemplo de modelagem, simulação e controle, foi possível observar seu funcionamento.

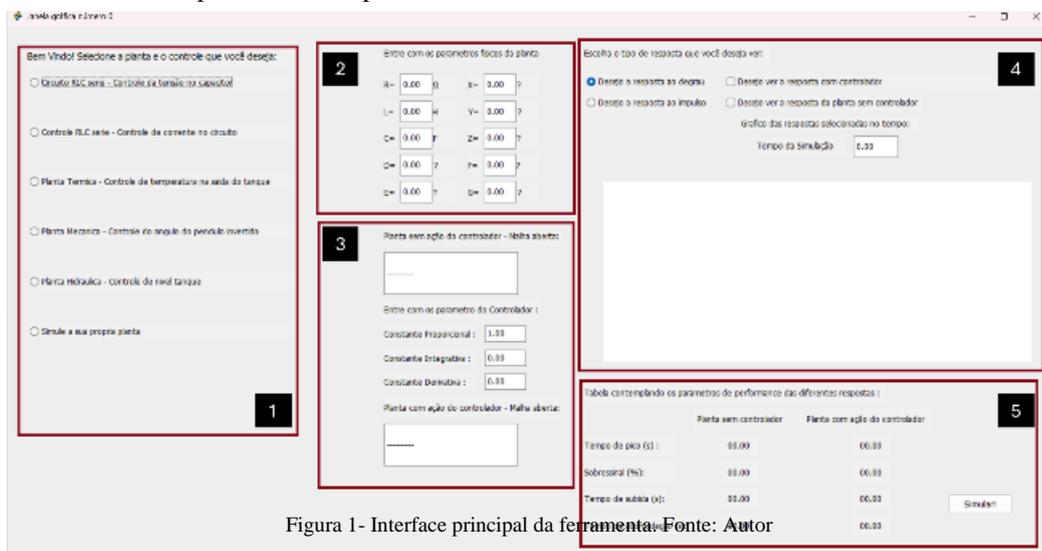


Figura 1- Interface principal da ferramenta. Fonte: Autor

I. Seleção de Planta: Nesta seção foi alocado a seleção de plantas para simulação do usuário com cinco opções pré-definidas e uma opção livre para que o usuário entre com os dados físicos e coeficientes das plantas. Foi selecionada a planta de controle de tensão no capacitor, com os valores pré-definidos na tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros físicos do exemplo

Parâmetro físico	Valor
$R$	$40 \Omega$
$L$	$4 H$
$C$	$0,25 F$

II. Ao selecionar a planta, uma janela pop-up aparece para exemplificar a planta e correlaciona com a seção 2 – Entrada dos parâmetros físicos, como são exemplificadas na figura 2 e na figura 3:

III. Demonstração da Função de transferência (F.T.) e construção do controlador PID: Após clicar no botão simular, os dados da planta que foram inseridos retornam a F.T. da planta. As equações mostradas nos campos para visualização se trata das plantas em malha aberta. Para construção do PID, é necessário entrar com valores numéricos nos campos das constantes proporcionais, integrais e derivativas. Seguindo a equação 1.0, ele calcula o PID e pela equação 2.0 ele mostra planta com ação do PID.

A construção do PID foi feita por iteração até que se obteve os seguintes valores da tabela 2 e na figura 4.

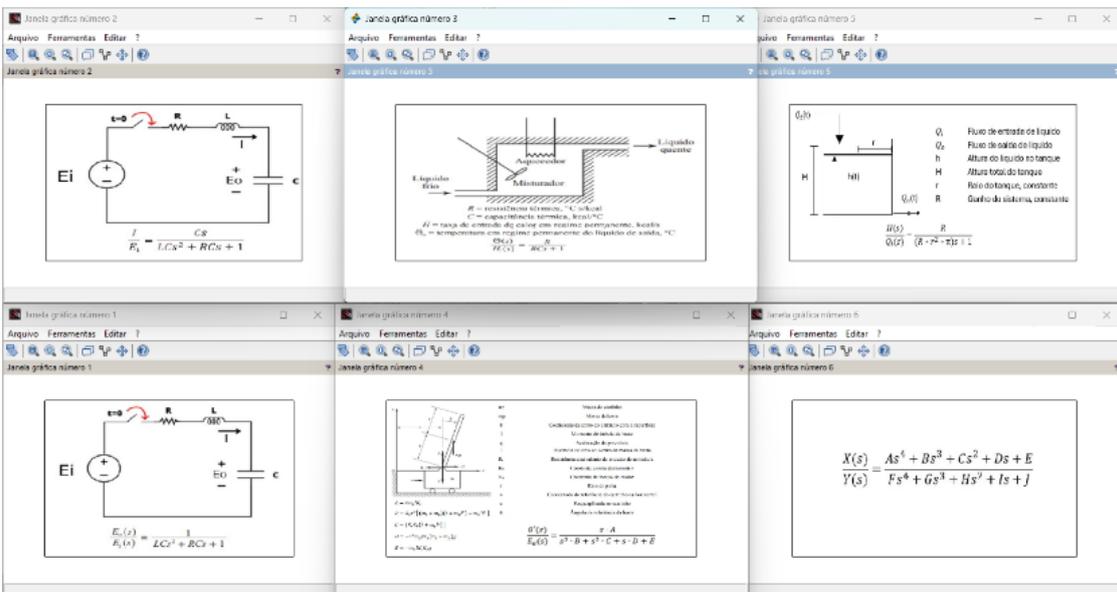


Figura 2- Pop-ups mostradas ao usuário quando uma planta é selecionada para simulação. Fonte: Autor

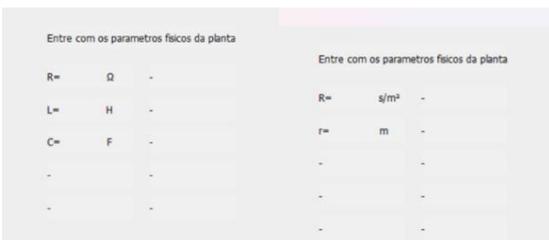


Figura 3 – Tela padrão para a entrada dos parâmetros da planta de controle de tensão e de controle de nível. Fonte: Autor

Tabela 2 - Valores finais do controlador PID construído no exemplo

Ganhos do controlador	Valor
$K_p$	50
$K_i$	5
$K_d$	1

Planta sem ação do controlador - Malha aberta:

$$\frac{1}{1 + 10s + s^2}$$

Entre com os parametro do Controlador :

Constante Proporcional : 50

Constante Integrativa : 5

Constante Derivativa : 1

Planta com ação do controlador - Malha aberta:

$$\frac{5 + 50s + s^2}{s + 10s^2 + s^3}$$

Figura 4 - Demonstração da F.T. e construção do controlador PID, junto a demonstração F.T. com o controlador aplicado.  
Fonte: Autor

- IV. Seção de resposta gráfica da ferramenta: A resposta gráfica foi construída com itens principalmente clicáveis e dependentes da seleção do usuário, como mostra a figura 5.
- Seletores de resposta: É possível selecionar, exclusivamente, apenas um tipo de resposta entre “degrau” e “impulso”.
- Visualizadores de resposta: É possível selecionar a visualização das plantas originais e com ação do controlador, não exclusivamente. Inclusive, é possível não ver resposta gráfica, caso não seja selecionada nenhuma caixa.
- Tempo e passo simulação: Foi designado um tempo de simulação de 15 segundos e o passo fixo de 0.001s para todas as simulações.

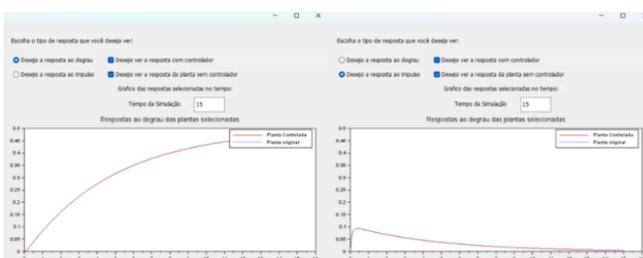


Figura 5 - Seção de resposta gráfica demonstrando resposta ao degrau e ao impulso Fonte: Autor

- V. A área de visualização dos parâmetros de performance: Esta seção foi construída com os parâmetros de performance que

são observados nas respostas das plantas quando comparadas entre a sua versão com o controle e sem o controle do PID aplicado.

Os parâmetros utilizados foram o tempo de pico, o Sobressinal, tempo de subida, tempo de acomodação e valor final em estado estacionário, como mostra a figura 6.

Tabela contemplando os parametros de performance das diferentes respostas :		
	Planta sem controlador	Planta com ação do controlador
Tempo de pico (s) :	15	0.6765
Sobressinal (%) :	0	2.2311
Tempo de subida (s) :	13.356	0.75
Tempo de acomodação (s) :	9.0366	0.3312
Valor em estado estacionario :	0.4761	1

Tabela contemplando os parametros de performance das diferentes respostas :		
	Planta sem controlador	Planta com ação do controlador
Tempo de pico (s) :	-	-
Sobressinal (%) :	-	-
Tempo de subida (s) :	-	-
Tempo de acomodação (s) :	-	-
Valor em estado estacionario :	-	-

Figura 6 - Seção dos parâmetros de performance para a resposta ao degrau, com e sem controle, acima. Abaixo, desconsiderados para a resposta ao impulso. Fonte: Autor

### Análise de Resultados do exemplo

Com o objetivo de verificar os conhecimentos teóricos sobre a atuação de cada tipo de ganho do controlador, foi construído um controlador PID testando o aumento dos parâmetros e observando suas respostas gráficas.

#### Variações em $K_p$

Primeiro, foram feitos os ajustes no ganho proporcional -  $K_p$  com  $K_i=K_d=0$  para que se atingisse o mais próximo da resposta unitária. É possível observar o sobressinal crescendo à medida que o tempo de subida diminui e o valor em estado estacionário se aproxima do valor de referência, observadas na figura 7.

Na tabela 3, tem-se os parâmetros de desempenho obtidos nas variações de  $K_p$ .

Tabela 3 - Variação dos parâmetros de desempenho com a variação de  $K_p$

$K_p$	$T_p$	$S_s$	$T_s$	$T_{ss}$	$Y_{ss}$
10	15,00	0,00%	1,78	3,23	0,91
25	3,14	0,00%	0,64	1,11	0,96
50	0,62	4,59%	0,30	0,84	0,98
100	0,36	16,50%	0,16	0,81	0,99

Tabela 4 - Variação dos parâmetros de desempenho com a variação de  $K_d$

$K_d$	$T_p$	$S_s$	$T_s$	$T_{ss}$	$Y_{ss}$
0	0,62	4,59%	0,30	0,84	0,98
1	0,67	2,28%	0,33	0,75	0,98
5	3,99	0,00%	0,43	0,76	0,98
25	13,63	0,00%	0,60	1,66	0,98

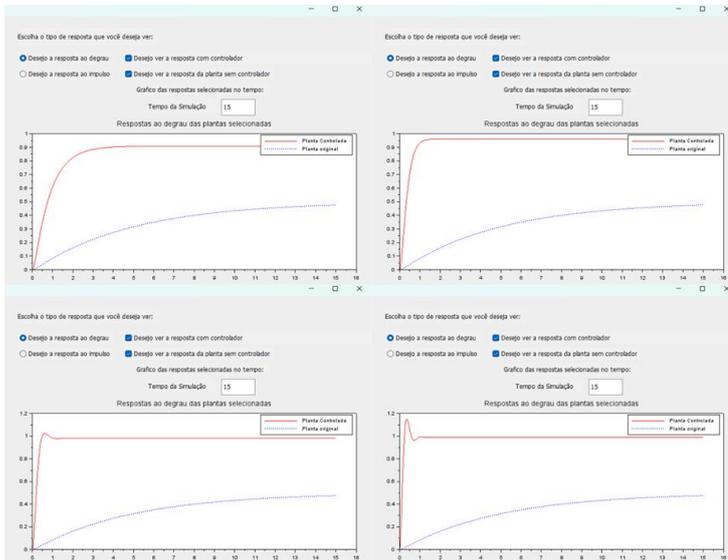


Figura 7 - Respostas gráficas à variação de  $K_p$  do PID Fonte: Autor

Variações em  $K_d$

Fixado o valor de  $K_p=50$  e  $K_i=0$ , variou-se  $K_d$  entre 0 e 25, representado na figura 8. Pode-se observar o aumento do tempo de pico e a diminuição do sobressinal. É possível notar que a planta tem sua resposta atrasada quando há o crescimento de  $K_d$ .

Variações em  $K_i$

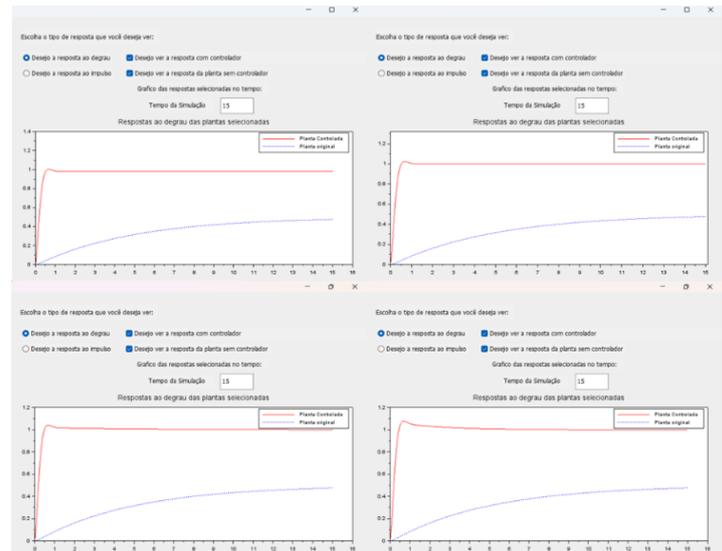


Figura 9 - Resposta gráfica às variações de  $K_i$ . Fonte: Autor

Fixados os valores de  $K_p$  e  $K_d$ , variou-se  $K_i$  entre 0 e 20 e foram analisados as respostas gráficas e os parâmetros de desempenho, observados na figura 8. Pode-se observar a diminuição do tempo de subida, em contrapartida o aumento do tempo de estabilização e o aumento do sobressinal. No entanto, a contribuição principal é fazer a resposta atingir o valor unitário, corrigindo o erro acumulado.

Na tabela abaixo os parâmetros de desempenho obtidos nas variações de  $K_i$

Tabela 5 - Variação dos parâmetros de desempenho com a variação de  $K_i$

$K_i$	$T_p$	$S_s$	$T_s$	$T_{ss}$	$Y_{ss}$
0	0,66	2,28%	0,32	0,74	0,98
5	0,67	2,23%	0,33	0,75	1,00
10	0,68	4,03%	0,32	1,05	1,00
20	0,68	7,78%	0,30	3,02	1,00

Conclusão

Este trabalho explorou e comprovou a eficácia do SCILAB como uma ferramenta acessível e competente para processamento numérico nas análises de sistemas. Por meio de uma interface gráfica é possível facilitar a análise pratica dos

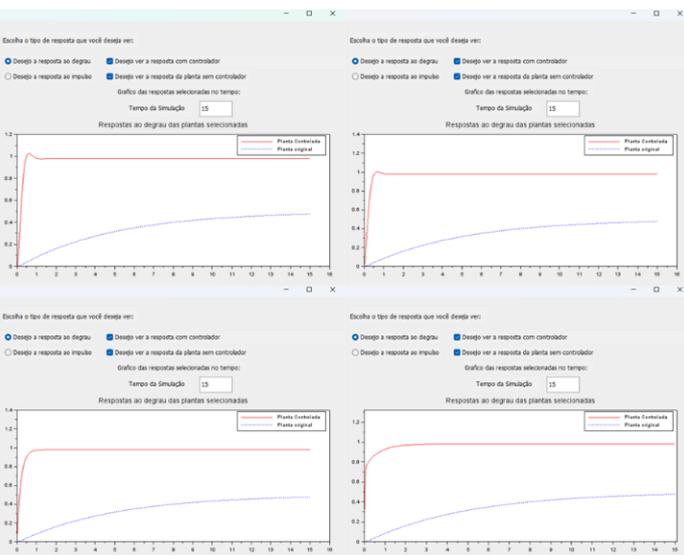


Figura 8 - Respostas gráficas à variação de  $K_d$  Fonte: Autor

Na tabela 4, tem-se os parâmetros de desempenho obtidos nas variações de  $K_d$

parâmetros do controle de um controlador PID, estimulando o interesse pela disciplina e incentivando uma aprendizagem ativa e consolidadora. Para consolidar o trabalho, a ferramenta deve ser apresentada para comunidade discente para que ela seja testada e sejam feitas sugestões e críticas.

Também é possível comprovar as ações descritas em literatura para os ganhos de um controlador PID, evidenciando como seu efeito é importante para ajustes em processos, seja para obter respostas rápidas, estáveis e sem erros.

Ainda em tempo, é possível citar que este trabalho pode ser melhorado e atualizado de acordo com a vontade do usuário, pois foi construída de forma modular e o SCILAB tem código aberto.

### Agradecimentos

Agradeço imensamente a minha família, que me deu asas para voar e minha esposa por me dar suporte e construir uma bela vida comigo. Gostaria de agradecer ao meu orientador, Rodolpho por acreditar no meu projeto em nome do DEL. Agradeço à Viçosa e a UFV por terem sido minha casa por 10 anos.

### Referencias

- [1] J. C. Geromel e A. G. B. Palhares, *Análise linear de sistemas dinâmicos: teoria, ensaios práticos e exercícios*. São Paulo: Editora Blucher, 2019.
- [2] R. A. Ricco, *Identificação de sistemas utilizando métodos de subespaços*. 2018.
- [3] M. Jáno e K. Žáková, “SciLab Based Remote Control of Thermo-Optical Plant,” *International Journal of Online Engineering*, vol. 7, no. 4, 2011.
- [4] P. S. da Motta Pires, *Introdução ao Scilab Versão 3.0*, Departamento de Engenharia de Computação e Automação da UFRN, Natal, RN, 2008. Disponível em: [www.dca.ufrn.br/pmotta/sciport-3.0.pdf](http://www.dca.ufrn.br/pmotta/sciport-3.0.pdf).
- [5] J. H. A. Mascena, *Sistemas dinâmicos e caos: do clássico ao quântico*. 2021.
- [6] N. A. Keles et al., “Módulos didáticos para o ensino de análise e controle de sistemas dinâmicos,” *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, pp. 1893–1898, 2017.
- [7] C. Dmitrii, “New Approach to the Transportation and Installation of Heavy-Weighted Equipment Offshore,” M.S. thesis, Faculty of

Science and Technology, University of Stavanger, 2015.

[8] E. R. de Macedo et al., “WOLFRAM-Mathematica como meio facilitador de resoluções de equações diferenciais,” *Jornada de Iniciação Científica e Extensão*, vol. 18, no. 1, 2023.

[9] K. Ogata, *Engenharia de controle moderno*, 5ª ed. São Paulo: Pearson, 2010.

[10] A. C. de Paula Araujo, “Interface expositiva gráfica de controle sobre o sistema de um pêndulo invertido movido por um motor CC,” *Universidade Federal de Viçosa*.

[11] Q. Mahmood, A. Talal e S. Mohamedali, “Simulation and Performance of Liquid Level Controllers for Linear Tank,” *Jurnal Teknologi*, vol. 82, 2020, doi: 10.11113/jt.v82.14245.

[12] A. Teribele et al., “Parametric and Automated Brise-Soleil Prototype Using Digital Technologies,” *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 14, pp. 239-248, 2020.

[13] L. H. T. Cunha, “Controle Adaptativo aplicado a Sistemas de Refrigeração utilizando Módulos Peltier,” 2018.

[14] R. O. Brosler, “Controlador PID utilizando microcontrolador PIC,” 2014.

[15] P. Itävuo, E. Hulthén, and M. Vilkkö, “Feed-hopper level estimation and control in cone crushers,” *Minerals Engineering*, vol. 110, pp. 82–95, 2017.

[16] T. Á. Cantarero, “Diseño del controlador PID,” *Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla*, 2015

[17] R. C. Dorf e R. H. Bishop, *Sistemas de controle modernos*, 12ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.