



O Scilab como ferramenta de ensino para modelagem de sistemas dinâmicos de primeira e segunda ordem

Scilab as a teaching tool for modelling of dynamic systems of first and second order

Victor Inácio de Oliveira (victorif@hotmail.com)
Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP) e professor da Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT).

Isabelle Puertas Ruiz (isandypuertas@outlook.com)
Graduanda em Engenharia de Computação pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT).

Rafael Kenji Yamasita (rafael.kenji98@gmail.com)
Graduando em Engenharia de Computação pela Faculdade de Tecnologia Termomecânica (FTT).

FTT Journal of Engineering and Business. •
SÃO BERNARDO DO CAMPO, SP

NOV. 2019 • ISSN 2525-8729

Submissão: 5 mai. 2019. **Aceitação:** 25 ago. 2019

Sistema de avaliação: às cegas dupla (*double blind review*).

FACULDADE TECNOLOGIA
TERMOMECANICA, p. 78-94

Resumo

Este trabalho demonstra como o software Scilab pode ser utilizado como ferramenta de ensino de sistemas de controle dinâmicos. A modelagem de sistemas dinâmicos é parte integrante em disciplinas dos cursos de Engenharia, como elétrica, automação e computação. Tendo isso como ponto de partida, é fundamental conhecer ferramentas que permitam estudar a modelagem de sistemas dinâmicos de forma visual e simples. O Scilab é um software gratuito, e através de sua ferramenta denominada XCOS, é possível gerar diagramas de blocos com diferentes funções de transferência, permitindo assim uma análise direta da resposta dos sistemas a diferentes funções de impulso. Neste trabalho, ficou comprovado como o Scilab pode ser usado para modelar sistemas de primeira e segunda ordem. Através do levantamento de curvas de respostas foi possível demonstrar que o Scilab pode ser utilizado de forma bem eficaz no ensino de sistemas dinâmicos.

Palavras-chave: Modelagem. Sistemas dinâmicos. Sistemas de primeira ordem. Sistemas de segunda ordem.

Abstract

This paper presents how the software Scilab can be used as an important teaching tool for dynamic systems control. The modelling of these systems is part of the subjects for the Engineering courses, such as: Electrical, Automation and Computer. Having all of these mentioned aspects as a starting point, it is fundamental to know the tools that may allow the study of the modelling of the dynamic systems in a visual and simpler way. The Scilab is a free software and through the XCOS tool we can generate block diagrams with different transference functions, which can enable the direct analysis of answers for the systems at distinct impulse functions. In this paper it has been shown how Scilab can be used to model systems of first and second order. Through the response curves it was possible to demonstrate that the Scilab can be used as a very efficient software to teach dynamic systems.

Keywords: Modeling. Dynamic systems. First order systems. Second order systems.

Introdução

O estudo da modelagem de sistemas dinâmicos de controle é parte integrante de diversas disciplinas nas áreas de engenharia e tecnologia. Dentre elas, podemos destacar as disciplinas de controle e automação e modelagem de sistemas dinâmicos. Nesse contexto, o uso de uma ferramenta de software que permite visualizar o funcionamento global de um sistema dinâmico através de sua modelagem é fundamental para o desenvolvimento da disciplina, como ficou demonstrado em diversos trabalhos anteriores (AMARAL et al, 2015) e (FILHO; CARVALHO; VILLA, 2007) ou ainda em (TAMAYO; CANU; DUQUE, 2015). É nesse contexto que será apresentado neste trabalho como proceder para se utilizar a ferramenta de modelagem do software Scilab (SCILAB, 2019) de modo a realizar a modelagem e a análise das respostas em sistemas dinâmicos.

O Scilab (acrônimo de Scientific Laboratory) é uma ferramenta computacional poderosa e gratuita criada por pesquisadores da Ecole Nationale des Ponts et Chaussee (ENPC) e do Institut Nationale de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), ambos na França. Atualmente, ele é mantido e atualizado pelo ESI group (ESI, 2019), e vem sendo utilizado já há algum tempo por diversos institutos de pesquisa, universidades e empresas em geral em diferentes áreas como Física, Matemática, Engenharia e Computação (MARIANI, 2005), devido ao baixo custo de implementação e sua usabilidade simplificada. O Scilab faz parte de uma família de softwares que simulam ambiente de computação numérica. Dentro dessa família destaca-se também o MatLab (acrônimo de Matrix Laboratory), sendo que esse é um software proprietário e, por isso, só pode ser usado se sua licença for paga, porém, ainda assim, é bastante utilizado (MARCHETTO, 2016).

Nas próximas páginas, será apresentado um estudo de como utilizar o software Scilab para modelar e analisar sistemas dinâmicos de primeira e segunda ordem. Este estudo poderá ser utilizado como guia para que professores e alunos de cursos de Engenharia e de Tecnologia possam aplicar essa ferramenta para esse fim.

Fundamentação teórica

Sistemas dinâmicos

O estudo dos sistemas dinâmicos aborda técnicas de modelagem matemática, simulação e análise de diversos sistemas físicos, que normalmente são de interesse da área de engenharia (OGATA, 2011).

De modo geral, pode-se definir sistema como sendo um conjunto de componentes interconectados e interdependentes que atuam gerando um sinal de saída a partir de um sinal de entrada. Já um sistema dinâmico nada mais é que um sistema dependente do tempo (OGATA, 2011) e (NISE, 2012). Um exemplo de sistema dinâmico mecânico seria o de uma ponte que possui as tensões sobre ela dependente do tráfego de veículos, o que por sua vez depende do tempo. Um sistema muito utilizado didaticamente é o sistema massa-mola-amortecida. Mas, além desses exemplos, podemos ter outros das áreas de eletricidade, fluídica e termodinâmica; ou ainda sistemas híbridos como, por exemplo, os motores elétricos que são sistemas eletromecânicos (FELICIO, 2010).

A modelagem dos sistemas se inicia encontrando-se a equação diferencial que fundamenta todo e qualquer sistema. Para exemplificar, será analisado o sistema de massa-mola-amortecedor, conhecido como oscilador amortecido, que pode ser visto na figura 1. Nesse sistema, a massa m quando movimentada por uma força F oscila de forma amortecida fornecendo um deslocamento x que será a função do tempo. A modelagem desse sistema pode ser feita utilizando-se as leis de Newton e de Hooke (HALLIDAY, RESNICK, 2016).

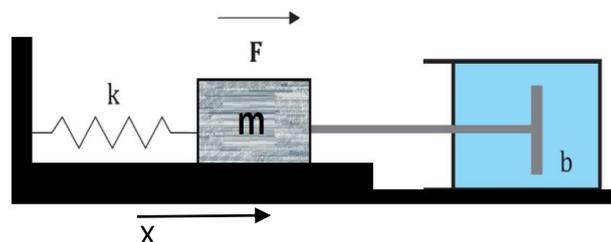


Figura 1: Sistema massa-mola-amortecedor, ou oscilador amortecido
Fonte: Elaboração dos autores (2019)

As forças em questão neste modelo serão: força elástica (F_{el}), força de resistência (F_r) e força externa (F), sendo a F_{el} devido à mola, a F_r devido ao amortecedor e a F é a aplicada sobre a massa de força externa. Essas forças podem ser vistas no diagrama referente à figura 2.

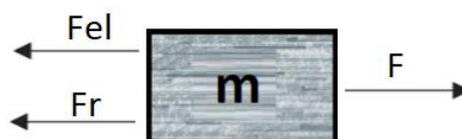


Figura 2: diagrama de forças do sistema massa-mola-amortecedor
Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Aplicando-se a segunda Lei de Newton teremos:

$$F(t) - Fel(t) - Fr(t) = ma(t) \quad (1)$$

É sabido que o módulo de $Fel(t) = kx(t)$ e que $Fr(t) = bv(t)$ (HALLIDAY, RESNICK, 2016), onde $v(t)$ é a velocidade em função do tempo, $x(t)$ é o deslocamento no tempo, k é a constante elástica da mola e b é o fator de amortecimento do amortecedor. Substituindo essas expressões em (1) temos:

$$F(t) - kx(t) - bv(t) = ma(t) \quad (2)$$

Sabe-se também que a velocidade pode ser encontrada pela derivada de deslocamento em relação ao tempo ($v(t) = x'(t)$) e que a aceleração é dada pela derivada segunda do deslocamento em relação ao tempo ($a(t) = x''(t)$) (HALLIDAY, RESNICK, 2016). Sendo assim, a equação final do sistema massa-mola-amortecedor, depois de um pequeno ajuste algébrico, pode ser representada da seguinte forma:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t) \quad (3)$$

Essa seria a equação matemática que modela o sistema do exemplo. Porém, para se realizar a análise computacional desse sistema, será preciso obter a função de transferência (FT) a partir dessa expressão. A FT pode ser obtida pela razão entre a Transformada de Laplace da função de saída pela Transformada de Laplace da função de entrada (FELICIO, 2010). Nesse caso, a função de entrada seria a força externa ($F(t)$) e a função de saída seria o deslocamento ($x(t)$). Ou seja, aplica-se força (impulso) para se verificar o deslocamento (resposta).

Aplicando o cálculo de Laplace na equação e considerando que o problema apresenta condições iniciais iguais a zero, vamos ter a seguinte equação:

$$ms^2X(S) + bsX(S) + kX(S) = F(S) \quad (3)$$

Rearranjando os termos, teremos:

$$G(S) = \frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (4)$$

A equação (4) é a função de transferência do sistema massa-mola-amortecedor, definida por $G(S)$, e pode ser utilizada nas análises de sistemas de forma computacional. Uma das análises mais realizadas é a chamada impulso-resposta em que uma função $F(S)$ conhecida é aplicada na entrada, e na saída será obtida a função resposta $X(S)$; isso é possível já que: $X(S) = F(S)*G(S)$. A Figura 2 mostra uma representação de como seria esse processo.

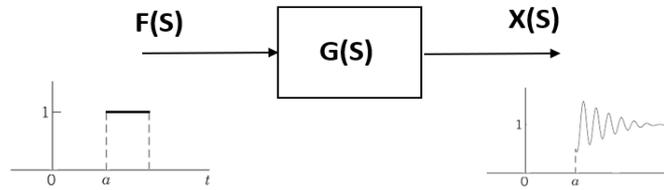


Figura 3: Exemplo do processo de análise por impulso-resposta.
Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Sistemas de primeira ordem e sistemas de segunda ordem

Pode-se definir um sistema de primeira ordem como sendo aquele cuja saída $x(t)$ pode ser modelada por uma equação diferencial de primeira ordem. Já um sistema de segunda ordem é aquele modelado com uma equação diferencial de segunda ordem. (FELICIO, 2010).

A equação geral de um modelo de primeira ordem pode ser vista da seguinte forma (5).

$$a \frac{dx(t)}{dt} + bx(t) = cy(t) \quad (5)$$

onde $x(t)$ representa a função de entrada, $y(t)$ a função de saída e a , b e c são constantes. Comumente, as constantes a , b e c são substituídas por K_p e τ_p (FELICIO, 2010). Dessa forma, o modelo pode ser assim enunciado:

$$\tau_p \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = k_p y(t) \quad (6)$$

Essas constantes são chamadas de constante de tempo, no caso de τ_p , e ganho estacionário, no caso de K_p . Elas têm grande influência sobre os sistemas de primeira ordem como pode ser observado nos resultados deste trabalho.

Para se obter a função de transferência de um sistema de primeira ordem, basta aplicar a Transformada de Laplace em ambos os lados da equação do modelo. Nesse caso, teremos a equação (6), como segue:

$$\tau_p s X(S) + X(S) = k_p Y(S) \quad (7)$$

Rearranjando a equação (7), ela será assim representada:

$$G(S) = \frac{X(S)}{F(S)} = \frac{kp}{\tau ps + 1} \quad (8)$$

que é a função de transferência típica de um sistema de primeira ordem.

Já um sistema de segunda ordem pode ser modelado genericamente por uma equação como a vista a seguir:

$$a \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + cx(t) = dy(t) \quad (9)$$

que se define, normalmente (NISE, 2012) da seguinte forma:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi\omega \frac{dx(t)}{dt} + \omega^2 x(t) = k\omega^2 y(t) \quad (10)$$

onde ξ é o fator de amortecimento do sistema e ω é a frequência natural de oscilação do sistema. Assim como nos sistemas de primeira ordem, esses parâmetros têm grande influência na resposta dos sistemas.

Do mesmo modo, para se obter a função de transferência de um sistema de segunda ordem, basta aplicar a Transformada de Laplace em ambos os lados da equação do modelo, nesse caso, a equação (10). E assim tem-se:

$$s^2 X(S) + 2\xi\omega s X(S) + \omega^2 X(S) = k\omega^2 Y(S) \quad (11)$$

que rearranjada transforma-se em:

$$G(S) = \frac{X(S)}{Y(S)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (12)$$

que é a função de transferência típica de um sistema de segunda ordem.

Materiais e métodos

Configuração dos parâmetros gerais do software

O XCOS é um *add-in* do Scilab, ou seja, ele é um editor gráfico para projetar modelos de sistemas híbridos. Esses modelos podem ser projetados, carregados, salvos, compilados e simulados, o que representa solução econômica e eficiente para as necessidades industriais e acadêmicas; ele também fornece funcionalidades para modelagem de sistemas mecânicos (automotivos e aeronáuticos), circuitos hidráulicos (barragens e modelagem de tubos), sistemas de controle, entre outros. O XCOS está disponível gratuitamente e é distribuído juntamente com o Scilab. O site oficial do Scilab contém exemplos específicos para os mais diversos usos dessa ferramenta (SCILAB, 2018).

Além disso, o software pode ser baixado de maneira gratuita. A versão utilizada nesta pesquisa foi a 6.0.2, a última lançada até a data da elaboração deste trabalho.

Após a instalação do software, para sua inicialização, basta encontrar a ferramenta XCOS que aparece em um botão na barra do canto superior esquerdo, como demonstra a Figura 4. Para modelagem de sistemas, é essa a ferramenta que será utilizada.

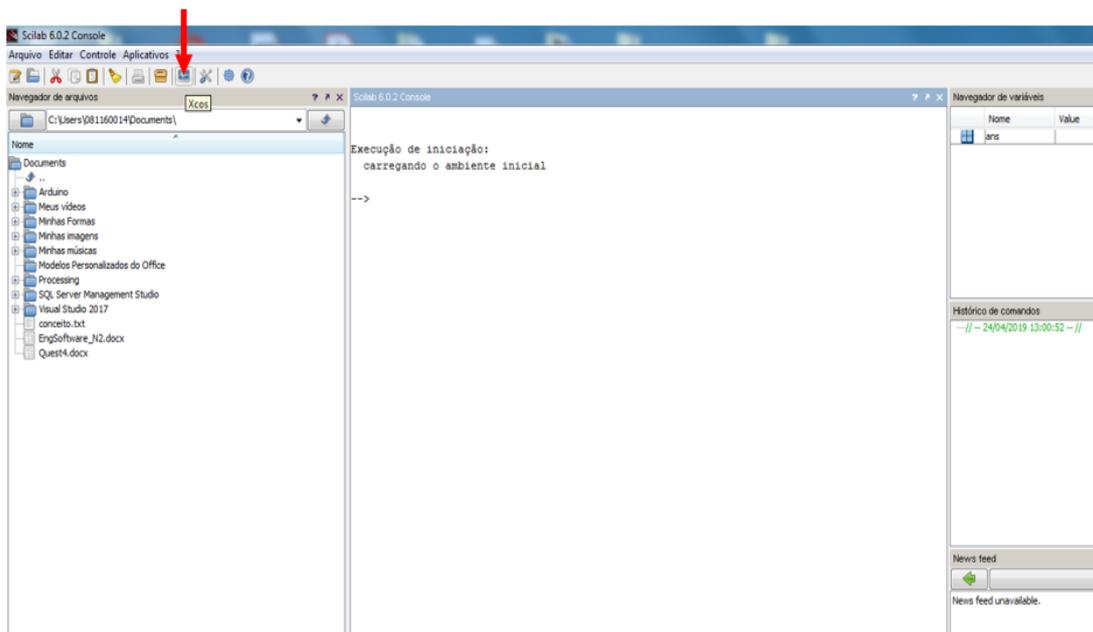


Figura 4: Foto da tela de entrada do software Scilab versão 6.0.2.

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Ao clicar na ferramenta, duas páginas serão abertas, mostrando o navegador de paleta e uma página em branco onde o ambiente será configurado bloco a bloco (figura 5).

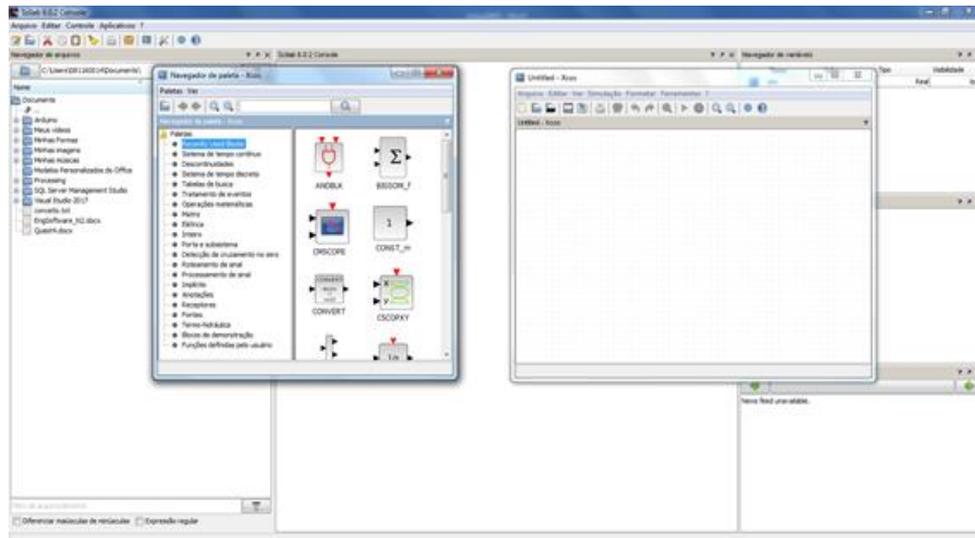


Figura 5: exemplo de tela de edição com a paleta de componentes.
 Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Para levar algum bloco do navegador de paleta para o projeto em branco, basta clicar e arrastá-lo para dentro do espaço vazio. Observe que, para encontrar alguns blocos, existe a funcionalidade da busca por nome. A conexão entre um bloco e outro é feita clicando-se na seta que indica que um atrelamento é permitido. Basta pressionar e arrastá-la até o ponto de entrada de outro componente. Setas que apontam para fora do objeto são saídas, e para dentro, entradas. Na Figura 6, é possível ver um exemplo disso; já na tabela 1, podem ser vistos alguns blocos que são usados de forma recorrente, bem como um resumo de suas funções e configurações.

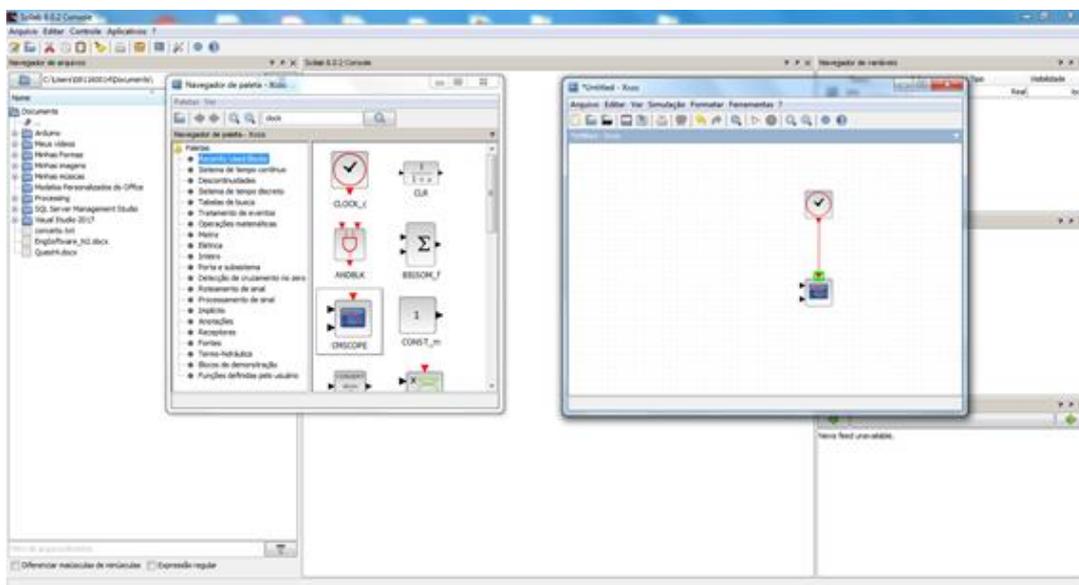


Figura 6: Exemplo de conexão entre blocos.
 Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Tabela 1: Resumo dos componentes mais utilizados no XCOS para simulação e análise de sistemas de primeira e segunda ordem

BLOCO	FUNÇÃO	CONFIGURAÇÃO
<p>CLOCK_C</p> 	Utilizado para gerar a base de tempo de amostragem para a geração dos gráficos.	Recomenda-se manter a configuração padrão.
<p>CSCOPE</p> 	Capturar a variação de sinais em função do tempo e plotar os gráficos.	Neste bloco, os parâmetros Ymin e Ymáx são referentes ao eixo Y e o “refresh period” diz respeito ao eixo X. Recomenda-se alterar conforme a necessidade.
<p>MUX</p> 	Captura dois sinais de fontes diferentes e faz sua multiplexação. Este bloco é útil para mostrar mais de um gráfico ao mesmo tempo em um único CSCOPE.	Recomenda-se manter a configuração padrão.
<p>STEP_FUNCTION</p> 	Utilizada para gerar uma função degrau. Normalmente esse tipo de função é utilizado como função impulso.	Pode-se alterar a amplitude do degrau e também o seu valor de início.
<p>CLR</p> 	Neste bloco, é colocada a função de transferência do sistema.	Editar a função conforme obtida na modelagem

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Outra configuração importante da ferramenta XCOS é o parâmetro de tempo de integração, que deve estar alinhado com o parâmetro *refresh period* do bloco CSCOPE. A Figura 7 mostra onde esse parâmetro pode ser encontrado em (a) e em (b) e onde ele pode ser alterado.

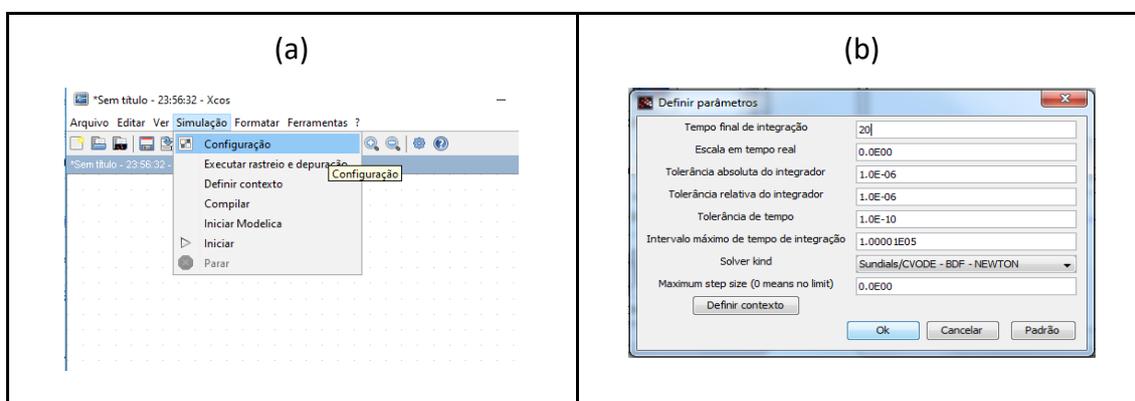


Figura 7: Tela de configuração do parâmetro “tempo final de integração”.

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Montagem para análise de sistemas de primeira ordem

Um sistema de primeira ordem se caracteriza por possuir uma função de transferência derivada de uma equação diferencial de ordem um, como a equação (6). Para simular computacionalmente a resposta de um sistema desse tipo a um impulso de entrada, será preciso construir um diagrama de blocos no XCOS como o apresentado na figura 8. Nele, foram utilizados, basicamente, um bloco CLR para se definir a função de transferência, um bloco STEP_FUNCTION, utilizado como função de entrada e um CSCOPE, destinado a capturar as funções de entrada e de saída. Além desses, pode-se ver os blocos MUX e CLOCK_C, sendo que o primeiro tem por função mostrar os dois gráficos ao mesmo tempo na tela, e o segundo, gerar a base de tempo para a aquisição, como foi descrito na tabela 1.

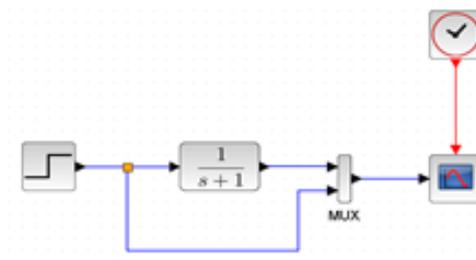


Figura 8: Diagrama de blocos utilizado para simular um sistema de primeira ordem. Nesse exemplo, $K_p = 1$ e $\tau_p = 1$.
Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Os valores simulados para este sistema estão resumidos na Tabela 2 a seguir. Foram feitos testes com a variação de K_p com τ_p fixo e da variação de τ_p com K_p fixo. As curvas de resposta obtidas podem ser vistas em resultados e discussões.

Tabela 2: Mostra como foram variados os parâmetros K_p e τ_p para as simulações do sistema de primeira ordem.

<i>Fixo</i>	<i>Varição τ_p</i>	<i>Fixo</i>	<i>Varição K_p</i>
$K_p = 1$	$\tau_p = 0,1$	$\tau_p = 1$	$K_p = 0,1$
	$\tau_p = 0,5$		$K_p = 1$
	$\tau_p = 1$		$K_p = 2$
	$\tau_p = 1,5$		$K_p = 1,5$
	$\tau_p = 2$		$K_p = 2$

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Montagem para análise de sistemas de segunda ordem

Um sistema de segunda ordem se caracteriza por possuir uma função de transferência derivada de uma equação diferencial de ordem dois. Para simular computacionalmente a resposta de um sistema desse tipo a um impulso de entrada, será preciso construir um diagrama de blocos no XCOS como o da Figura 9. Nele, foram utilizados, basicamente, os mesmos blocos aplicados na simulação do sistema de primeira ordem, porém agora a função de transferência em CLR muda.

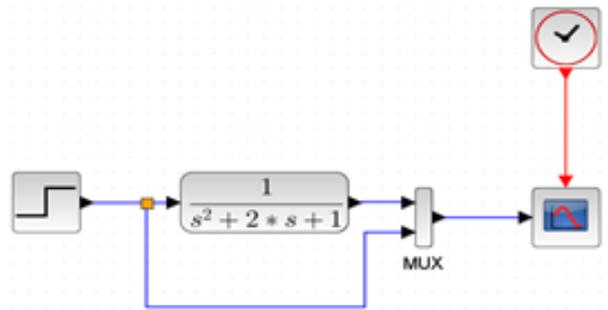


Figura 9: Diagrama de blocos utilizado para simular um sistema de segunda ordem. Nesse exemplo, $\omega = 1$, $K_p = 1$ e $\xi = 1$.
Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Tabela 3: Mostra como foram variados os parâmetros ω , K_p e ξ para as simulações do sistema de segunda ordem.

Fixo	Variacão ξ	Fixo	Variacão ω
$\omega = 1$	$\xi = 0.1$	$\omega = 1$	$\omega = 0.1$
	$\xi = 0.5$		$\omega = 0.5$
	$\xi = 1$		$\omega = 1$
	$\xi = 1.5$		$\omega = 1.5$
	$\xi = 2$		$\omega = 2$

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Podem ser definidos quatro tipos de respostas de sistemas de segunda ordem a partir da variação dos valores do fator de amortecimento (NISE, 2012): se $\xi > 1$, o sistema é definido como superamortecido; se $\xi = 1$, tem-se um sistema criticamente amortecido; se $0 < \xi < 1$, o sistema é denominado subamortecido e, por fim, se $\xi = 0$, o sistema é conhecido como não amortecido. Na próxima seção, são mostradas curvas obtidas para essas quatro situações; para esta análise foram utilizados os valores constantes da Tabela 4, destacada logo a seguir.

Tabela 4: Valores utilizados para simular os diferentes tipos de respostas de um sistema de segunda ordem

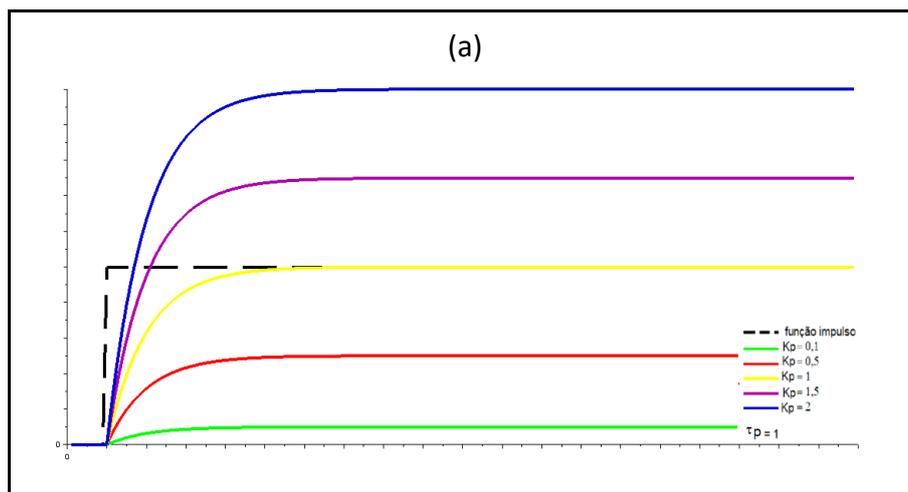
Fixo	Variação ξ	Tipo de resposta
$\omega = 1$	$\xi = 0$	Não amortecido
	$\xi = 0,2$	Subamortecido
	$\xi = 1$	Criticamente amortecido
	$\xi = 1,5$	Superamortecido

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Resultados e discussões

Análise dos sistemas de primeira ordem

A partir dos parâmetros mostrados na tabela 2, foi possível obter a variação das curvas de respostas variando-se K_p com τ_p fixo e τ_p com K_p fixo. Os resultados são apresentados na figura 10. É possível notar que, com o aumento de K_p , houve uma maior intensidade do sinal de resposta. Isso era esperado, já que o ganho é o parâmetro que define a intensidade do sinal de resposta (ver Figura 10(a)). Já com o aumento de τ_p houve um tempo maior para a curva de resposta alcançar a curva de impulso em intensidade. Isso também era esperado, uma vez que a constante de tempo define o momento de chegada à curva de impulso pela curva de resposta (ver figura 10(b)).



Continua.

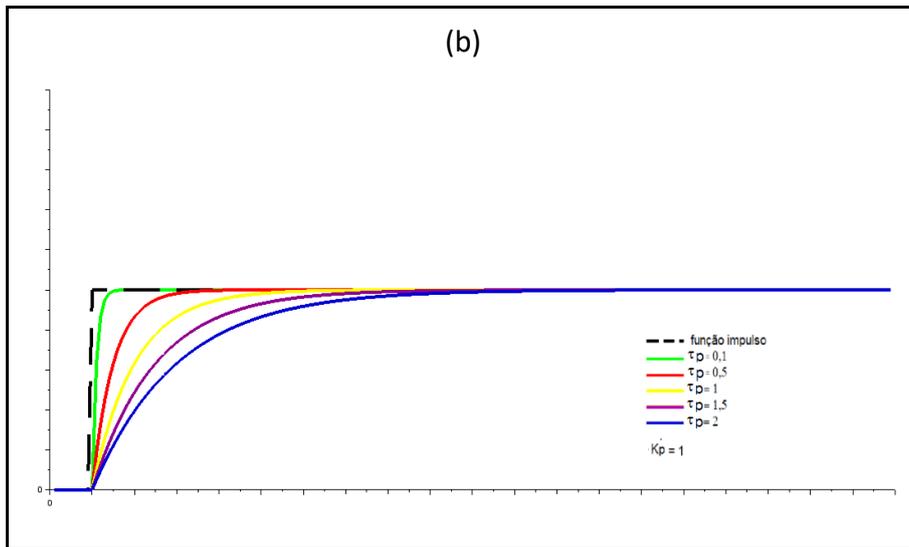
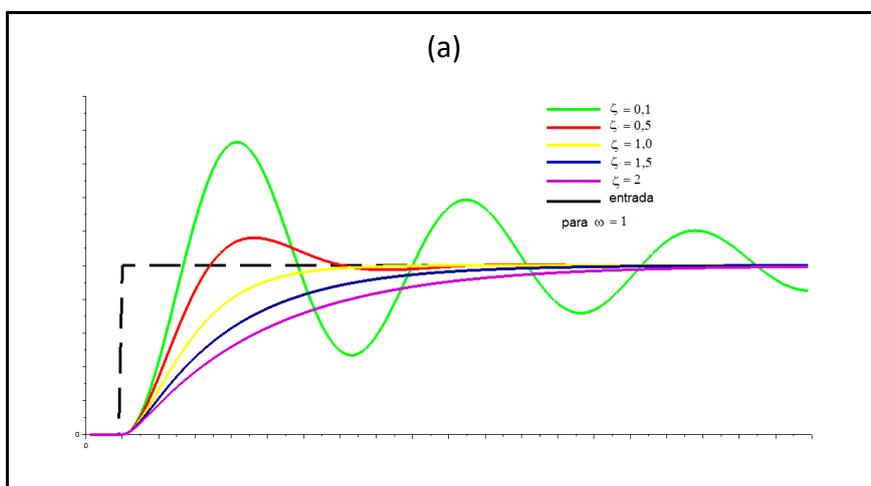


Figura 10: Em (a) é possível ver a variação da curva de resposta conforme K_p é modificado, e em (b) tem-se a variação da resposta com a variação de τ_p .
 Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Análise dos sistemas de segunda ordem

A partir dos parâmetros vistos na Tabela 3, foi possível obter a variação das curvas de respostas variando-se ξ com ω fixo, e também ω com ξ fixo. Os resultados são apresentados na Figura 11. É possível notar nessa figura que aumentando-se o fator de amortecimento (ξ) ocorre uma diminuição na oscilação do sistema. Já em (b) é possível notar um aumento no tempo de chegada à resposta à medida que a frequência natural (ω) é amplificada.



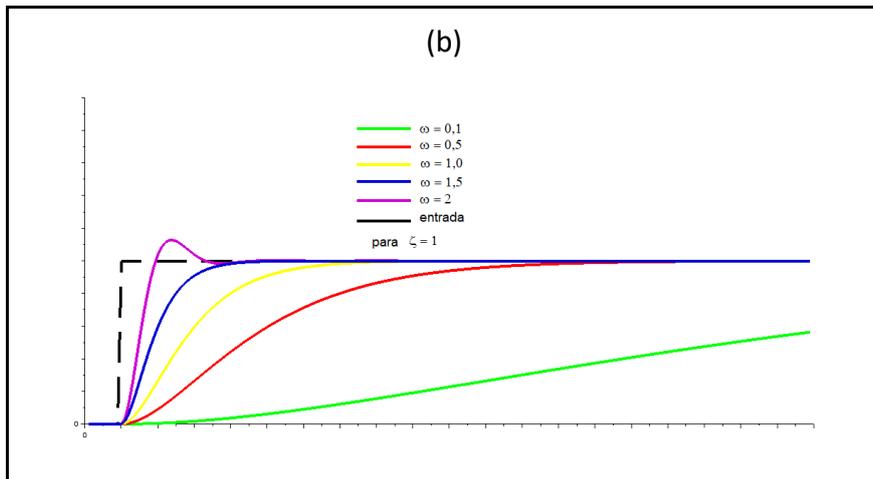


Figura 12: Em (a) é possível ver a variação da curva de resposta conforme ζ é modificado, e em (b) tem-se a variação da resposta com a variação de ω .

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

As curvas da Figura 13 representam as repostas para os sistemas de segunda ordem: não amortecido, subamortecido, criticamente amortecido e superamortecido, obtidas para as faixas de ζ demonstradas na seção anterior.

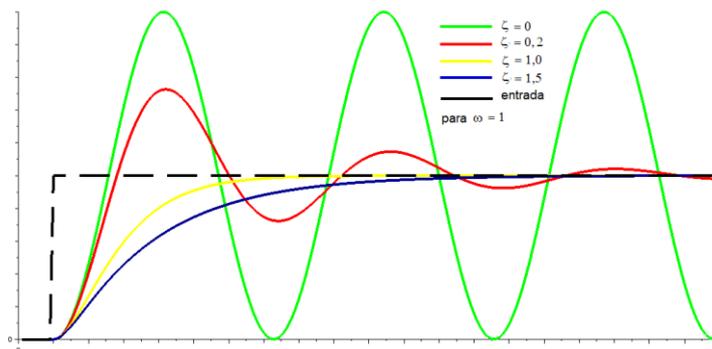


Figura 13: Mostra as diferentes repostas obtidas a partir da variação de ζ .

Fonte: Elaboração dos autores (2019)

Considerações finais

O estudo dos sistemas dinâmicos é parte integrante dos cursos de engenharia em diversas universidades e faculdades. Tendo isso como ponto de partida, faz-se necessário o uso de um software para modelar esses sistemas. O Scilab mostrou-se, neste trabalho, uma alternativa viável para ser utilizado na modelagem e simulação dos sistemas de primeira e de segunda ordem.

Foi possível mostrar qual o procedimento de configuração dos parâmetros da ferramenta XCOS que devem ser alterados para que ela seja utilizada de forma adequada. Em seguida, através do

levantamento das curvas, ficou demonstrado como os parâmetros K_p e τ_p influenciam os sistemas de primeira ordem, como os parâmetros ξ e ω afetam um sistema de segunda ordem e como obter os diferentes tipos de resposta para esse sistema. Além disso, outros tipos de simulações podem ser feitos, como por exemplo, análise do algoritmo PID, como já foi apresentado em outros trabalhos (RUIZ, 2018).

A partir dos resultados referentes às simulações e à modelagem, podemos afirmar que o Scilab, mesmo sendo gratuito, se equivale a softwares proprietários tais como o MatLab, quando utilizado para análise das respostas dos sistemas dinâmicos de primeira e de segunda ordem. Além disso, sua usabilidade simplificada facilita a sua implementação para esse fim.

Referências

AMARAL, T.R., LEITE, N.M.G., LADEIA, V.F.A.C., CARVALHO, R.S., *Modelagem e simulação de sistemas dinâmicos com o Scilab/Xcos: um caderno didático*, Anais do 6º Simpósio Hipertexto e Tecnologias na Educação, Pernambuco, 2015.

ESI GROUP. Disponível em: <https://www.esi-group.com/>. Acesso em 30 setembro de 2019

FELICIO, L.C.. *Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta*. São Paulo: Rima, 2010

FILHO, P.T.S., CARVALHO, M.O.M., VILLA, C.V.S., *Utilização de ferramenta computacional para o ensino da dinâmica em engenharia mecânica*, Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Curitiba, 2007.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., *Fundamentos de física 1 - Mecânica*, 10ªed. São Paulo: LTC, 2016

MARCHETTO, R., *Utilização do software MATLAB como recurso tecnológico de aprendizagem na transformação de matrizes em imagens*. Florianópolis: Revemat, 2016.

MARIANI, V.C., PRETO, T.M., GUEDES, A.L.P., *Utilização do maple, matlab e scilab nos cursos de engenharia*, Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Campina Grande, 2005

NISE, N. S. *Engenharia de sistemas de controle*. 6a. ed. São Paulo: LTC, 2012.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5a. ed., Pearson, São Paulo, 2011.

RUIZ, I.F., YAMASITA, R.K., *Estudo de controladores PID utilizando arduino uno conectado ao software scilab*, X Congresso Brasileiro de Iniciação Científica, Santos, 2018

SCILAB. Disponível em: <https://www.scilab.org/>. Acesso em 31 maio de 2019

TAMAYO, F.J., CANU, M., DUQUE, M., *Didactic engineering applied to control system learning: equilibrium and stability concepts in the ball and beam experiment*. Researchgate, 2015.