

DESENVOLVIMENTO DE AMBIENTE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE COMO FERRAMENTA DE ENSINO E APRENDIZAGEM

José Anderson Silva dos Santos - joseanderson1995silva@gmail.com

Sammara Raquel Vilar - sammaravilar@gmail.com

Ademar Gonçalves da Costa Junior - ademarcosta@ifpb.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

Laboratório de Instrumentação, Sistemas de Controle e Automação (LINSCA)

João Pessoa – Paraíba, Brasil

Resumo: *O uso de ferramentas de apoio educacional tem se tornado imprescindível para que o aluno possa absorver o conteúdo lecionado em disciplinas, contextualizando esse aprendizado por meio de gráficos advindos de ambientes de simulação e/ou experimentos. Esse artigo apresenta o resultado inicial do desenvolvimento de um ambiente computacional envolvendo os conceitos da disciplina de Sistemas de Controle I do curso de Engenharia Elétrica do IFPB, utilizando o Matlab/Simulink®. Esse desenvolvimento permitirá que o entendimento dessa disciplina tenha uma maior efetividade por parte dos alunos, fazendo com que os mesmos possam ser incentivados a implementar projetos experimentais na área, com a inserção de novos módulos no ambiente de simulação, além da parte experimental como complemento ao ambiente desenvolvido nessa primeira etapa do projeto.*

Palavras-chave: *Sistemas de controle, Ambiente de simulação, Ensino e aprendizagem, simulação computacional.*

1 INTRODUÇÃO

A área de Sistemas de Controle provê os princípios e métodos necessários para desenvolver sistemas de Engenharia que possam responder às mudanças do ambiente de forma automática mantendo uma resposta desejada. Essa área teve um forte crescimento nas últimas décadas sendo aplicada em diversas áreas tais como manufatura, eletrônica, robótica e processos industriais.

Existem diversos projetos e pesquisas pedagógicas com o propósito de que o aprendizado seja mais intuitivo por parte dos estudantes de Engenharia, para que possam ter a compreensão da interdisciplinaridade da área. Dessa forma, procura-se aproximar a teoria da parte prática de forma a facilitar a compreensão dos conceitos abstratos da área de Sistemas de Controle (GOMES; SILVEIRA, 2007). Alguns exemplos incluem o desenvolvimento de experimentos para a área de controle (BERNSTEIN; APKARIAN, 2003), práticas de laboratório (ARZEN; BLOMDELL; WITTENMARK, 2005), desenvolvimento de kits didáticos, implementação de ambientes virtuais, utilização de computadores em sala de aula, proposta de disciplinas introdutórias, entre outros (GUZMÁN *et al.*, 2010; GOODWIN *et al.*, 2011; SÁENZ *et al.*, 2015).

Dessa forma, é importante analisar os ambientes de controle auxiliados por computador, não somente sobre a metodologia de projeto e análise de Sistemas de Controle, mas sobre os projetos pedagógicos (GOODWIN *et al.*, 2011).

É inconcebível que ocorra o aprendizado dos conceitos da área de Sistemas de Controle sem que se utilizem os ambientes de simulação computacional. A sua utilização já integra os currículos modernos, pois é possível a utilização de ferramentas de animação e visualização que auxiliam na compreensão dos conceitos abstratos associados ao ensino de controle. Essas ferramentas podem ser utilizadas como complemento ou até como alternativa aos laboratórios de controle que são caros e que possuem manutenção complexa.

Em relação à forma onde os ambientes de simulação computacional podem ser utilizados, em conjunto com os laboratórios e sistemas reais, ou substituindo-os, existem três tipos de procedimentos que podem ser realizados com os alunos (FEISEL; ROSA, 2005):

- As simulações não dispensam a utilização de sistemas reais, mas são utilizadas como uma forma de introdução aos sistemas, ou seja, são a fase pré-laboratorial. Com isso, se ganha tempo nas práticas de laboratório e elas se tornam mais intuitivas e seguras, pois os estudantes terão um conhecimento prévio adquirido no simulador;
- As simulações podem ser utilizadas como complemento aos laboratórios, e práticas realizadas com sistemas reais. Isso pode permitir que seja realizado um comparativo entre as dinâmicas dos sistemas reais e simulados ou até um experimento em conjunto com uma simulação de forma que parte do processo é realizada em um elemento físico e outra é simulada;
- Podem ser utilizadas simulações que substituam completamente os laboratórios. Isso ocorre, por exemplo, quando os sistemas físicos são inapropriados para o ambiente laboratorial, sejam demasiado grandes ou caros, ou possam apresentar riscos aos estudantes.

Nas disciplinas de Engenharia, os professores tem se concentrado no uso e/ou desenvolvimento de ambientes de simulação computacional em que estejam cada vez mais próximos dos sistemas físicos, a partir de sistemas que detenham um maior poder de processamento, bem como o desenvolvimento de ferramentas matemáticas e computacionais que possam descrever cada vez melhor o comportamento dos sistemas físicos.

Os ambientes de simulação tornaram-se imprescindíveis no ensino da análise e do projeto de Sistemas de Controle com a vantagens de não exigirem dos usuários esforços na área de programação, focando em aspectos da disciplina, contando com diversas ferramentas gráficas e facilidades computacionais (KHEIR *et al.*, 1996).

O presente artigo ilustra um ambiente de simulação desenvolvido em Matlab/Simulink envolvendo a utilização dos conceitos lecionados na disciplina de Sistemas de Controle I no curso de Engenharia Elétrica do IFPB de João Pessoa, com a finalidade de instigar os alunos a verificarem o funcionamento de tais conceitos aprendidos na disciplina por meio do uso de uma ferramenta computacional. Além de sua utilização na disciplina mencionada, esse ambiente computacional poderá ter expansões por meio da criação de novos módulos para disciplinas posteriores a essa, além de sua utilização como ferramenta de desenvolvimento de projetos na área de sistemas de controle, que porventura, o IFPB possa participar por meio de projetos de pesquisa e de inovação, em parceria com outras instituições e empresas.

Para descrever o projeto realizado, este artigo é dividido da seguinte forma: na seção 2 é apresentada de forma breve a disciplina de Sistemas de Controle I no curso de Engenharia Elétrica do IFPB João Pessoa; na seção 3 é apresentada a metodologia utilizadas no projeto; na seção 4 são apresentadas as discussões e resultados do projeto; e por fim são apresentadas as considerações finais na seção 5.

2 A DISCIPLINA DE SISTEMAS DE CONTROLE I NO IFPB

A disciplina de Sistemas de Controle I do curso de Engenharia Elétrica do IFPB, campus João Pessoa, é ofertada a partir do quinto semestre, possuindo como pré-requisitos as disciplinas de Sinais e Sistemas e Circuitos Elétricos I, com carga horária semestral de 83 horas. Em seu plano de ensino, a disciplina possui como objetivo geral, proporcionar ao aluno o conhecimento dos Sistemas de Controle e a teoria de controle clássico para análise e projetos de sistemas de controle automático.

A ementa estabelecida é dividida em: introdução aos sistemas de controle; transformada de Laplace e o seu uso em sistemas de controle; modelagem matemática de sistemas dinâmicos; análise de resposta transitória; redução de sistemas múltiplos; estabilidade; erros de estado estacionário; análise e projetos de sistemas de controle por Lugar das Raízes e pelo domínio da frequência.

Como metodologia de ensino são utilizadas aulas expositivas e aulas em laboratório por meio de simulação computacional demonstrando o comportamento dinâmico dos sistemas que são propostos aos alunos e o projeto de controladores por meio das ferramentas utilizadas durante a disciplina. Para a avaliação do processo de ensino-aprendizagem, ao longo da disciplina são realizadas avaliações teóricas, avaliações das atividades de simulação e listas de exercícios propostas com os conteúdos da disciplina de Sistemas de Controle I.

3 METODOLOGIA

O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação, Sistemas de Controle e Automação (LINSCA) localizando no Campus João Pessoa do IFPB constituindo das seguintes etapas:

- O estudo do ambiente Matlab® e Simulink® com o propósito de desenvolver a Interface Homem-Máquina (IHM) do ambiente de simulação computacional;
- A seleção dos tópicos da disciplina Sistemas de Controle I que serão utilizadas no ambiente de simulação;
- O desenvolvimento e a avaliação dos algoritmos de controle a serem aplicados no sistema computacional;
- O desenvolvimento dos guias de laboratório para auxiliar aos usuários na utilização da aplicação.

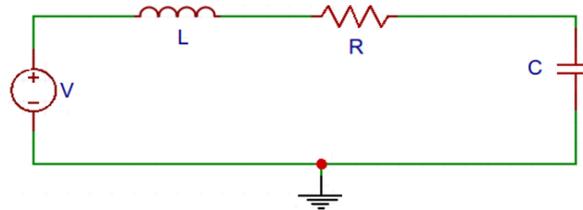
3.1 Seleção das áreas e estratégias da disciplina Sistemas de Controle I

O projeto tem como foco os conteúdos ministrados na disciplina Sistemas de Controle I que possui em sua ementa a análise de sistemas baseada na teoria de controle clássico, como a análise no domínio da frequência por meio do uso de equações diferenciais, transformada de Laplace e análise no domínio do tempo.

A primeira etapa a ser considerada é a modelagem matemática de um sistema familiar aos usuários como um sistema elétrico por meio da função de transferência que represente o seu comportamento dinâmico. Com o uso da transformada de Laplace, em lugar da manipulação das equações diferenciais, a maior vantagem é que as operações como derivadas e integrais são substituídas por operações algébricas como multiplicações e divisões (OGATA, 2011).

Para o desenvolvimento da simulação computacional foi escolhido o caso de um circuito elétrico, em que é necessária a análise utilizando as leis de Kirchhoff. O circuito RLC série consiste de um resistor (R), um capacitor (C) e um indutor (L) conectados em série como ilustrado na Figura 1.

Figura 1– Circuito RLC utilizado no ambiente de simulação computacional.



A análise utilizando as leis de Kirchhoff permite encontrar as seguintes equações diferenciais das Equações 1 e 2:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = V_i \quad (1)$$

$$\frac{1}{C} \int i dt = V_o \quad (2)$$

Combinando as Equações 1 e 2 e aplicando o teorema de Laplace é possível encontrar a função de transferência do circuito da Figura 1 na Equação 3.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{LCs^2 + RC + 1} \quad (3)$$

Substituindo os valores dos componentes utilizados na Figura 1 ($R = 2\Omega$, $L = 1H$, $C = 1/5F$), obtém-se a função de transferência ilustrada na Equação 4, dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{0,2s^2 + 0,4s + 1} = \frac{5}{s^2 + 2s + 5} \quad (4)$$

que será utilizada como exemplo demonstrativo neste artigo.

Em relação ao diagrama de polos e zeros é possível analisar o tempo de resposta e a instabilidade pela localização dos polos no plano-s. Pela função de transferência da Equação 4, os polos do sistema são complexos e localizados em $-1 \pm 2j$, representando um comportamento subamortecido e estável do sistema.

3.2 Avaliação do ambiente Matlab® e Simulink®

O Matlab® é uma ferramenta computacional bastante poderosa que auxilia estudantes das áreas das Engenharias bem como de outras áreas da Ciência, possuindo inúmeras ferramentas e funções para trabalhar com dados das mais variadas áreas. Para a área de Sistemas de Controle, o Matlab® possui diversas funções e toolboxes que auxiliam na modelagem de sistemas dinâmicos, projeto de controladores entre outras funções. Com o *Control System Toolbox* é possível modelar um sistema dinâmico como uma função de transferência, modelos de espaço de estados, diagrama de polos e zeros ou um modelo de resposta em frequência. Com relação à análise dos modelos é possível comparar sistemas no tempo e na frequência, bem como analisar parâmetros de performance como o tempo de subida, o tempo de estabelecimento, *overshoot*, entre outros.

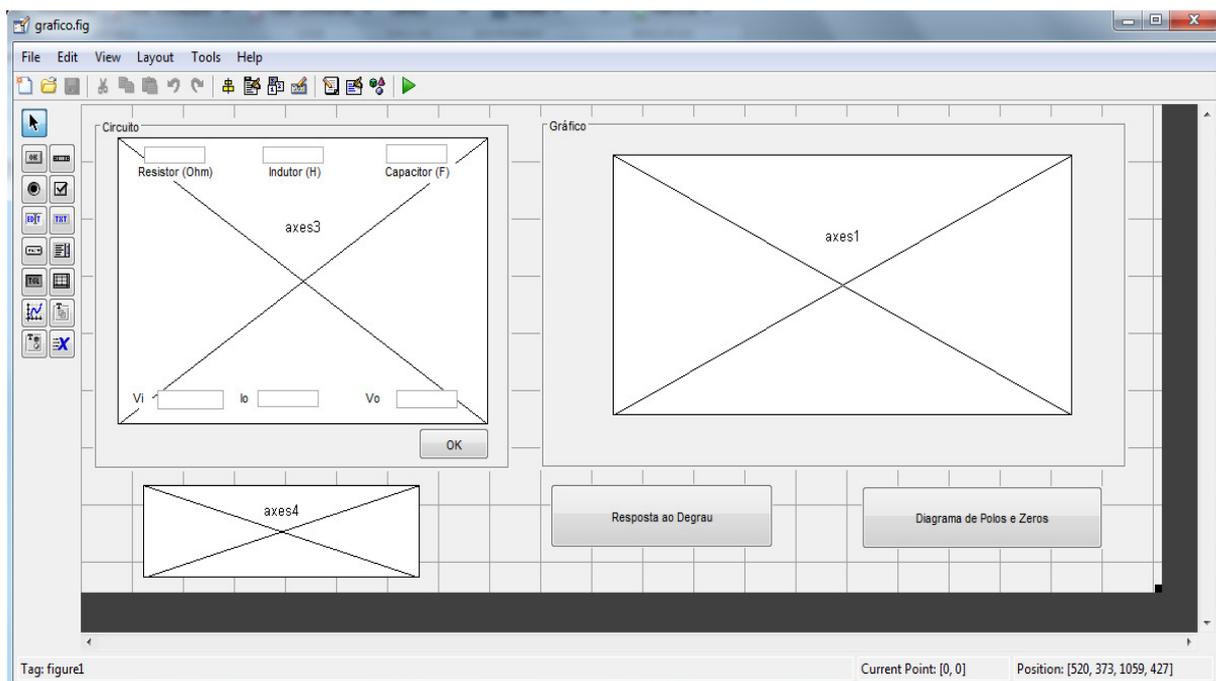
Em conjunto com o Matlab®, o Simulink® realiza simulações de sistemas por meio de diagrama de blocos, o que pode ser uma vantagem para o desenvolvimento do ambiente de

simulação, focando apenas na análise do projeto em questão. No Simulink® existem diversos *toolboxes* como o Simulink® *Control Design* onde é possível realizar análises dos sistemas.

Como o objetivo do projeto é desenvolver uma IHM amigável ao usuário, a intenção do projeto foi a utilização da ferramenta de criação de interfaces do Matlab®, denominada de GUIDE (*GUI Development Environment*). Com essa ferramenta é possível criar em poucos cliques uma IHM relativamente amigável ao usuário. Porém, para configurar a funcionalidade da interface é necessário utilizar a linguagem de programação do Matlab®, ou seja, não é possível interfacear de forma totalmente gráfica, o Simulink® e o GUIDE. A criação de um botão não implica na criação de um elemento no Simulink® que esteja associado a ele, e vice-versa, como ocorre em outras soluções como o LabVIEW®.

Na Figura 2 é visualizada a construção da IHM por meio do uso do GUIDE do Matlab®. Em específico, nessa ferramenta é possível inserir botões e gráficos de maneira simples bastando arrastar o botão ou gráfico para a janela de edição. Porém, tais elementos ficam sem função se não forem configurados no *workspace* do Matlab® onde, por exemplo, ao acionar o botão de apresentar a resposta do sistema dinâmico ao sinal do tipo degrau na entrada é executada a rotina ilustrada na Figura 3, onde os valores são lidos das caixas de texto e associados aos respectivos componentes do sistema.

Figura 2 – Construção da IHM utilizando o GUIDE.

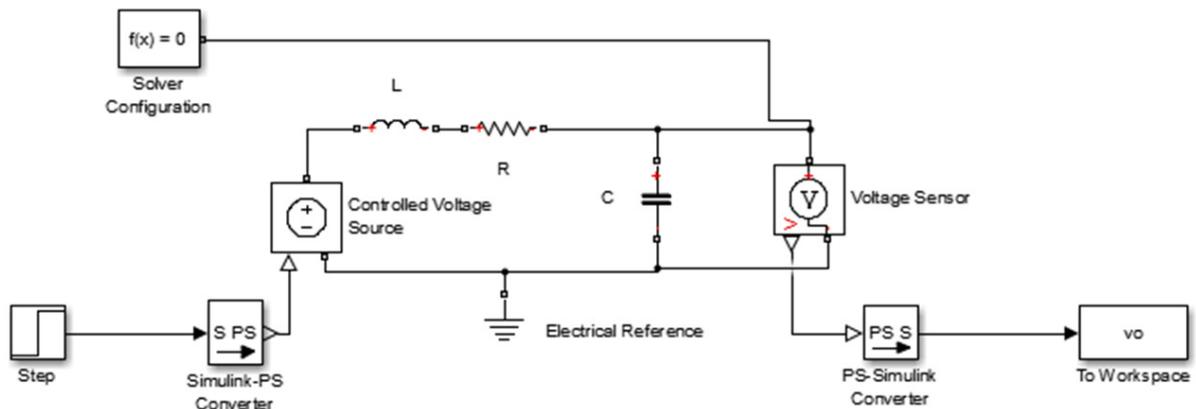


O Simulink® é o responsável pela simulação do circuito ilustrado na Figura 1. Para isso o *toolbox* Simscape foi utilizado para a realização da simulação do comportamento dinâmico do circuito elétrico da Figura 4. O sinal de entrada do sistema dinâmico é um sinal do tipo degrau, com a amplitude selecionada pelo usuário (*Controlled Voltage Source*) e a tensão de saída é monitorada pelo voltímetro (*Voltage Sensor*), com os valores retornando para a área de trabalho (*workspace*) do Matlab®.

Figura 3 – Comandos realizados no Matlab® ao acionar um botão.

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
R = str2num(get(handles.edit1, 'String'));
C = str2num(get(handles.edit2, 'String'));
L = str2num(get(handles.edit3, 'String'));
Vo = str2num(get(handles.edit4, 'String'));
Io = str2num(get(handles.edit5, 'String'));
Vi = str2num(get(handles.edit6, 'String'));
load_system('valores')
set_param('valores/C', 'c', num2str(C));
set_param('valores/C', 'vc', num2str(Vo));
set_param('valores/L', 'l', num2str(L));
set_param('valores/L', 'i_L', num2str(Io));
set_param('valores/R', 'R', num2str(R));
set_param('valores/Step', 'After', num2str(Vi));
sim('valores')
io(1) = linio('valores/Step', 1, 'input');
io(2) = linio('valores/PS-Simulink Converter', 1, 'openoutput');
linsys1 = linearize('valores', io);
```

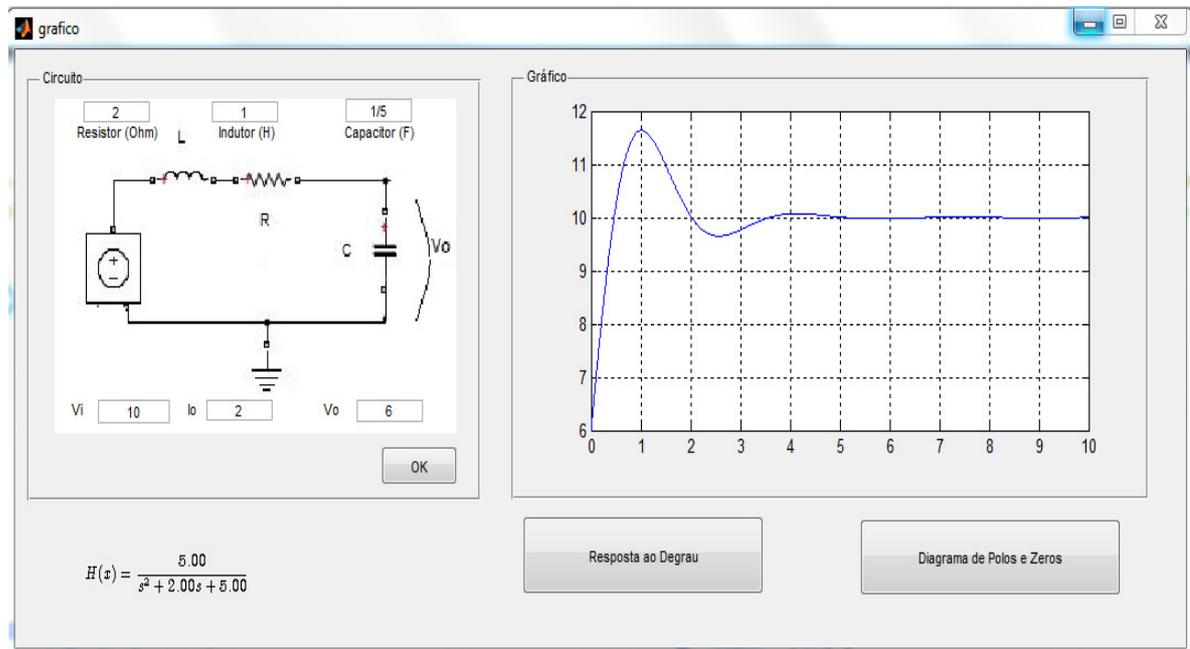
Figura 4 – Simulação realizada no Simulink® para a IHM desenvolvida.



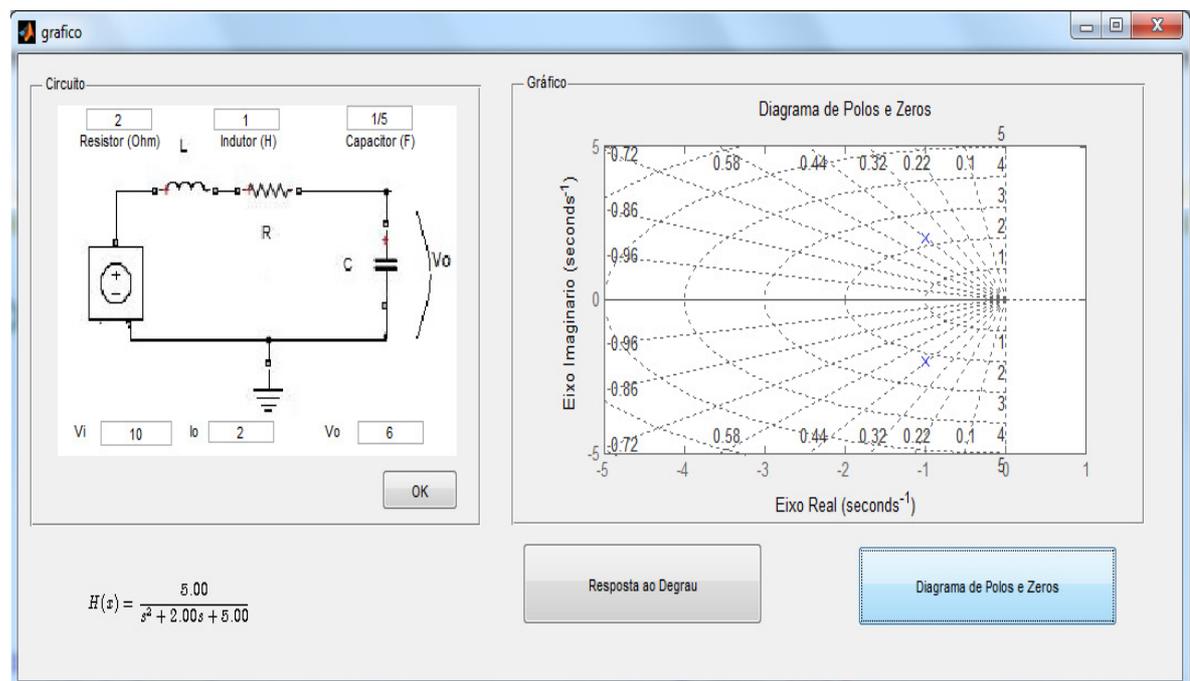
A Interface Homem Máquina (IHM) desenvolvida com o GUIDE é ilustrada na Figura 5, onde o usuário pode inserir os valores dos componentes, bem como os valores da fonte de tensão e valores iniciais de tensão do capacitor e corrente do indutor. Ao pressionar o botão "OK" na IHM desenvolvida, o ambiente de simulação automaticamente realiza a simulação do circuito, apresentando a resposta ao sinal do tipo degrau do sistema dinâmico, a função de transferência, havendo também a opção do usuário selecionar entre a visualização da resposta ao degrau e o diagrama de polos e zeros.

Para realizar a interface entre as duas ferramentas do Matlab® é necessário acionar o Simulink® por meio da linha de comando, passando para o mesmo todos os parâmetros necessários para a simulação, que é executada em segundo plano. Para configurar os parâmetros é utilizada a função `set_param` e para acionar o Simulink®, o comando `sim` com o nome do arquivo. Os resultados da simulação então retornam para o Matlab® que coloca os dados em dois gráficos, um com a resposta ao degrau e outro com o diagrama de polos e zeros como ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Funcionalidades da IHM para a simulação de um sistema dinâmico.



a) Resposta do sistema ao sinal do tipo degrau na entrada.



b) Diagrama de polos e zeros do sistema dinâmico.

Para o cálculo da função de transferência foi utilizada a função *linearize* colocando como pontos de referência a entrada e a saída. Com isso foi possível encontrar as equações de estado e consequentemente a função de transferência.

4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

As inúmeras funções existentes no Matlab® e no Simulink® conseguem realizar a análise e o projeto de vários tipos de sistemas dinâmicos que envolvam a área de Sistemas de Controle como sistemas elétricos e hidráulicos, por exemplo.

O programa desenvolvido possui uma velocidade de execução razoável, possuindo uma demora maior na primeira vez em que é executado, já que é necessário carregar a simulação do Simulink®. A maior dificuldade encontrada está na criação da IHM pelo fato da mesma ser bastante limitada e não possui uma ligação direta com o Simulink®, onde o programador deve realizar as conexões por meio da utilização do *workspace* do Matlab®. Outras aplicações como o LabVIEW® permitem realizar IHMs mais completas e intuitivas que já estão conectadas automaticamente com a programação gráfica.

Outra dificuldade foi a incompatibilidade entre as versões do Matlab®, gerando problemas para executar o programa em outra versão que não seja a que foi desenvolvido. Isso implicaria no desenvolvimento de uma versão do programa para cada versão do Matlab® o que pode ser impraticável dependendo da complexidade do mesmo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas do Matlab® são extremamente poderosas para o desenvolvimento do ambiente computacional para o ensino de Sistemas de Controle possuindo inúmeras facilidades e funções. Dessa forma é possível desenvolver as simulações computacionais de forma muito intuitiva. Em relação à IHM, o Matlab® não está mostrando ser a melhor opção para o desenvolvimento, pois não é algo intuitivo e exige que o programador faça a conexão de forma manual.

Pretende-se utilizar outras ferramentas de desenvolvimento, que se tornem mais fáceis para o desenvolvedor como, por exemplo, o LabVIEW® e a linguagem JAVA, além da perspectiva de estudo da IHM em *smartphones*, já que essa ferramenta de *hardware* está se tornando acessível para todos, onde os alunos poderiam acessar o conjunto de *softwares* para simulação em qualquer situação, em qualquer hora do dia, que se disponibilize para estudar.

Pretende-se ainda realizar melhorias como a implementação de outros circuitos e sistemas, análise pelo método do lugar das raízes, ferramentas que permitam o projeto de controladores observando a resposta no domínio do tempo e da transformada de Laplace, como também aplicar um questionário com os alunos e professores para verificar melhorias e sugestões a serem aplicadas ao ambiente de desenvolvimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) campus João Pessoa pelo suporte neste projeto e no envio do artigo ao COBENGE 2018.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARZEN, K. E.; BLOMDELL, A.; WITTENMARK, B. **Laboratories and real-time computing: integrating experiments into control courses**. IEEE Control Systems, v. 25, n. 1, p. 30-34, 2005

BERNSTEIN, D. S.; APKARIAN, J. **Experiments for control research**. IEEE Control Systems, v. 23, n. 5, p. 10-13, 2003.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. **The role of the laboratory in undergraduate engineering education.** Journal of Engineering Education, v. 94, n. 1, p. 121-130, 2005.

GOMES, F. J.; SILVEIRA, M. A. **Experiências pedagógicas.** In: AGUIRRE, L. A. (org.). Enciclopédia de automática, São Paulo: Blucher, 2007, v. 1.

GOODWIN, G. C. *et al.* **Emulation-based virtual laboratories: A low-cost alternative to physical experiments in control engineering education.** IEEE Transactions on Education, v. 54, n. 1, p. 48-55, 2011.

GUZMÁN, J. *et al.* **Entornos de experimentación para la enseñanza de conceptos básicos de modelado y control.** Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, v. 7, n. 1, p. 10-22, 2010.

KHEIR, N. *et al.* **Control systems engineering education.** Automatica, v. 32, n. 2, p. 147-166, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

SÁENZ, J. *et al.* **Open and low-cost virtual and remote labs on control engineering.** IEEE Access, v. 3, p. 805-814, 2015.

DEVELOPMENT OF A COMPUTACIONAL SIMULATION ENVIRONMENT FOR TEACHING CONTROL SYSTEMS AS A TEACHING AND LEARNING TOOL

Abstract: *The use of educational support tools has become essential so that the student can assimilate the content taught in disciplines, contextualizing this learning through graphs derived from simulation environments and/or experiments. This paper presents the initial results of the development of a computational environment involving the concepts of Control Systems I from IFPB Electrical Engineering undergraduate, using Matlab/Simulink[®]. This development will allow the understanding of this course to be more effective on the part of the students, allowing them to be encouraged to implement experimental projects in the area, with the insertion of new modules in the simulation environment, besides the experimental part as a complement to the developed in this first stage of the project.*

Key-words: *Control systems, Simulation environment, Teaching and learning, computer simulation.*