



AMBIENTE GRÁFICO PARA O PROJETO DE COMPENSADORES: UM ENFOQUE EDUCACIONAL

Leonardo A. M. Moraes – leonardo.moraes@ieee.org

Francisco J. Gomes – chico@jfnet.com.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia Elétrica, Departamento de Circuitos Elétricos

Rua Benjamin Constant, 790 – Centro

36016.400 – Juiz de Fora – Minas Gerais

***Resumo:** O trabalho trata do desenvolvimento de um ambiente gráfico para o projeto de compensadores para controle e automação de processos industriais. Um compensador altera a dinâmica do sistema, na direção desejada, de acordo com as especificações dadas, permitindo que se atinja uma situação proposta. Embora a metodologia tradicional para o ajuste da dinâmica de sistemas seja através de procedimentos heurísticos, o projeto de compensadores permite o correto enfoque para que se chegue à dinâmica pretendida. O ambiente proposto permite, através de uma interface amigável ao usuário, um procedimento passo-a-passo para que se tenha uma correta compensação através da utilização de circuitos eletrônicos, com seus parâmetros físicos e matemáticos. O trabalho é dirigido a estudantes de Controle e Automação onde o mesmo pode ser utilizado como ferramenta didática.*

***Palavras-chave:** Educação em Controle, Educação em Engenharia, Sistemas de Controle, Controle Automático, Simulação.*

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da informática no cotidiano de alunos e professores, há uma crescente tendência de introduzi-lo também no processo de ensino, seja este técnico ou superior. A proposta deste trabalho é a utilização da simulação baseada em procedimentos computacionais no auxílio ao ensino de técnicas de compensação de sistemas.

Grande parte dos processos, costumeiros ou industriais, pode ser modelada matematicamente. Cabe ao Engenheiro determinar que alteração deve ser realizada no processo para que se obtenha resultados desejados em resposta às possíveis entradas, inerentes ao próprio processo. Modificações apropriadas na dinâmica da planta podem constituir um modo simples de atingir-se as especificações de desempenho; isto, no entanto, pode não ser possível em muitas situações práticas, porque a planta pode ser fixa ou não tolerar modificações. Então, deve-se ajustar outros parâmetros, que não sejam aqueles do processo em si, o qual é fixo. Neste momento, são utilizados dispositivos compensadores, os quais são inseridos entre o processo original e a saída final, de modo a compensar alguns parâmetros do processo, alterando-os, visando às especificações de desempenho, não satisfeitas inicialmente, devido às deficiências do sistema original.

Tratar-se-á neste trabalho de três tipos básicos de compensadores, a saber: os compensadores em atraso, os quais causam um aumento no ganho do sistema nas frequências mais baixas, implicando em uma melhora na precisão do mesmo em regime permanente; entretanto, a compensação em atraso reduz a velocidade das respostas, devido à largura de faixa reduzida. Outro tipo de compensação é a baseada em compensadores em avanço, que causam uma significativa melhora na resposta transitória dos sistemas, através do aumento da

largura de faixa, aceleração da resposta e diminuição do sobre-sinal máximo na resposta a entradas do tipo degrau. Quando se deseja reunir as vantagens das compensações em atraso e em avanço, utilizam-se compensadores denominados “atraso-avanço”, que possuem dois pólos e dois zeros, permitindo um ajuste mais refinado da resposta do sistema.

Por muitas vezes, ao deparar-se com uma situação de projeto de compensadores, a única solução de um projetista para a resolução deste empecilho é a utilização de um método de sucessivas tentativas até que se alcance o resultado esperado. Com a experiência, o processo se torna mais rotineiro e melhores resultados são obtidos com menores esforços. Contudo, para um estudante, nem sempre é simples a visualização dos procedimentos que devem ser realizados para que o seu projeto seja satisfatoriamente implementado.

Face esta situação, resolveu-se desenvolver um ambiente computacional que mostra quais são os passos a serem seguidos nos projetos de compensadores – do tipo avanço, atraso e atraso-avanço – de modo a orientar o usuário em seu desenvolvimento. Com isso, o estudante de Engenharia, mais especificamente o de Engenharia Elétrica, terá em sua posse um roteiro de como realizar a compensação do seu sistema e, agregado a este roteiro, um ambiente de simulação, no qual ele poderá verificar a veracidade das alterações por ele implementadas, seguindo a mesma linha de produção proposta por GOMES e MORAES, *et al* (2002).

Além disto, é apresentado no final do projeto de cada tipo de compensador um circuito eletrônico – composto basicamente por resistores e capacitores – capaz de implementar fisicamente o circuito. Assim, o ambiente desenvolvido permite aos estudantes o estudo interligado das características físicas e matemáticas de um projeto de compensador em todas as suas etapas, que compreendem desde a especificação dos parâmetros desejados até a implementação física da compensação. Esta talvez seja a característica diferencial deste trabalho: a união dos conceitos teóricos advindos da matemática com processos físicos facilmente realizáveis através de simples componentes eletrônicos – à disposição de todos os estudantes – permite que se tenha uma visão mais global de um projeto e a sua viabilidade de implementação, aumentando consideravelmente o senso crítico dos alunos.

Todo o trabalho foi desenvolvido utilizando-se Delphi, uma linguagem orientada a objetos que permite a criação de ambientes de interfaces amigáveis ao usuário, facilitando o seu entendimento. Esta linguagem foi escolhida depois de ser comparada com diversas outras, como Visual C++ e Visual Basic pelo seu alto nível de difusão no meio acadêmico e facilidade na criação das telas e algoritmos. Tal como o executável, o código-fonte do programa também é distribuído gratuitamente para aqueles que se interessarem em conhecer a dinâmica computacional utilizada para o projeto.

A seção 2 trata dos tipos de compensação mais detalhadamente, ao explicar-se as implicações de cada uma na dinâmica final do sistema. A seção 3 apresenta o ambiente desenvolvido, através de telas retiradas do programa e explicações sobre os passos a serem tomados para um projeto bem sucedido de compensadores. A seção 4 contém as considerações finais do trabalho desenvolvido, indicando possíveis caminhos para um maior desenvolvimento do programa e exemplos de aplicação.

2. TIPOS DE COMPENSAÇÃO

2.1 Introdução

Nesta seção, serão tratados os diversos tipos de compensação abordados no ambiente: a compensação em atraso, em avanço, e em atraso-avanço. As características de cada uma destas serão abordadas, além de suas aplicabilidades, que também serão discutidas. Utilizar-se-á, em todas as maneiras de se realizar compensações, abordagens baseadas no método do lugar das raízes, ou *root-locus*, como mostrado por OGATA (1993).

Para que sejam modelados os sistemas utiliza-se a Transformada de Laplace, ferramenta matemática que transforma equações diferenciais no tempo em equações algébricas no domínio da variável complexa s . Assim, os processos, tais como os sinais de entrada e saída, são descritos no domínio de s . Os processos podem ser representados por funções de transferência, as quais representam uma relação entre a entrada e a saída deste sistema. Quando representados por sua transformada de Laplace, as funções de transferência são composta de frações cujos numerador e denominador são polinômios variáveis em s .

O numerador da função de transferência define os zeros do sistema, pontos nos quais a função de transferência possui valor nulo – estes pontos equivalem a valores de s , os quais nada mais são senão valores específicos de frequência do sistema. Da mesma forma, são definidos os pólos, que são as frequências nas quais o denominador da função de transferência é nulo. Assim, os pólos são as raízes do polinômio do denominador da função de transferência. Mais detalhes sobre a Transformada de Laplace foram especificados por CLOSE (1967) e BOYCE e DiPRIMA (1999).

2.2 Compensação em atraso

Para o problema de se ter um sistema cujas características de respostas transitórias são satisfatórias, porém de características insatisfatórias em regime permanente, deve-se utilizar compensadores do tipo de atraso.

A compensação, neste caso, consiste essencialmente em aumentar o ganho em malha aberta sem que se modifiquem significativamente as características de resposta transitória. Para que isto ocorra, o lugar das raízes (*root-locus*) na vizinhança dos pólos de malha fechada dominantes não deve ser modificado significativamente, porém o ganho de malha aberta – sistema sem a realimentação característica – deve ser aumentado tanto quanto necessário. Este resultado pode ser conseguido se for inserido um compensador em atraso em cascata com a função de transferência do ramo direto, o que equivale, normalmente, ao processo que se deseja alterar as características.

A função de transferência de um compensador em atraso consiste de uma fração composta de dois polinômios de primeiro grau, no numerador e no denominador, o que equivale à uma função com um pólo e um zero. Garante-se, fisicamente, que o seu efeito seja uma diminuição no ângulo total do processo, o que caracteriza um atraso. O modelo utilizado para o compensador é:

$$G_C(s) = k_c \cdot \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \quad (1)$$

A implementação física desta função de transferência implica que o valor de β seja sempre maior do que a unidade, caracterizando um atraso, como explicado anteriormente.

Esta função pode ser implementada fisicamente através de circuitos eletrônicos, caso a entrada e a saída sejam funções elétricas, ou através de sistemas mecânicos, por exemplo, caso esta seja a maneira mais simples de se conectar o compensador ao sistema original. Como o enfoque inicial deste trabalho é na área de Controle e Automação para a Engenharia Elétrica, optou-se que o ambiente apresente o equivalente circuito eletrônico para cada um dos compensadores. Para o compensador em atraso, tem-se a seguinte possível realização física.

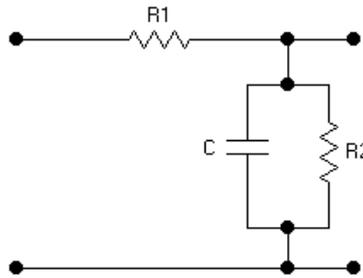


Figura 1 – Circuito eletrônico para o compensador em atraso

2.3 Compensação em avanço

Em muitos casos, tem-se uma boa resposta do sistema em regime permanente, mas as características transitórias comprometem todo o projeto. Como exemplo, pode-se imaginar o processo de ligação de um motor trifásico. A sua corrente elétrica em estado permanente atinge valores plenamente aceitáveis, sendo facilmente suportada pelos condutores de ligação, mas a corrente no instante da conexão pode atingir cerca de 7 a 10 vezes o valor nominal da corrente. Assim, problemas podem ocorrer no instante da conexão, como a queima de fusíveis, ou atuação de dispositivos de proteção, denominados relés, os quais atuam diretamente no motor, desconectando-o do sistema erroneamente.

Nestes tipos de casos, é necessária uma modificação do lugar das raízes na ampla vizinhança do eixo imaginário e da origem, a fim de que os pólos de malha fechada dominantes estejam em locais desejados neste mesmo plano complexo. Assim, inserindo-se um compensador em avanço apropriado em cascata com o processo original, pode-se modificar o posicionamento dos pólos adequadamente.

Da mesma forma que o compensador em atraso, há diversas maneiras de se implementar fisicamente o compensador em avanço. Novamente, optou-se por mostrar o circuito eletrônico equivalente, devido ao objetivo inicial do trabalho. Para esta implementação, o seguinte conjunto de componentes pode ser utilizado:

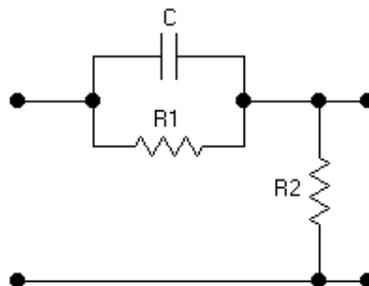


Figura 2 – Circuito eletrônico para o compensador em avanço

A função de transferência para este circuito, e conseqüentemente para o compensador, é descrita a seguir:

$$G_C(s) = k_C \cdot \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \quad (2)$$

Onde garante-se, devido a relação entre os componentes físicos e as constantes da função acima que α é sempre menor que a unidade. Desta forma, o circuito funciona como um compensador em avanço.

2.4 Compensação em atraso-avanço

Em alguns sistemas, é necessário que tanto as características em estado permanente do mesmo quanto as suas características transitórias sejam alteradas para que as especificações do projeto sejam atingidas. Nestes casos, o compensador em atraso-avanço se faz necessário. Economicamente, é mais viável que apenas o compensador em atraso-avanço seja inserido, ao invés de se inserir um compensador em atraso em cascata com um compensador em avanço. A menos que ocorra cancelamento dos zeros e pólos do sistema original, a ordem do mesmo é aumentada em dois, já que o compensador possui dois pólos e dois zeros.

Há diversos circuitos eletrônicos que executam a função de compensação em atraso-avanço. Um exemplo destes circuitos, o qual está presente no ambiente desenvolvido é mostrado abaixo:

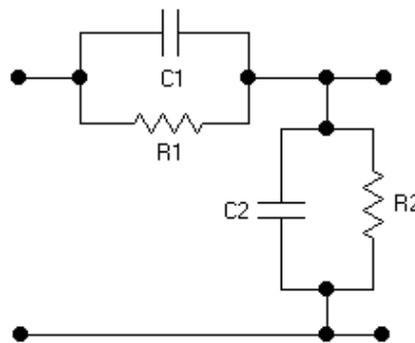


Figura 3 – Circuito eletrônico para o compensador em atraso-avanço

A função de transferência para este circuito eletrônico é dada por:

$$G_C(s) = k_c \cdot \frac{(s + \frac{1}{T_1})(s + \frac{1}{T_2})}{(s + \frac{\gamma}{T_1})(s + \frac{1}{\beta T_2})} \quad (3)$$

Para a implementação do compensador em atraso-avanço utilizando-se redes elétricas, tem-se um caso especial onde $\gamma = \beta$. Para os casos onde redes mecânicas forem utilizadas para a construção física do compensador, deve-se atentar para a possível diferença numérica dos valores, embora geralmente seja especificado que se tenha valores bem próximos, sendo idealmente iguais, o que implica em algumas restrições no projeto físico do compensador.

3. O AMBIENTE GRÁFICO DESENVOLVIDO

3.1 Introdução

Como mostrado na seção anterior deste trabalho, são abordados três meios eficientes de se realizar uma compensação em um processo: a compensação em atraso, compensação em avanço e a união destes dois métodos através da compensação em atraso-avanço. Para todos estes tipos de compensação, o circuito eletrônico equivalente que realiza fisicamente a função

de transferência desejada é apresentado como último passo do projeto, com as devidas relações entre as constantes matemáticas e os dispositivos eletrônicos, de modo que o usuário possa projetá-lo com valores disponíveis de capacitores e resistores, por exemplo.

Como apresentado em OGATA (2000), há maneiras físicas de se realizar a compensação, quer seja através de redes elétricas, as quais são o enfoque principal deste trabalho, quer seja por redes mecânicas.

O procedimento básico para a utilização do ambiente consiste nos seguintes passos:

- 1) Determinar as características do processo original, já modelado matematicamente através da Transformada de Laplace;
- 2) Determinar as características finais do sistema, depois de realizada a compensação;
- 3) Dependendo da relação entre os dois itens anteriores, determinar qual o tipo de compensação que se precisa para a implementação das especificações finais;
- 4) Entrar com as características originais e desejadas no respectivo ambiente e verificar qual o circuito eletrônico que corresponde ao compensador necessário;
- 5) Verificar se a compensação atende a todos os requisitos do sistema.

3.2 Exemplo de compensação

Será utilizado agora um exemplo de compensação em avanço para se demonstrar a facilidade de utilização do ambiente. Os passos para os outros tipos de compensação seguem o mesmo padrão.

Depois da escolha do método de compensação que se deseja, o usuário é levado ao ambiente correspondente e inicia-se o processo de projeto do compensador passo-a-passo, de modo a se acompanhar facilmente a linha de raciocínio necessária para o projetista e aumentar conseqüentemente o senso crítico do mesmo. O aluno é levado, depois de algumas utilizações do ambiente a um procedimento automático de projeto, o que facilita o seu entendimento e futuros projetos.

Inicialmente, deve-se conhecer o processo inicial. A modelagem deste processo é geralmente simples, já que há na atual literatura uma vasta coleção de modelos que podem ser aplicados aos mais diversos tipos de processos industriais. Para o ambiente, deve-se entrar com os coeficientes polinomiais do numerador e denominador da função de transferência de malha aberta original. Este tipo de entrada de dados foi escolhida por ser utilizada em *softwares* amplamente utilizados no meio acadêmico, como o MatLab, e por ser também o padrão de entrada de dados de polinômios nas calculadoras científicas mais utilizadas pelos estudantes.

Como se pode ver através da Figura 4, o ambiente calcula automaticamente as funções de transferência de malha aberta e malha fechada, para que o usuário confirme que os coeficientes que estão sendo digitados correspondem exatamente ao seu processo, previamente modelado.

Clicando no botão “Próximo”, o usuário é levado ao passo seguinte do projeto do compensador, onde pode definir os parâmetros desejados para o sistema, depois de compensado. Automaticamente, é calculada a nova função de transferência do sistema, depois da compensação, mostrando os pólos dominantes do sistema e características novas do sistema, como o fator de amortecimento e frequência natural não amortecida do mesmo. Esta entrada de dados é mostrada na Figura 5 a seguir.

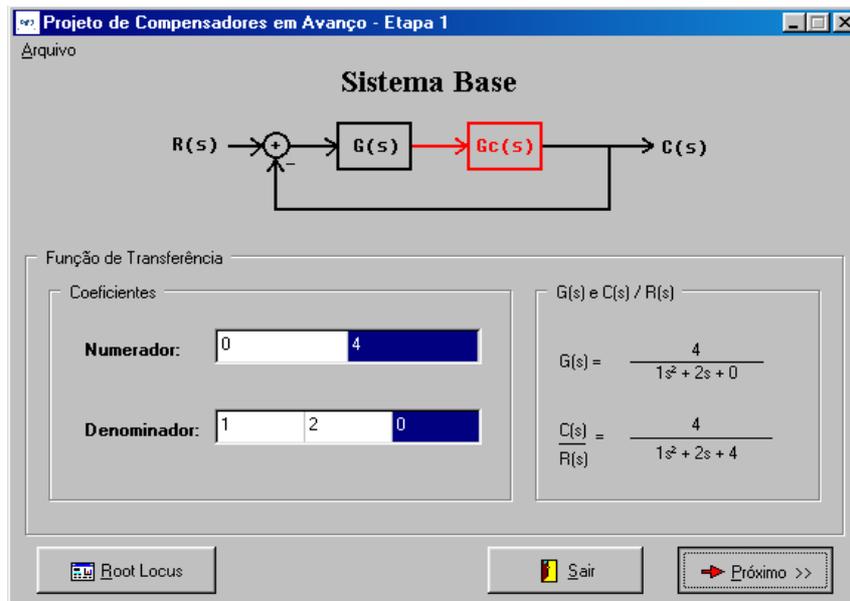


Figura 4 – Tela de entrada de dados do sistema original

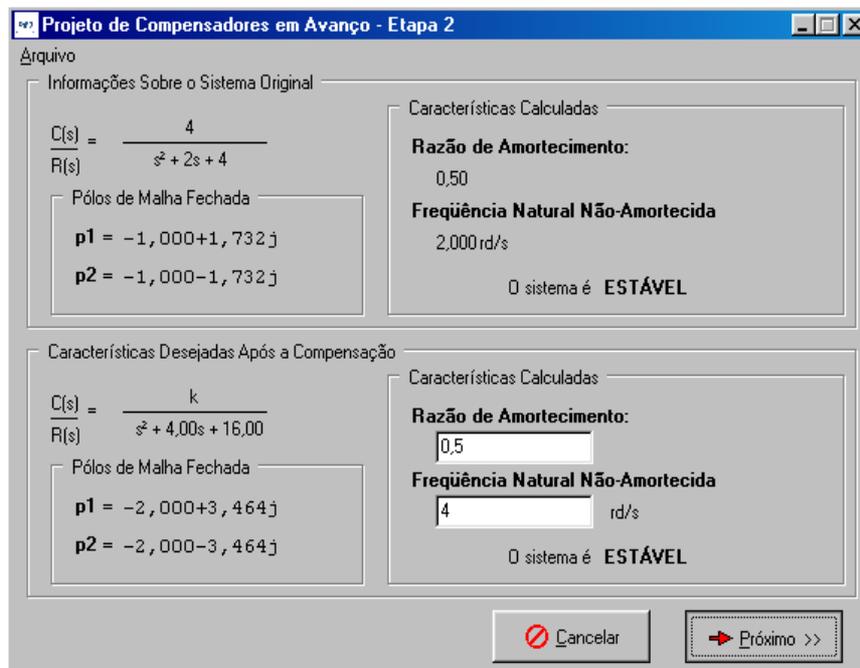


Figura 5 – Entrada dos parâmetros desejados para o sistema compensado

No próximo passo, o ambiente mostra o processo gráfico utilizado para a determinação dos parâmetros do compensador. Os mesmos são calculados pelo próprio ambiente e alguns valores, como o ângulo de déficit, os quais são utilizados nos cálculos destes parâmetros, são apresentados, de modo a reiterar a validade dos cálculos. A Figura 6 mostra esta tela de cálculo.

Finalmente, ao clicar-se no botão “Próximo” novamente, o sistema mostra um exemplo de circuito eletrônico que realiza a função de compensação desejada. Como há infinitas combinações de componentes que levam à função de transferência desejada, optou-se por mostrar a relação entre os parâmetros matemáticos e os componentes, de modo que o usuário possa utilizar os componentes disponíveis para construir o seu compensador, caso seja este o seu desejo, ao invés de se mostrar uma combinação possível apenas. Na Figura 7 pode-se constatar esta situação.

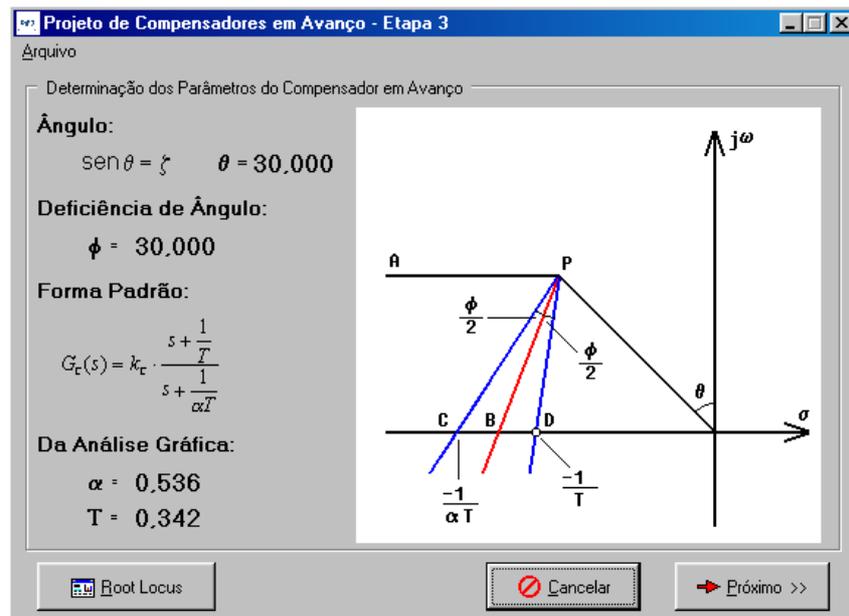


Figura 6 – Tela de cálculo dos parâmetros do compensador

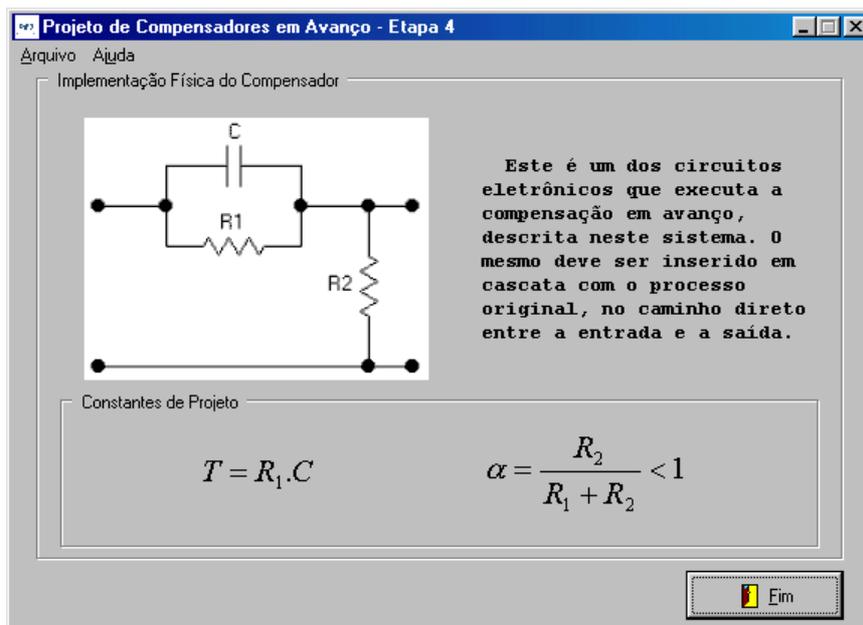


Figura 7 – Circuito eletrônico equivalente entre os parâmetros e os componentes

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de um ambiente gráfico para projeto de compensadores de processos, dos tipos atraso, avanço e atraso-avanço. Este ambiente foi construído com o intuito de auxiliar no processo de ensino e aprendizagem, mais especificamente da área de Controle e Automação, da Engenharia Elétrica.

A característica diferencial do ambiente é a união dos conceitos matemáticos, referentes aos procedimentos de projeto do compensador, com a implementação física destes dispositivos compensadores. Esta opção permite ao usuário associar análises teóricas e modelos conceituais às implementações físicas, diretamente no ambiente.



O ambiente desenvolvido apresenta-se de extrema utilidade para estudos, síntese e desenvolvimento de sistemas de controle e automação, além de aprendizado da dinâmica de processos, haja vista a grande facilidade de uso e interface completamente amigável com o usuário.

Para o projeto de dispositivos compensadores, a experiência do projetista é de extrema importância, já que o método mais convencional de análise é baseado em tentativas e erros, até que ocorra o ajuste dos parâmetros nos valores especificados. Com o auxílio computacional, estas tentativas tornam-se mais fáceis e menos exaustivas, além de permitirem que o projetista adquira um maior nível de experiência neste tipo de projeto, facilitando futuros trabalhos.

Como desenvolvimento futuro, pode-se estender a análise de compensadores, ao utilizar-se uma abordagem utilizando um enfoque baseado na resposta em frequência, através de diagramas de Bode e curvas no domínio da frequência. Além disso, outros tipos de compensação podem ser agregados ao ambiente, como os compensadores de realimentação (tacômetro)-velocidade.

Agradecimentos

Ao Programa Especial de Treinamento – PET/SESu/UFJF e ao Prof. Dr. Francisco José Gomes pela sua orientação neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYCE, W. E. & DIPRIMA, R.C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. São Paulo: LTC, 1999.

CLOSE, C. M. **The Analysis of Linear Circuits**. New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1967.

GOMES, F. J.; MORAES, L. A. M. *et al.* Ambiente Interativo Integrado Para Ensino de Automação Industrial. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2002, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: UNIMEP, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Ed. Prentice-Hall do Brasil, 1993.

GRAPHICAL ENVIRONMENT FOR COMPENSATION DESIGN: AN EDUCATIONAL APPROACH

Abstract: *The work deals with the development of a graphical environment for compensation design for industrial process automatic control. A compensation loop changes the process dynamics in the desired direction, according to given specifications, allowing it to reach a desired situation. Although the traditional approach for process dynamics tuning is the heuristic one, the loop compensation design allows the correct approach for getting a proposed dynamics. The proposed environment, with friendly interface, allows a step-by-step procedure for getting the correct compensation with the utilization of electronic circuits, with their physical and electrical parameters. The work is directed to control and automation students where it can be utilized as didactic tool.*

Keywords: *Control Education, Engineering Education, Control Systems, Automatic Control, Simulation*