



DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA REALIZAÇÃO DE PROJETOS DE CONTROLADORES PID APLICADO AO ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Gabriela H. L. Farinha – gabi.farinha@hotmail.com
Renan L. P. de Medeiros – renanlandau@yahoo.com.br
Giovane M. da Silva – giovanemalcher.s@gmail.com
Thiago C. Dias – tcdias@yahoo.com.br
Gustavo J. X. Ikeda – gjikeda@gmail.com
Orlando F. Silva – orfosi@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica
Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá
CEP 66075-110 – Belém – Pará

Resumo: *Este trabalho tem por objetivo apresentar um software que realiza o projeto de controladores PID, o qual deve funcionar como ferramenta de auxílio ao ensino e aprendizado nas disciplinas referentes a Sistemas de Controle. No desenvolvimento de tal ferramenta, utilizou-se a técnica de alocação de polos para realizar o projeto do controlador PID e o ambiente de simulação MATLAB, de forma a se construir um recurso didático e de fácil utilização. O projeto constituiu-se basicamente em duas etapas; primeiramente realizou-se o desenvolvimento do código do software, e a segunda etapa consistiu na utilização da ferramenta por um grupo de alunos da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, todos cursando disciplinas da área de Sistemas de Controle, para os quais posteriormente foram aplicados questionários de forma a se verificar a utilidade do software. Como resultado, foi obtida uma ferramenta didática para o projeto de controladores PID, a qual pode ser utilizada, não somente para fins didáticos, mas também para aplicações práticas no projeto de controladores, além da sua utilização em sala de aula com o intuito de ratificar conceitos teóricos obtidos.*

Palavras-chave: *Sistema de controle, projeto de controladores, ferramenta de ensino, PID, MATLAB.*

1. INTRODUÇÃO

O controle de sistemas, hoje, é parte fundamental dos modernos processos industriais, e assim, a engenharia de controle tornou-se uma área de fundamental importância para o desenvolvimento e evolução da ciência e engenharia como um todo (LIMA, 2004). Os avanços na teoria e prática de controle automático sempre propiciam meios para atingir melhores desempenhos de sistemas dinâmicos, bem como a melhoria na qualidade, diminuição de custos e aumento de taxas de produção entre outros.



No controle clássico, estima-se que mais de 90% das malhas encontradas em processos industriais operam com controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo), haja vista que os mesmos são aplicáveis à maioria dos sistemas de controle (BAZANELLA, 2005). Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos desses controladores provam sua utilidade conferindo um controle satisfatório. No entanto, como a sua maioria é ajustada em campo, muitas vezes são mal sintonizados ou simplesmente desligados, com isso, diferentes regras de sintonia vêm sendo propostas na literatura. Com a utilização dessas regras, ajustes finos no controlador PID podem ser feitos em campo.

Dessa maneira, ressalta-se a relevância de tais controladores, que são de grande importância prática para os estudantes de engenharia, e destaca-se ainda a necessidade de formação de profissionais com conhecimento teórico e prático sobre o funcionamento e ajuste dos mesmos.

2. METODOLOGIA

Levando em consideração que a engenharia é uma “profissão prática”, e que desde os primórdios da educação em engenharia, laboratórios didáticos têm-se constituído um dos fundamentos da graduação e, em muitos casos, da pós-graduação, e mostrando-se extremamente importantes para a formação de um profissional, pois o mesmo terá a referência do acompanhamento prático em relação direta com a teoria estudada. Assim, pode-se afirmar que, além da ênfase na componente científica, a parte significativa da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (GOMES, 2011).

A utilização do laboratório deve ser claramente associada aos objetivos educacionais pretendidos pelo curso. Dentre estes objetivos destacam-se pontos que explicitam a importância da atividade laboratorial como, por exemplo, entender e utilizar modelos conceituais; coletar, analisar e interpretar dados; executar projetos sob demanda; aprender com falhas e erros; desenvolver a criatividade; comunicar, de forma oral e por escrito, os resultados e conclusões obtidos e trabalhar em equipe (GOMES, 2011).

O plano de aula foi elaborado para a complementação e aplicação nas aulas de disciplinas relacionadas a sistemas de controle como a disciplina Laboratório de Sistemas de Controle, que tem como pré-requisitos as disciplinas: Sistemas de Controle I e Sistemas de Controle II. Foram ministradas aulas para os alunos do curso de Engenharia Elétrica com carga horária de aplicação do plano de aula de 2 horas. Foi elaborado um roteiro para especificar os procedimentos da experiência, contendo, resumidamente:

- Embasamento teórico: apresenta sucintamente os princípios do controlador PID, considerando que o aluno já possui conhecimento prévio sobre as características do mesmo obtido nos pré-requisitos;
- Apresentação da ferramenta de simulação computacional MATLAB, demonstrando os métodos de utilização da interface criada para este trabalho;
- Procedimentos experimentais: atividades propostas aos alunos para firmar os conhecimentos, utilizando simulações computacionais.

A abordagem de construção deste roteiro foi a de possibilitar ao discente relacionar seus conhecimentos teóricos com a parte prática, cujo processo é requerido pela ementa da disciplina, e assim atender as expectativas tanto dos alunos quanto do professor.

As aulas foram ministradas no pavilhão de aulas de engenharia elétrica, localizado no campus profissional da UFPA. Os alunos possuíam em sala toda a estrutura



necessária para o desenvolvimento do experimento: *notebook* com o *software* MATLAB, um quadro branco e *data show*. Ocorreram no dia 07 de Junho de 2013, no horário das 11h10 às 13h10.

3. CONTROLADORES CLÁSSICOS PID

Sistemas de controle são projetados para realizar tarefas específicas. Os requisitos impostos no sistema de controle são geralmente explicitados como especificações de desempenho. As especificações podem ser dadas em termos de requisitos de resposta transitória (como máximo sobressinal e tempo de acomodação na resposta à entrada em degrau) e de requisitos em regime estacionário (como erro estacionário para uma entrada em rampa). Essas especificações se relacionam à precisão, estabilidade e velocidade de resposta do sistema. Existem diversas abordagens para o projeto e compensação de sistemas de controle, no entanto, a abordagem de compensação com PID destaca-se, pois mais da metade das malhas encontradas em processos industriais operam com esse tipo de controlador.

O controlador PID é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional. Essas ações são largamente utilizadas na indústria, principalmente pela simplicidade no ajuste de seus parâmetros. O funcionamento do controlador se baseia no cálculo inicial do erro entre a variável controlada e seu valor de referência. A partir deste sinal de erro, o controle PID gera um sinal de controle, denominado ação de controle, de forma a atender as especificações de desempenho. Os modelos matemáticos de cada ação são apresentados a seguir.

3.1. Ação de Controle Proporcional

Muitas vezes, processos simples podem ser controlados satisfatoriamente apenas com a ação proporcional. Neste caso as ações integral e derivativa são simplesmente desligadas. No controle proporcional, a ação de controle, $u(t)$, aplicada a um sistema a cada instante, é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro, $e(t)$, como mostra a equação (1), K_p é denominado sensibilidade proporcional ou ganho.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

Nesse tipo de ação, quanto maior o ganho, menor será o erro em regime permanente, isto é, melhor a precisão do sistema em malha fechada. No entanto, além de nunca se poder anular completamente o erro, quanto maior o ganho, mais oscilatório tende a ficar o regime transitório de um sistema em malha fechada. Sua função de transferência é exposta na equação (2)

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2)$$

3.2. Ação de Controle Integral

No controle integral a ação de controle é proporcional à integral do sinal de erro, como mostra a equação (3), onde T_i é chamado de “tempo integral” ou “*reset-time*”. Nota-se que essa ação possui uma função de “armazenamento de energia”, podendo-se



concluir que em um instante no qual o erro é igual a zero, o sinal de controle será mantido em um valor constante e proporcional “a energia armazenada”, nesse instante. Esse fato permite ao sistema responder a uma referência, com erro nulo em regime permanente. Dessa forma, a ação integral atua na melhoria da precisão do sistema em regime permanente, posicionando um polo à malha aberta na origem, e assim aumenta o tipo de sistema em uma unidade. No entanto, esta ação tende a tornar a resposta mais lenta ou mesmo a instabilizar o sistema. Sua função de Transferência é dada pela equação (4).

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (3)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i s} \quad (4)$$

3.3. Ação de Controle Proporcional - Integral

A principal função da ação integral é fazer com que processos sem zeros sigam um sinal de referência com erro nulo. No entanto essa ação pode tornar o sistema lento ou levá-lo à instabilidade. Com isso, introduz-se a ação proporcional para contrabalancear esse fato, constituindo-se assim o controlador proporcional – integral (PI). A ação de controle de um controlador PI é proporcional ao erro e à integral do erro, como estabelece a equação (5). Sua função de transferência é mostrada na equação 6.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (5)$$

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (6)$$

Onde K_p e T_i são as constantes de ganho e de tempo integral, respectivamente, e ambas são ajustáveis.

3.4. Ação de Controle Derivativo

No controle derivativo tem-se que a ação de controle é proporcional à derivada do sinal de erro. Assim, a mesma apresenta um caráter antecipatório, ou seja, usa a tendência futura de variação do erro. Com isso, há uma melhora na resposta transitória reduzindo oscilações e consequentemente o sobressinal. A equação (7) mostra a ação de controle no domínio do tempo, onde T_d é o fator derivativo da mesma. Sua função de transferência é dada pela equação (8).

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = T_d s \quad (8)$$

Pela função de transferência, nota-se que essa ação não é indicada para processos que estejam sujeitos a ruídos de altas frequências, pois para esses casos há ocorrência de ganho crescente. A implementação física de um derivador puro é impossível (HAYKIN,2001), mesmo que a implementação de tal circuito fosse possível não seria desejável, visto que seu ganho tem dependência com a frequência. Por tais motivos a implementação da ação derivativa dar-se-á com a introdução de um polo situado em p que tem a função de limitar o ganho em altas frequências, e assim evitar o efeito de saturação no atuador. Então sua função de transferência é dada pela equação (9).

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = T_d \frac{sp}{(s+p)} \quad (9)$$

3.5. Ação de Controle Proporcional - Derivativo

A resposta de um processo, inicialmente não está sincronizada com variações presentes no sinal de entrada, devido à dinâmica do sistema. Dessa forma, o sinal de controle estará em atraso para corrigir o erro e pode gerar transitórios com grandes amplitudes e períodos de oscilação, ou seja, gerar respostas indesejáveis. Com isso, utiliza-se a ação derivativa combinada com a proporcional, de forma a antecipar o sinal de controle e assim fazer com que o sistema responda mais rápido. Nesse tipo de ação, o sinal de controle atuante em um sistema é proporcional ao erro e à sua derivada. A ação de controle é dada pela equação (10) e sua função de transferência pela equação (11).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (10)$$

$$C(s) = K_p [1 + T_d s] \quad (11)$$

Onde K_p e T_d são as constantes de ganho proporcional e de tempo derivativo, respectivamente, ambas são ajustáveis.

Considerando a necessidade de limitar o ganho da parte derivativa em altas frequências, conforme item 3.5, sua função de transferência apresenta-se na forma da equação (12).

$$C(s) = K_p \left[1 + T_d \frac{sp}{(s+p)} \right] \quad (12)$$

3.6. Ação de Controle Proporcional – Integral - Derivativo

A combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativo forma o controle proporcional – integrativo – derivativo, o qual contém as vantagens inerentes a cada uma das ações em particular. A ação integral está relacionada à precisão do sistema em regime. A potencial instabilidade inserida pela ação integral pode ser contrabalanceada com a ação derivativa, que permite tornar o sistema menos oscilatório, a medida que aumenta sua velocidade devido ao efeito preditivo. Este tipo de controle é muito utilizado em indústrias, pois regulam o comportamento de sistemas de primeira e



segunda ordens ou superior. A equação de um controlador com esta ação combinada é dada pela equação (13) e sua função de transferência é dada pela equação (14).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (13)$$

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \frac{sp}{(s+p)} \right] \quad (14)$$

3.7. Técnica de alocação de polos para projeto de controlador PID

As especificações de desempenho transitório de um sistema de controle se apresentam muitas vezes sob a forma de valores desejados para os critérios de desempenho, sendo que estas especificações são decorrentes das características operacionais do processo a ser controlado.

Sabendo que o desempenho de um sistema é determinado pelos polos ou zeros dominantes da função de transferência (mais próximos da origem), um sistema de controle é projetado para garantir que os polos do sistema em malha fechada estejam em posições pré-especificadas, definidas em função de restrições de desempenho. Desta forma busca-se garantir o atendimento das restrições. Uma vez escolhido as posições dos polos dominantes do sistema em malha fechada, resta determinar a função de transferência do controlador, de modo que os mesmos assumam os valores escolhidos.

A escolha dos polos dominantes desejados para o sistema em malha fechada, de modo a atender as especificações do comportamento do sistema, pode ser baseada nas relações aproximadas pela tabela 1.

Tabela 1- Aproximação para definição da alocação de um polo dominante

	Polo real $-pd$	Par de polos complexos $-\sigma \pm wd$
T_s	$\frac{4}{pd}$	$\frac{4}{\sigma}$
$M_0 \%$	0	$100e^{-\pi \frac{\sigma}{wd}}$

Dado um sistema genérico de segunda ordem, sendo que este é uma planta própria, irreduzível, que não apresenta fatores co-primos, dada pela equação 15

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (15)$$

A figura 1 mostra o diagrama de blocos de uma malha de controle genérica utilizada.

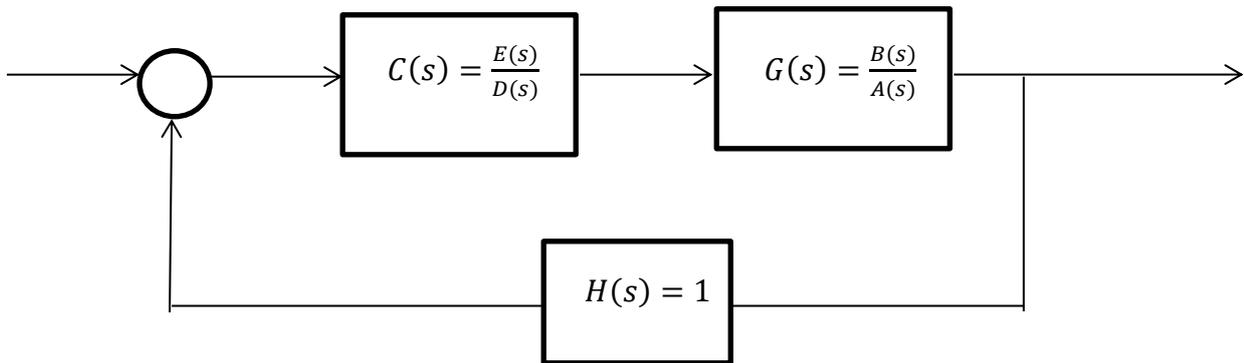


Figura 1- Diagrama de blocos de uma malha de controle.

A função de transferência em malha fechada deste sistema pode ser escrita, conforme a equação 16.

$$Mf(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{B(s)E(s)}{B(s)E(s) + A(s)D(s)} \quad (16)$$

Sendo $Q(s)$ o polinômio característico desejado, cujas raízes, p_1, p_2, \dots, p_n , representam os polos de malha fechada escolhidos pelo projetista, tem-se a equação 17.

$$Q(s) = (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n) \quad (17)$$

Então comparando o polinômio característico de malha fechada do sistema com o polinômio característico desejado, tem-se a equação 18.

$$B(s)E(s) + A(s)D(s) = Q(s) \quad (18)$$

Organizando a equação 17 na forma matricial, obtém-se a equação 19.

$$\begin{bmatrix} 0 & b_1 & b_0 - b_1 q_2 \\ b_1 & b_0 & -b_1 q_1 \\ b_0 & 0 & -b_1 q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_2 - a_1 \\ q_1 - a_0 \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para um controlador PID, considera-se a função de transferência da equação 20.

$$C(s) = K \left(1 + Tds + \frac{1}{Tis} \right) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{s} \quad (20)$$

3.8. Interface do software utilizado

MATLAB é um ambiente interativo de linguagem de alto nível utilizado para a computação numérica, visualização e programação. O *software* comumente apresenta várias aplicações, tais como: processamentos de sinais e sistemas de comunicação, processamento de imagem e vídeo, controle de sistemas, biologia computacional, entre

outras. Além disso, a facilidade de construção de interfaces, com a ferramenta GUIDE, permitiu criar uma interface amigável para o *software* desenvolvido, com a inserção de parâmetros e visualização da resposta do sistema modelado pelo método proposto. Os parâmetros b_1 e b_0 estão relacionados ao numerador da planta, a_1 e a_0 estão relacionados ao denominador desta. T_s representa o tempo de acomodação, enquanto M_p é o *overshoot*. K representa o ganho proporcional, T_d é a constante de tempo derivativo e T_i a constante de tempo integral. A GUIDE permite a escolha entre polos reais e polos complexos que satisfaçam as condições do projeto pré-especificadas pelo usuário e mostra o sinal de resposta ao degrau unitário, a interface está representada na figura 2.

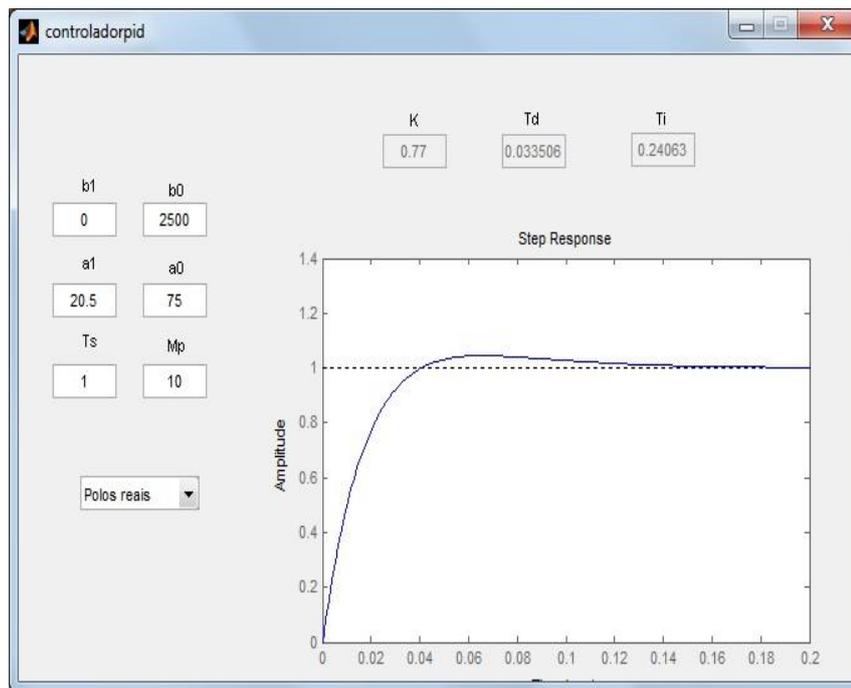


Figura 2- GUIDE para o projeto de controladores PID.

4. RESULTADOS

4.1. Análise dos questionários

Para avaliar a opinião dos alunos nas aulas ministradas, verificando a melhoria do desempenho na disciplina e a assimilação do assunto abordado, foram propostos questionários de avaliação, os quais contemplaram perguntas referentes à acessibilidade do *software*, quanto ao seu desempenho como ferramenta de auxílio ao ensino-aprendizado nas disciplinas de sistemas de controle, além da facilidade de uso. Os dados obtidos foram postos em gráficos, de forma a se obter uma ideia quantitativa da aceitação, por parte dos alunos, da ferramenta desenvolvida, os quais são apresentados a seguir.

A primeira pergunta referiu-se à dificuldade na utilização do programa no projeto de controladores PID e da sua interface. Aproximadamente 88% dos alunos responderam que não houve dificuldades, como mostra a figura 3-(a), e destes, 34% alegou que o



software era acessível, 44% que era uma interface simples e 22% que bastava entender a teoria para a utilização do mesmo, como pode ser visualizado na figura 3-(b).

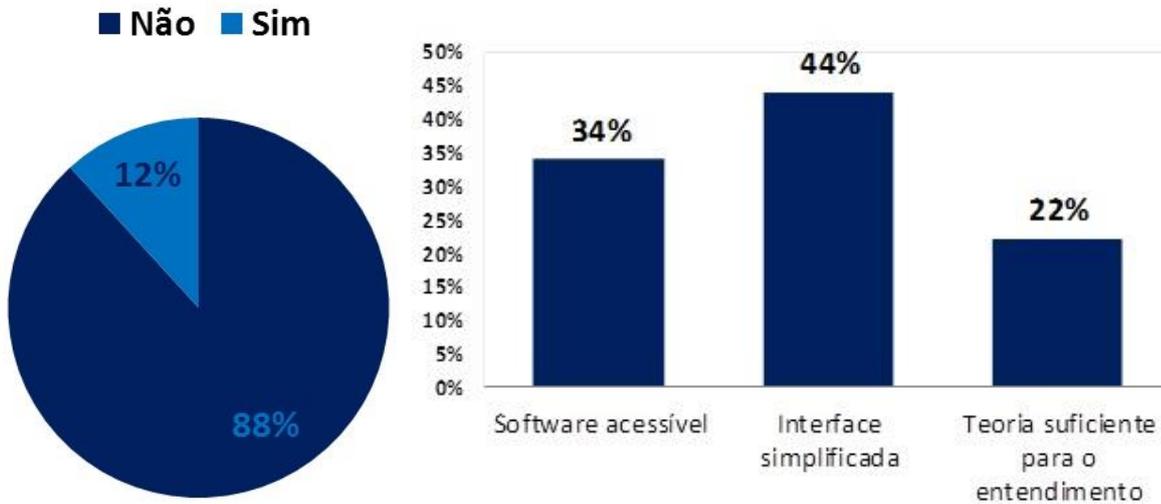


Figura 3 – (a) Dificuldade dos alunos. (b) Justificativas dos que responderam “não”.

A segunda pergunta fez referência à opinião dos alunos em relação à metodologia de apresentação da ferramenta, questionando se o objetivo da aula foi alcançado. Foi observado que 94% dos alunos responderam positivamente, alegando que a aula foi ministrada de maneira adequada e que as dúvidas com relação ao assunto foram respondidas e que facilitou o aprendizado. Os dados obtidos podem ser visualizados na figura 4.

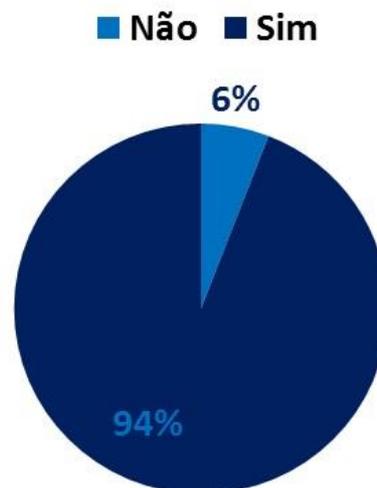


Figura 4 - Avaliação dos alunos da metodologia aplicada.

Por fim, questionou-se sobre a consolidação dos conhecimentos teóricos e práticos acerca do assunto através do programa de projeto de controladores PID. A quantificação percentual para esta pergunta pode ser visualizada na Figura 5, onde 96% dos alunos responderam que houve uma reafirmação dos conhecimentos que já obtinham.

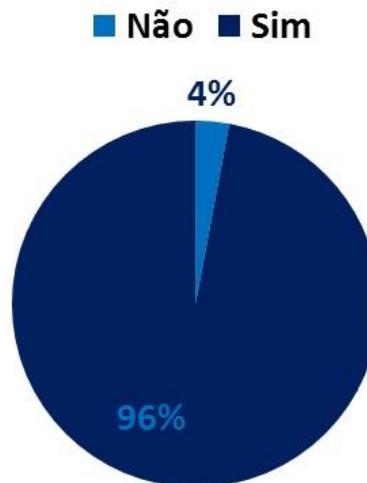


Figura 5 - Opinião sobre a ratificação dos conhecimentos da disciplina.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentadas ferramentas computacionais para elaboração de projetos de controladores PID. A utilização da ferramenta GUIDE do *software* MATLAB permitiu a construção deste através do método de alocação de polos, o qual é metodologia de ensino de Engenharia, e tem a finalidade de ampliar os conhecimentos da área de sistemas de controle.

Através de questionários de avaliação das aulas ministradas utilizando este mecanismo, pôde-se comprovar a eficácia do método. Constatou-se que o *software* desenvolvido apresentou-se como uma ferramenta com grande utilidade na consolidação dos conhecimentos adquiridos em sala de aula, despertou o interesse dos discentes e mostrou-se como meio de incentivo ao aprendizado das disciplinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZANELLA, A.; SILVA JR., J. “Sistemas de Controle, Princípios e Métodos de Projeto”. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

FREITAS, Victor Silva de, *et al.* “Simulação e construção de controladores clássicos propostos ao ensino de engenharia”. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 2011, Blumenau. Anais.

GOMES, Francisco José, *et al.* “Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em FOSS, para educação em engenharia de controle de processos industriais”. In: The 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2011, Mar del Plata, Argentina. Anais.

HAYKIN, S. “Redes Neurais: princípios e prática. Trad. Paulo Martins Engel”. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.



LIMA, Fábio S. de. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Centro de Tecnologia. Estratégias de escalonamento de controladores PID baseado em regras fuzzy para redes industriais foundation fieldbus usando blocos padrões, 2004. 68p, Il. Monografia (Mestrado).

MATHWORKS, "MATLAB: the language of technical computing". Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab>>. Acessado em: 17 set. 2012.

NISE, N. S. "Engenharia de sistemas de controle". 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

OGATA, K. "Engenharia de controle moderno". Rio de Janeiro: Prentice/ Hall do Brasil, 1982.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR THE CONDUCTING OF PROJECTS OF PID CONTROLLERS APPLIED TO THE TEACHING OF CONTROL SYSTEMS

***Abstract:** This work aims to present a software that performs the project of PID controllers, which must operate as a tool to support teaching and learning in the disciplines related to Control Systems. On the development of such tool, it was used the poles placement technique to perform the PID controller project and the MATLAB simulation environment, in order to build a didactic resource and easy to use. The project was formed basically in two steps, primarily it was made up the development of the software code. The second step consisted in the use of the tool by a group of students from the School of Electrical Engineering of the Federal University of Pará, all of them taking disciplines related to the area of Control Systems, for which questionnaires were subsequently applied in order to verify the usefulness of the software. As a result, it was obtained a didactic tool for the project of PID controllers, which can be used not only for educational purposes but also for practical applications in the project of controllers, in addition to its use in class in order to ratify theoretical concepts obtained.*

***Key-words:** Control Systems, project of controllers, teaching tool, PID, MATLAB.*