

SIMULAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE CONTROLADORES CLÁSSICOS PROPOSTOS AO ENSINO DE ENGENHARIA

Victor S. de Freitas – victorfreitas89@yahoo.com.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica

Rua Augusto Corrêa, 01 – Guamá

CEP 66075-110 – Belém – Pará

Renan L. P. de Medeiros – renan_landau@hotmail.com

Rodrigo O. de Miranda – rodrigo_oliveirademiranda@yahoo.com.br

Orlando F. Silva – orfosi@ufpa.br

***Resumo:** Este artigo contém o estudo dos controladores clássicos PID na aplicação ao ensino de engenharia. O estudo referido objetiva tornar o aprendizado de técnicas de controle mais prático e interativo, viabilizando uma maior absorção de conhecimento por parte dos estudantes. Para tal método ser construído, foram feitos testes virtuais, com a utilização do software Eletronic Work Bench, e reais, com as montagens físicas dos circuitos analógicos. Após, foram feitas as análises do comportamento de cada tipo de controlador utilizado (P, PI e PD). Verificou-se que a implementação da variante PID, que combina as melhores características de cada tipo, é de fato viável e de entendimento acessível caso se utilize uma metodologia de ensino que permita que o próprio estudante de engenharia enxergue o comportamento dos sistemas podendo tirar suas próprias conclusões tendo o professor como orientador. O trabalho em questão se demonstra uma alternativa de ensino quando se fala em controladores clássicos aplicados a sistemas reais.*

***Palavras-chave:** Controladores clássicos, Ferramentas metodológicas, EWB, Testes reais.*

1 INTRODUÇÃO

O controle de sistemas, hoje, é parte fundamental dos modernos processos industriais de manufatura, e assim, tornou a Engenharia de Controle uma área de fundamental importância para o desenvolvimento e evolução da ciência e engenharia como um todo (LIMA, 2004). Com o conhecimento sobre este campo, podem-se propor soluções de problemas utilizando técnicas de controle sobre variáveis de um determinado sistema ou ambiente tais como: pressão, temperatura, posição, nível, fluxo e outras.

Os avanços teóricos e práticos do controle de processos propiciam a obtenção de um ponto ótimo de desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorando a qualidade, a produção e os custos dos produtos (LIMA, 2004).

As teorias clássicas de controle surgiram a partir do interesse e da necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, e tal modo foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico na área (JÚNIOR FERNANDES *et al*, 2009).

No controle clássico estima-se que mais de 90% das malhas encontradas em processos industriais operam com controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo) (BAZANELLA & SILVA JR., 2005), haja vista que os mesmos são aplicáveis à maioria dos sistemas de controle, mesmo quando se desconhece as propriedades intrínsecas da planta. Por

outro lado, muitas vezes esses controladores são mal sintonizados ou simplesmente desligados, em detrimento ao controle manual e suas conseqüências. Dessa maneira, ressaltando a importância de tais controladores, que são de grande aplicabilidade prática para os estudantes de engenharia, e destacando-se ainda a necessidade de formação de profissionais com conhecimento teórico e prático sobre o funcionamento e ajuste dos mesmos, neste trabalho apresenta-se uma abordagem para o desenvolvimento de módulos didáticos de controladores analógicos do tipo: P (Proporcional), PD (Proporcional e Derivativo), PI (Proporcional e Integral) e PID, partindo de ferramentas de simulação computacionais como o *software Eletronic Work Bench* (EWB) e estendendo para a implementação dos mesmos, como proposta de ferramenta interativa no ensino de Engenharia (SANTOS,2009). Aplicando os modelos matemáticos em simulações reais e verificando o comportamento do sistema construído a partir da teoria.

2 TIPOS E MODELOS DE CONTROLADORES CLÁSSICOS

2.1 Modelagem matemática

As ações de controle clássicas, proporcional (P), integral (I) e derivativa (D), são muito 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 desse erro, gera-se um sinal de controle, de forma a corrigir este desvio. Os modelos matemáticos de cada ação são apresentados a seguir.

2.2 Proporcional, Integral e Derivativo

No controle proporcional a ação de controle, $u(t)$, aplicada à planta 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.

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

A função de transferência desse modelo é exposta na Equação (2)

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

No controle integral a ação de controle é proporcional à integral do sinal de erro como mostra a equação (3). Atua na melhoria da precisão do sistema em regime permanente, entretanto tende a tornar a resposta mais lenta ou mesmo a instabilizar o sistema. T_i é chamado de tempo integral ou *reset-time*. Sua Função de Transferência é dada pela Equação (4)

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

$$G_i(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1}{sT_i} \quad (4)$$

No controle derivativo tem-se que de a ação de controle é proporcional a derivada do sinal de erro. Assim, tem um caráter antecipativo, ou seja, com a tendência de variação do erro. Com isso, há uma melhora na resposta transitória reduzindo oscilações e conseqüentemente o sobre-sinal. Não é indicado para processos com ruído, pois para altas frequências ocorre um ganho crescente. A equação (5) mostra a ação de controle no domínio do tempo, onde T_d é o fator derivativo da mesma. Sua função de transferência é dada na Equação (6)

$$u(t) = T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (5)$$

$$G_d(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d s \quad (6)$$

A implementação física de um derivador puro é impossível (HAYKIN,2001). Mesmo que a implementação de tal circuito fosse possível não seria desejável, a medida que a frequência aumenta o ganho da função se torna crescente. Por tais motivos a implementação da ação derivativa dar-se-á com a introdução de um pólo que tem a função de limitar o ganho em altas frequências. Então sua função é dada pela Equação (7)

$$G_d(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = T_d \frac{sp}{(s + p)} \quad (7)$$

2.3 Controlador PID

O controlador PID associa as vantagens das ações Proporcional, Integral e Derivativa. A ação integral está diretamente ligada à precisão do sistema sendo responsável pelo erro nulo em regime permanente. O efeito desestabilizador do controlador PI é contrabalançado pela ação derivativa, que tende a aumentar a estabilidade relativa do sistema e simultaneamente torna a resposta do sistema mais rápida devido ao seu efeito antecipativo. A função de transferência dessa combinação resulta nas Equações (8), a aproximada, e (9), a real, onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo de ação integral e T_d é o tempo de ação derivativa.

$$G_d(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \frac{sp}{s + p} \right) \quad (8)$$

$$G_d(s) = \frac{K_p(1 + pT_d)(s^2 + \frac{1 + pT_i}{T_i(1 + pT_d)}s + \frac{p}{T_i(1 + pT_d)})}{s(s + p)} \quad (9)$$

3 SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS REAIS: CIRCUITOS ANALÓGICOS APLICADOS À ENGENHARIA DE CONTROLE

3.1 Características físicas dos controladores

Na Engenharia de Controle o objetivo é interconectar componentes para que formem uma configuração que irá influenciar na resposta do sistema, de modo a fazer com que a mesma se aproxime ao máximo das especificações pedidas.

Os controladores clássicos já apresentados podem ser construídos a partir de circuitos elétricos formados por elementos muito utilizados, como resistores, capacitores e amplificadores operacionais, e quanto melhor o arranjo destes é possível tornar o sistema mais seguro.

3.2 Simulação computacional e ambiente EWB

Uma das características e objetivos da simulação de sistemas, particularmente quando há a necessidade de desenvolvimento de um sistema real, é realizar uma extensão dos procedimentos experimentais. De tal forma que se possa tomar conhecimento do comportamento do sistema em várias situações possíveis, objetivando o melhor método para se obter o desempenho necessário e, conseqüentemente, no momento de implementação do sistema físico, garantir a diminuição de erros (COSTA, 2002).

O EWB é um *software* que permite construir e simular circuitos eletrônicos dentro da área analógica ou digital, sendo de grande utilidade para os estudantes de Engenharia Elétrica e outras áreas afins. O aplicativo possui uma interface de fácil acesso e compreensão, com um bom desempenho nas simulações de experiências de laboratórios convencionais, e além de contribuir para a aprendizagem de ensaios utilizando medidas de circuitos nos aparelhos virtuais. Sua biblioteca, contendo, por exemplo, componentes passivos, ativos, ferramentas lógicas e booleanas, permite simular experiências em condições ideais e reais, pois os valores e parâmetros podem ser modificados de acordo com as necessidades do projeto.

4 PROCESSO VIRTUAL E FÍSICO DE MONTAGEM

A primeira parte do projeto consistiu na construção dos circuitos dos módulos P, PD, PI e PID em ambiente computacional e a simulação dos comportamentos de cada a vários tipos de sinais de entrada, utilizando o *software* EWB. Neste, os projetos de cada controlador foi implementado utilizando, além das ferramentas básicas como amplificadores operacionais e capacitores, ferramentas de auxílio à interface do programa com o usuário, como resistores variáveis e chaves seletoras, com a finalidade da melhor percepção da ação de outros parâmetros de resistências e/ou capacitâncias nas respostas dos sistemas.

Na segunda etapa fez-se a construção física dos referidos módulos, inicialmente projetados, e a aquisição dos dados das respostas foi realizada para os mesmo sinais de referência utilizados na simulação computacional, e por fim, foi feita a análise qualitativa de tais resultados, comparando as respostas dos dois métodos.

5 RESULTADOS

5.1 Simulação no ambiente EWB

Os projetos dos circuitos analógicos foram implementados no ambiente do programa, e foram obtidas as respostas a partir de sinais de referência como entrada nos sistemas. Para todos os sistemas, foram combinados amplificadores operacionais e resistores, ressaltando também a presença de reostatos e chaves seletoras. Como entrada, sinais de pulsos e ondas triangulares, e para coleta de dados, foi utilizado o osciloscópio do *software*. Os circuitos montados no ambiente computacional são mostrados na Figura 1.

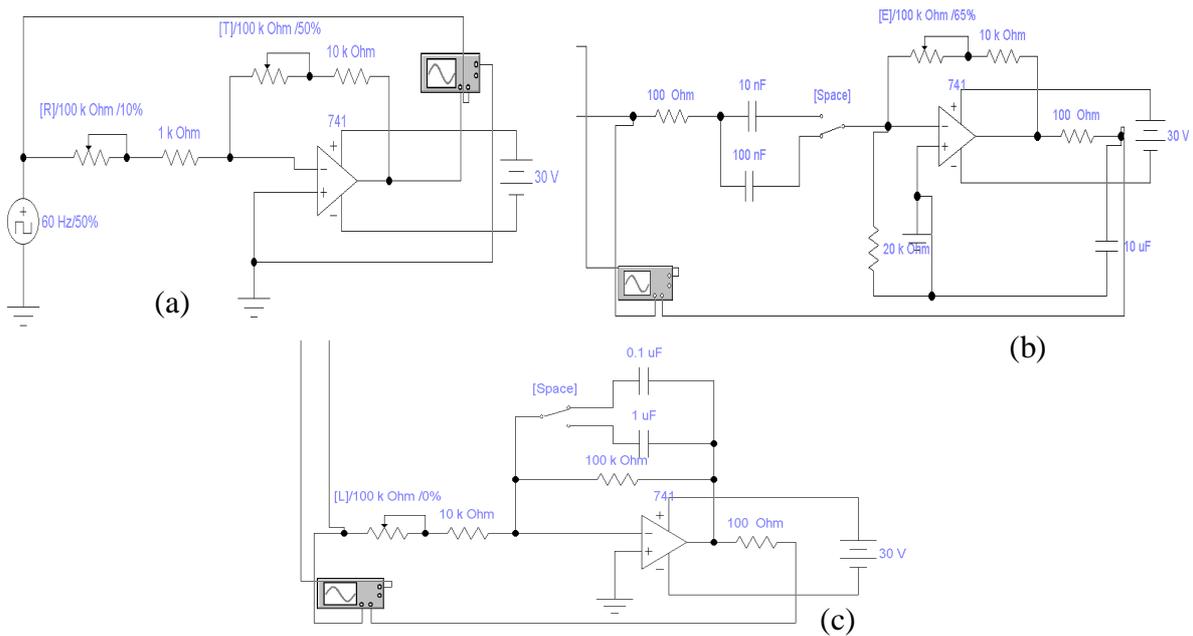


Figura 1 - Circuitos dos controladores (a) Proporcional, (b) Proporcional Derivativo e (c) Proporcional Integrador

Onde G_p , G_d e G_i são respectivamente as funções de transferência do modelo Proporcional (Equação 10), Derivativo (Equação 11) e Integral (Equação 12).

$$G_P = - \frac{R_{P2} + 10^4}{R_{P1} + 10^3} \quad (10)$$

$$G_D = - \frac{(R_D + 10^4) \cdot SC}{100SC + 1} \quad (11)$$

$$G_I = - \frac{1}{(SC + 10^{-4}) \cdot (R_I + 10^4)} \quad (12)$$

Para o controlador P, foi aplicado um sinal de pulsos e verificou-se que a resposta do sistema se assemelhava ao sinal aplicado, entretanto com sua amplitude alterada, como mostra a Figura 2, e podendo ser variada de acordo com o valor das resistências utilizadas nos reostatos. Na simulação abaixo foi variado o potenciômetro aumentando gradativamente sua resistência, esta variação esta em torno de 5% do valor nominal do potenciômetro, de forma que o ganho aumente de acordo com a variação do mesmo, além do fato da variação do potenciômetro pode-se observar que o sinal resposta está invertido em relação ao sinal de referência, explicado pelo fato de haver o sinal negativo na função de transferência deduzida do controlador.

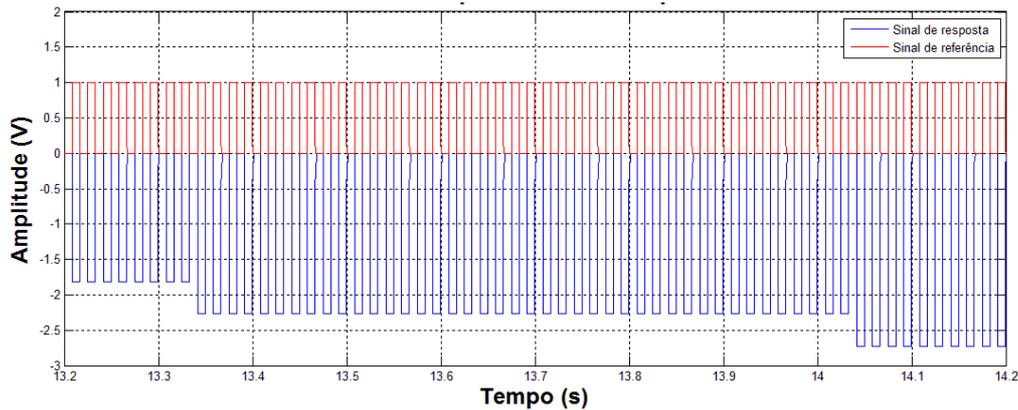


Figura 2 – Análise da resposta do controlador Proporcional no EWB

Na simulação do controlador PD, observaram-se mudanças nos sinais triangulares para um trem de pulsos como mostra a Figura 3, e foi visto que a partir do chaveamento dos capacitores na entrada do amplificador operacional podia-se modificar o ganho, de modo que este diminui quanto menor a capacitância, como mostra a Figura 3(a) e Figura 3(b), onde na primeira foi utilizado um capacitor de 10nF, e na segunda um de dez vezes maior.

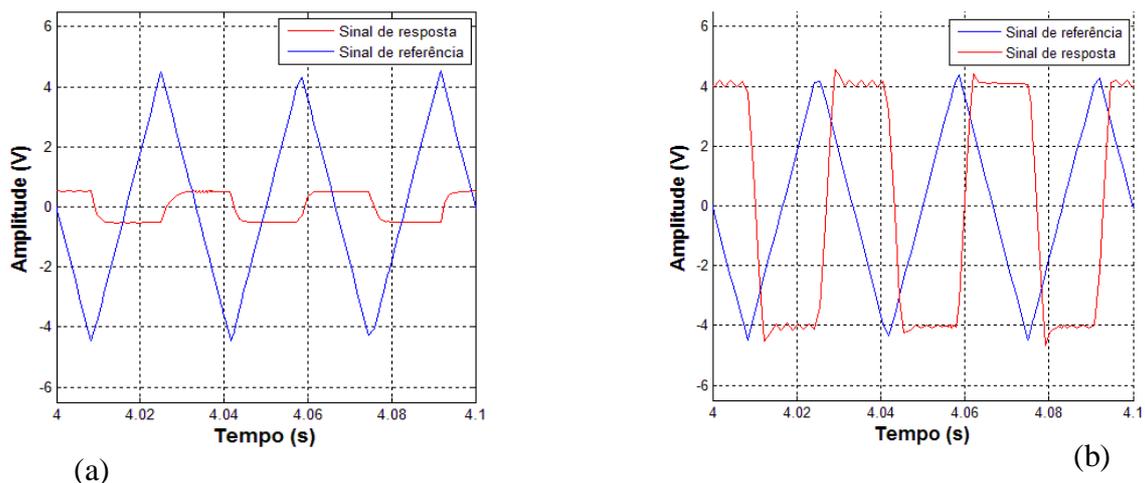


Figura 3 – Proporcional Derivativo com capacitor de 10nF (a) e de 100nF (b)

Para o controlador PI verificou-se que ao aplicar um sinal de pulsos à entrada, o sinal de saída era a onda triangular, como mostra a Figura 4, e que dependendo da seleção do

capacitor se obtinha um ganho diferente. Nas Figuras 4 (a) e (b) apresenta dois ganhos diferentes para capacitor de $0.1\mu\text{F}$ e $1.0\mu\text{F}$ respectivamente. Pode-se observar que quanto menor a capacitância maior é o ganho da resposta de saída.

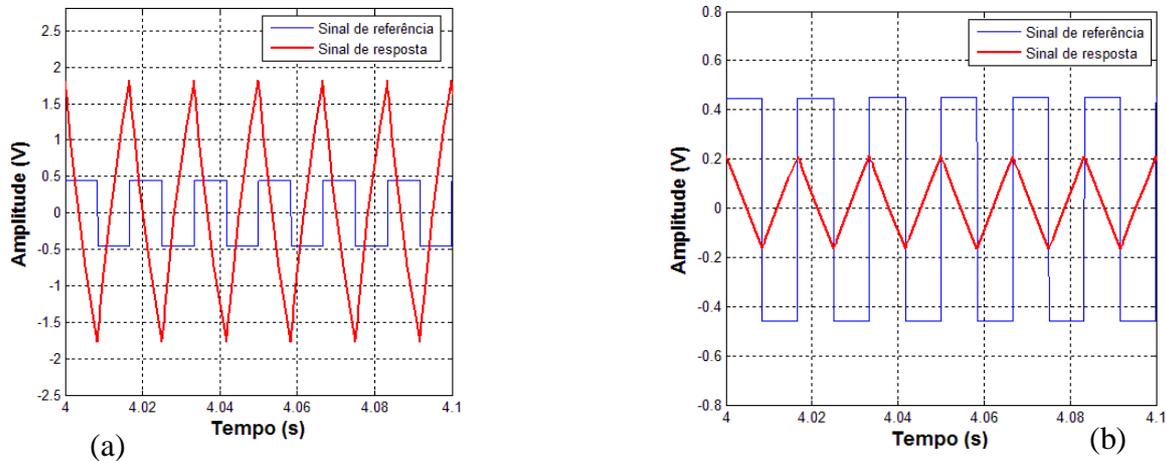


Figura 4 – Proporcional Integral com capacitor de $0.1\mu\text{F}$ (a) e de $1.0\mu\text{F}$ (b)

5.2 Testes Reais dos Controladores

Os projetos dos controladores foram construídos fisicamente e implementados conforme os circuitos simulados no EWB, porém com características de resistência e capacitância diferentes, de modo que se obtivesse melhor desempenho nas respostas de saída. E com a aquisição de dados através de um sistema de aquisição de dados (COSTA, 2010), puderam-se obter as formas de ondas.

Para o controlador proporcional, foi aplicado um sinal de pulsos, variando o reostato de forma que o ganho se degenera-se com o aumento da resistência do potenciômetro, com isso constataram-se um sinal semelhante ao de entrada, porém com alterações no ganho, como mostra a Figura 4.

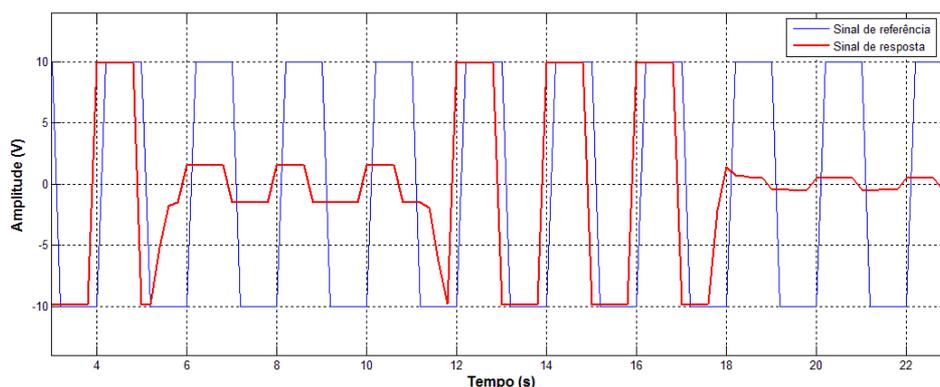


Figura 5 – Resposta do ganho do controlador proporcional

Para o controlador PD foi aplicado uma onda triangular e na saída obteve-se uma onda quadrada, tal resultado já era esperado tendo como base a literatura pesquisada e a simulação computacional. A variação dos capacitores atua de forma perceptiva no ganho da resposta e na constante de tempo do circuito. Tais respostas podem ser visualizadas na Figura 6. Ao

utilizar o valor de capacitância maior verificou-se que o ganho da resposta do sistema aumentou e tornou a forma de onda mais próxima de uma forma de onda quadrada, reduzindo as trepidações perceptíveis na forma de onda do sinal resposta quando foi utilizado o capacitor de menor capacitância.

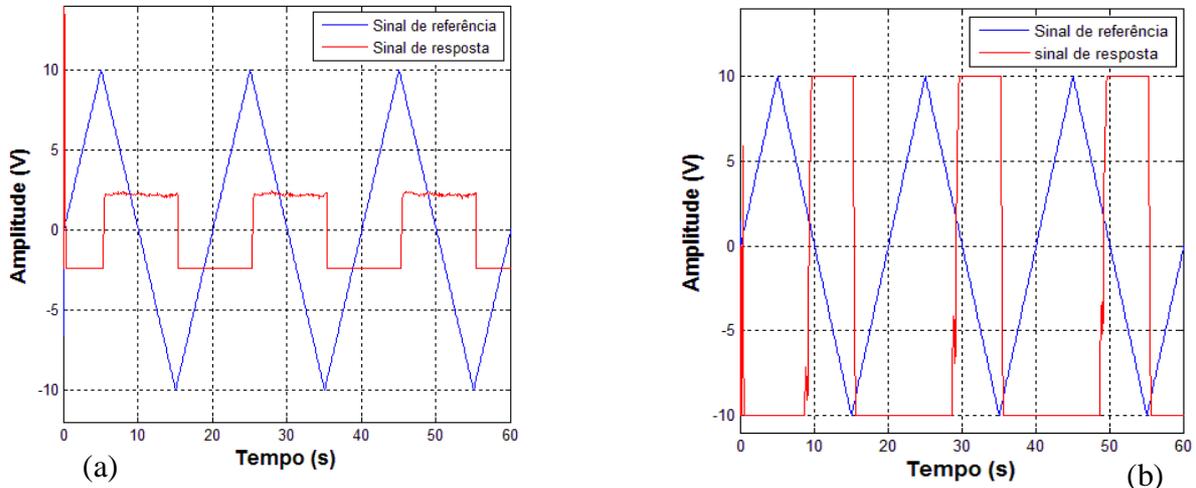


Figura 6 – Proporcional Derivativo com capacitor de $0.1 \mu\text{F}$ (a) e de $1.0\mu\text{F}$ (b)

No teste do controlador PI foi aplicada uma onda quadrada e na saída obteve-se uma onda triangular como apresentado na simulação computacional. Como já esperado o aumento do capacitor tornou sua constante de tempo maior, e com isso o sinal resposta será constituído por partes lineares das curvas de carregamento e descarregamento do capacitor, tal fato pode ser observado pela formação da onda triangular, como mostrado na Figura 7(b), enquanto que uma capacitância menor possui uma constante de tempo também menor, por conseguinte sua forma de onda do sinal resposta se assemelha as curvas exponenciais de carga e descarga do capacitor como mostra da Figura 7 (a)

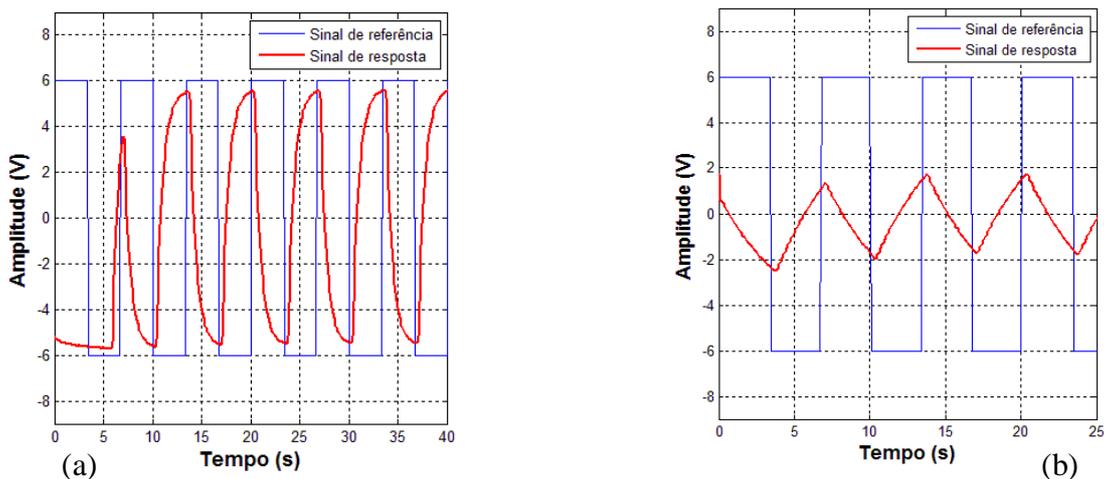


Figura 7 – Proporcional Integral com capacitor de $100\mu\text{F}$ (a) e de $470\mu\text{F}$ (b)

5.3 Avaliação para controlador PID

A partir das simulações no EWB, das respostas dos circuitos reais e com base nos parâmetros utilizados pode-se afirmar que os sistemas são lineares. Assim, tendo em vista que os controladores clássicos devem conter tal característica, o método de controle PID pode ser formado pela junção de cada controlador testado podendo atuar de forma que garanta as especificações de um projeto de controle.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho são apresentadas técnicas de para a implementação de circuitos analógicos que visam o controle de sistemas lineares. A utilização do *software Eletronics Work Bench* atende as necessidades para a simulação dos sistemas dado um sinal de entrada e a verificação do sinal de saída. Este método se tornou referência ao momento de comparação das formas de onda dos circuitos reais, onde ambos atenderam a literatura consultada. Tais experimentos formam metodologias de Ensino de Engenharia, que tem como finalidade ampliar as vertentes de aplicação do estudo da área de controle e automação e tornar o uso dessas ferramentas mais interativo, podendo usufruir das análises computacionais, dos circuitos reais e/ou de ambos, além de testes para controle de sistemas elétricos. Ressaltando que este método é de baixo custo, de simples aplicação e permite que o estudante tenha uma aproximação maior com o funcionamento dos controladores a ponto de conseguir perceber os resultados das análises e relacioná-las com as características dos componentes que formam o circuito. Outros estudos serão realizados aplicando estes tipos de metodologia, como em aulas da Disciplina Laboratório de Controle e Sistemas do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.

REFERÊNCIAS / CITAÇÕES

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

COSTA, Miguel A. Bueno da. Introdução à simulação. Disponível em: <http://www.simucad.dep.ufscar.br/dn_sim_doc01.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2011.

COSTA, Tércio Devid Quadros da. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Sistema didático de aquisição de dados e controle aplicado nas aulas de laboratório de sistemas de controle. 2010, 97p. Trabalho de Conclusão de Curso.

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

JÚNIOR FERNANDES, Francisco G., *et al.* Implementação de controladores PID utilizando lógica Fuzzy e instrumentação industrial. **Anais**: VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, set. 2005.

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, II. Monografia (Mestrado).

SANTOS, Edson R. Apostila de EWB. Disponível em: <<http://edsonfatec.br.tripod.com/aulas/eletronica/APEWB.PDF>>. Acesso em: 09 jun. 2011.

SILVA, João M. G. da. O controlador proporcional-intergral-derivativo. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node30.html>>. Acesso em: 09 jun. 2011.

SIMULATION AND CONSTRUCTION OF CLASSICAL CONTROLLERS AS A PROPOSAL TO THE TEACHING ENGINEERING

Abstract: *This paper contains the study of the classical controllers PID in the application to engineering education. The study in question aims to make learning control techniques more practical and interactive, allowing greater absorption of knowledge by students. For this method be built, virtual simulations and real tests were done, with the use of software Electronic Work Bench and the physical assembly of analog circuits. After this, was done the analysis of the behavior of each type of controller used (P, PI and PD). It was found that the implementation of PID variant, which combines the best features of each type, is indeed feasible and accessible understanding if using a teaching method that allows the engineering student itself sees the behavior of the systems and get your own conclusions with the teacher as advisor. The work in question demonstrates an alternative education when it comes to classic controller applied to real systems.*

Key-words: *Classic controllers, Methodological tools, EWB, Real tests*