



PROJETO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE CONTROLADORES APLICADOS EM UM SISTEMA ELETROMECAÂNICO DE POSIÇÃO

José Bezerra de Menezes

Pós-Graduação em Eng. Mecânica - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB,
Fax: 2167186, e-mail: jbmenezes@bol.com.br

Simplicio Arnaud da Silva

Departamento de Tecnologia Mecânica - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB,
Fax: 2167186, e-mail: lacerdaarnaud@uol.com.br

José Antônio Riul

Departamento de Tecnologia Mecânica - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB,
Fax: 2167186, e-mail: riul@ct.ufpb.br

Seyyed Said Dana

Departamento de Tecnologia Mecânica - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB,
Fax: 2167186, e-mail: dana@dtm.ct.ufpb.br

Resumo. O objetivo do presente trabalho é o projeto teórico e experimental de controladores para o posicionamento de um sistema eletro-mecânico, utilizando um modelo identificado do sistema. A identificação é realizada usando-se o modelo paramétrico ARMAX, a partir de dados experimentais obtidos em uma bancada de teste. Usando a função de transferência identificada são projetados controladores através das técnicas de Ziegler/Nichols e alocação de pólos. Uma simulação do controlador projetado através da técnica de imposição de pólos é realizada, com o objetivo de comparar o desempenho deste com o controlador PID obtido através da técnica de Ziegler/Nichols. Resultados experimentais do controlador PID também são apresentados.

Palavras-chave: Controle, servo-motor, identificação de sistemas.

1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista de controle, o sistema está sujeito à incertezas paramétricas e as perturbações não modeladas do sistema. Essas características limitam o uso dos controladores clássicos em aplicações de alto desempenho.

Controladores convencionais são amplamente utilizados no desenvolvimento de sistemas de controle industriais, devido ao pequeno número de parâmetros que devem ser ajustados (Ziegler e Nichols, 1942). Apesar da grande divulgação desses controladores e de sua vasta aplicabilidade, geralmente seus parâmetros são ajustados empiricamente, em decorrência do pouco conhecimento do sistema.

O controlador PID tem a capacidade de ser sensível a três parâmetros a saber K_p , T_i e T_d , o que permite a este controlador satisfazer com certas limitações, exigências de projeto em qualquer caso prático. Para os casos em que o modelo matemático do sistema não é disponível, os valores apropriados desses parâmetros podem ser escolhidos utilizando técnicas como o método do ganho crítico e o método da resposta transiente sugeridas por Ziegler e Nichols (1942). O principal motivo para a popularização destes métodos encontra-se no fato de que, para suas aplicações, não

há necessidade de conhecer um modelo para o processo a ser controlado. Basilio e Matos (2000), estudaram uma nova técnica de ajuste de controladores PI e PID. Esta técnica baseia-se em valores da resposta ao degrau. Segundo os autores, a principal vantagem desta técnica é a possibilidade de variar de forma sistemática, o ganho do controlador, de modo a estabelecer compromissos entre o desempenho transitório, a amplitude do sinal de controle e a rejeição de perturbações.

Uma técnica moderna, para projetar controladores, como alocação de pólos é similar ao projeto do lugar das raízes (Phillips e Harbor, 1997), no que diz respeito aos pólos da função de transferência de malha fechada, que podem ser situados na posição desejada. Entretanto, o projeto por alocação de pólos permite que todos os pólos da função de transferência sejam relocados, enquanto que o projeto do lugar das raízes só atua no deslocamento dos pólos dominantes.

Para a localização de todos os pólos é necessária à medição de diversas variáveis do sistema, o que muitas vezes torna-se inviável devido aos custos ou a falta de transdutores adequados. Neste caso, as variáveis que não forem medidas devem ser estimadas a partir daquelas que são mensuráveis. Filho, (2000) fez simulações do controlador convencional e do controlador projetado via imposição de pólos aplicados a um sistema hidráulico. Ele constatou que o controle via imposição de pólos apresentou melhor desempenho na ausência de perturbações.

No presente trabalho descreve-se o procedimento para a obtenção dos parâmetros dos controladores PID, utilizando o método de Ziegler/Nichols a partir de um modelo identificado do sistema em estudo e da técnica de imposição de pólos, aplicada a um servo-posicionador eletromecânico. Resultados relativos ao desempenho do sistema, utilizando os controladores projetados, serão apresentados.

2. SISTEMA ELETROMECCÂNICO PARA O CONTROLE DE POSIÇÃO

O sistema proposto, representado na Fig. (1), consiste de um motor de corrente contínua conectado a uma correia dentada de 3 mm para transmitir movimento a uma roldana distanciada de 500 mm do eixo do motor. O conjunto foi montado em uma base de madeira juntamente com um potenciômetro linear de 10 voltas fixado no eixo do motor, que é utilizado para detetar a posição do eixo. Um gerador de CC, para simular cargas e permitir medição de velocidades, faz parte também do conjunto.

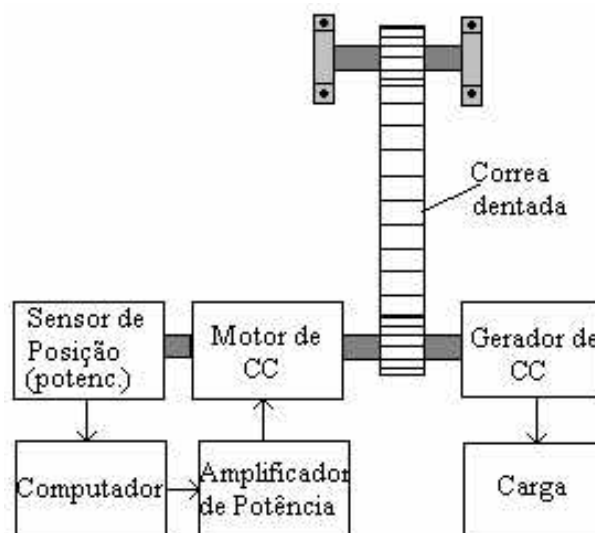


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de controle do servo-posicionador.

Os controlador convencional foi implementado em um computador pentium 200 mmx, equipado com uma placa de entrada e saída de dados marca QUATEC, modelo DAQ 801 e o programa

computacional LABVIEW. O circuito eletrônico para o acionamento e inversão do sentido de rotação do motor foi construído no laboratório, cujo funcionamento é descrito a seguir.

2.1. Circuito eletrônico de potência

Este circuito, que é utilizado como amplificador de potência e inversor de rotação do motor, como mostra o diagrama da Fig. (2) foi projetado e montado no laboratório.

O sinal de saída do computador é inicialmente subtraído de uma tensão fixa de 2,5 Volts, através do amplificador operacional AO1. Em seguida, o amplificador operacional AO2 executa uma operação de multiplicação, por um fator fixo de 4,8V. Desse modo, o sinal resultante na saída torna-se variável entre -12 V a +12V, passando por zero. Para melhorar a linearidade da tensão de saída dos transistores de potência (tensão de alimentação do motor de CC), com relação ao sinal do computador utilizou-se uma realimentação de tensão através de AO3 e AO4. A saída do circuito integrador AO5 alimenta as entradas dos comparadores AO6 e AO7, os quais determinam o sentido de rotação do motor, através da condução dos transistores de Q1 ou Q2, que definem o sentido da corrente na armadura.

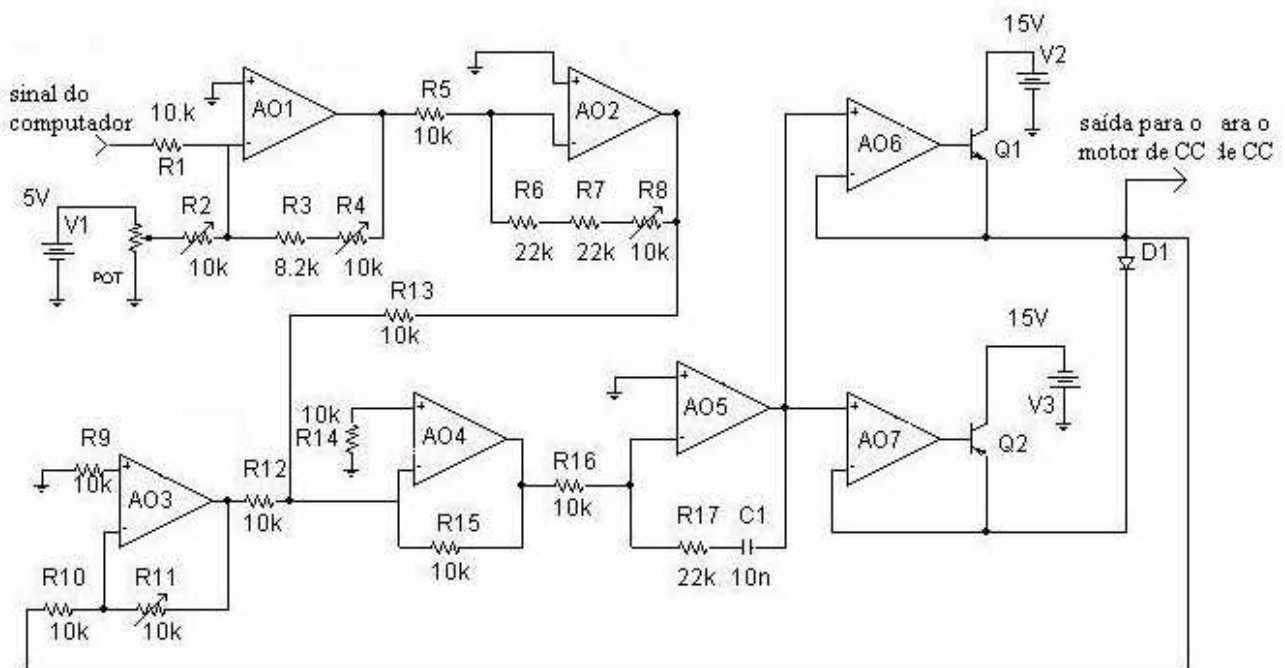


Figura 2. Circuito eletrônico para inversão da polaridade e acionamento do motor.

3. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA

A Figura (3) mostra o diagrama em blocos do sistema, em malha aberta.

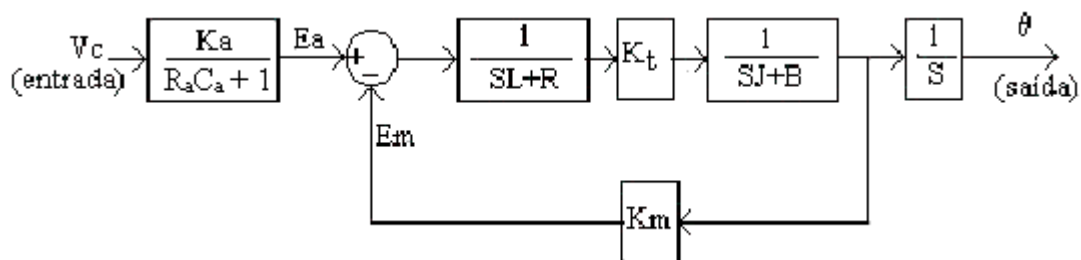


Figura 3. Diagrama em blocos do sistema em malha aberta.

A função de transferência do sistema em malha aberta é dada pela Eq. (1). De acordo com esta equação, o sistema em malha aberta é do tipo 1 e de quarta ordem.

$$G(S) = \frac{K_a K_t}{s[(R_a C_a J L)s^3 + R C_a J L(BL + J R)s^3 + R C(BL + J R)(B R + K_t K_m)s^2 + (B R + K_t K_m)]} \quad (1)$$

onde: R_a C_a são a resistência e a capacitância do amplificador, respectivamente; J é o momento de inércia total; B é o atrito do ar e rolamentos; R e L são a resistência e a indutância do motor, respectivamente; K_t é a constante de torque; K_m é a constante de velocidade e K_a é o ganho do amplificador.

4. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Os Sistemas lineares podem ser representados por modelos paramétricos e não paramétricos. Sendo os primeiros aqueles que tiverem parâmetros, ou seja, números, coeficientes que os caracterizem. Por outro lado, os modelos não paramétricos são representados por gráficos.

Dentre os modelos paramétricos existentes para a identificação de sistemas (Aguirre, 2000), o modelo ARX (autoregressive with exogenous inputs), o modelo ARMAX (autoregressive moving average with exogenous inputs), o modelo OE (output error) e o modelo Box Jenkins são os mais utilizados.

O processo de identificação é iniciado com o ensaio do sistema que se deseja modelar. Posteriormente é feita a escolha da estrutura do modelo, seguida da estimação dos parâmetros e da validação do mesmo. A escolha dos dados deverá ser de tal modo que contenha o maior número de informações sobre o sistema, o que significa que a escolha do sinal de excitação é decisiva para a obtenção de um modelo que incorpore o maior grau de certeza na obtenção das características do sistema original.

Na obtenção dos dados para identificação, o sistema foi excitado com um pulso, em malha aberta, como mostrado na curva 1 da Fig. (4) e a saída obtida, que é a posição do eixo do motor, está representada pela curva 2 da mesma figura.

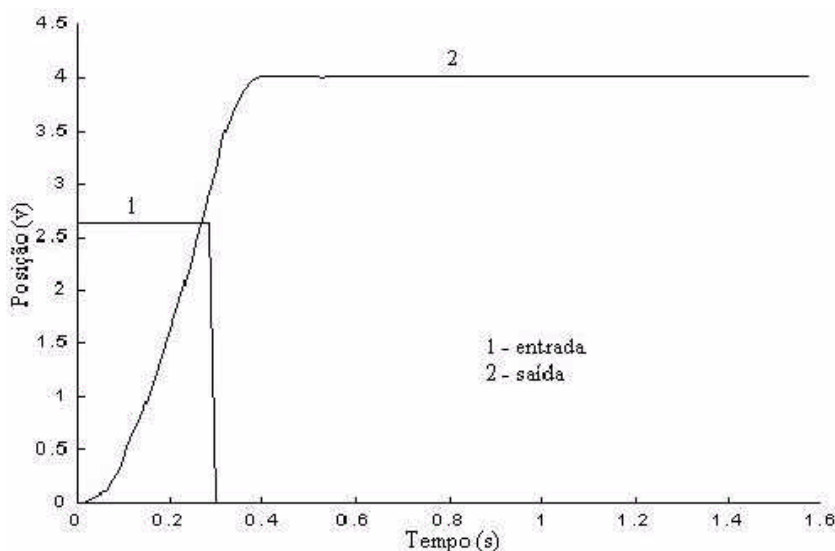


Figura 4. Curvas de excitação e resposta do sistema em malha aberta.

Após a seleção do modelo para representar o sistema, determinou-se a função de transferência do sistema em malha aberta. Posteriormente foi feito um ajuste dos parâmetros (sintonia) para obter-se uma melhor aproximação entre a resposta obtida com a planta identificada e a experimental (Aguirre, 2000). A função de transferência resultante após a sintonia é dada pela Eq. (2).

$$G(S) = \frac{330960}{s[s^3 + 138s^2 + 5405s + 65000]} \quad (2)$$

A Figura (5) mostra as curvas de resposta identificada, Eq. (2), e do sistema real. Observando-a constata-se que a curva ajustada representa bem o sistema identificado.

Para validar o sistema identificado, usou-se um outro tipo de sinal de excitação e comparou-se à resposta do sistema obtida experimentalmente, com a determinada usando a função de transferência dada pela Eq. (2). Os resultados demonstraram que o modelo apresenta características dinâmicas similares as do sistema real, podendo, desta forma ser adotado para representar o servo-posicionador.

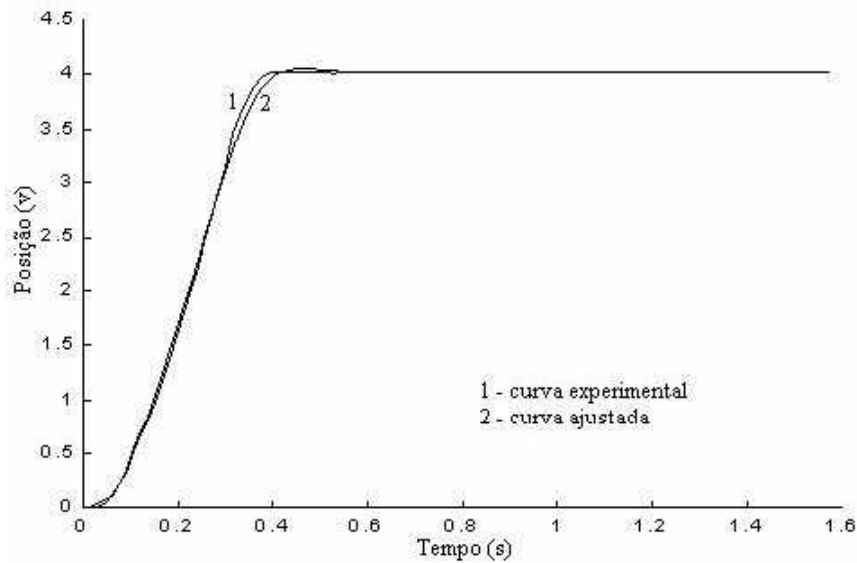


Figura 5. Curvas de resposta experimental e ajustada do sistema em malha aberta.

O diagrama do lugar das raízes é mostrado na Fig. (6). De acordo com este diagrama, o ganho crítico e a frequência natural do sistema são respectivamente 7,2 e 21,18 rad/s.

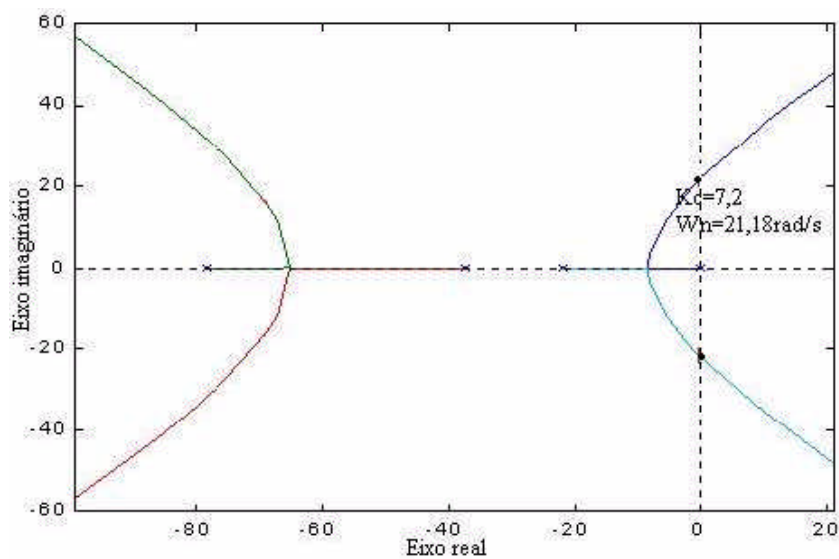


Figura 6. Diagrama do lugar das raízes do sistema em malha aberta.

5. PROJETO DE CONTROLADORES CONVENCIONAIS UTILIZANDO O MODELO IDENTIFICADO DO SISTEMA

O controlador convencional obtido pelo método de Ziegler/Nichols, através da planta identificada utiliza o ganho crítico K_c e a frequência de oscilação ω_n determinados do diagrama do lugar das raízes. O ponto de cruzamento com o eixo imaginário fornece o ganho K_c . Estes valores correspondem ao ponto de cruzamento da curva com o eixo imaginário, os quais foram determinados na seção anterior, através da Fig. (6). Os ganhos proporcional, integral e derivativo são dados pela Eq. (3).

$$K_p = 0.6K_c \quad K_d = \pi K_p / 4\omega_n \quad K_i = K_p \omega_n / \pi \quad (3)$$

De acordo com a Eq. (3), os valores obtidos para K_p e K_d foram 4.3 e $0.156s^{-1}$, respectivamente. Estes valores podem ser ajustados para atender aos critérios de desempenho desejados para o sistema conforme Shahian e Hassull (1993). O ganho integral K_i não foi determinado tendo em vista que o sistema proposto dispensa o modo integrativo.

Uma vez obtidos os parâmetros do controlador, pode-se utilizar a Eq. (4) aproximada para obter o controlador digital correspondente (Hemerly, 1996):

$$u(k) = \left(K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d T}{2} \right) e(k) - \left(K_p + \frac{K_i T}{2} - \frac{K_d T}{2} \right) e(k-1) + \frac{K_d}{T} e(k-2) + u(k-1) \quad (4)$$

onde: T é o tempo de amostragem que neste caso foi 7 ms.

Na implementação do controlador em tempo real, existe um atraso entre a aquisição de $e(k)$ e o cálculo de $u(k)$. No presente caso este atraso foi desprezado.

6. IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULADA DO CONTROLADOR CONVENCIONAL

A simulação do controlador convencional foi feita no ambiente Matlab, para o qual utilizou-se os ganhos obtidos através da técnica de Ziegler/Nichols ($K_p = 4,3$ e $K_d = 0,156$) e cuja função de transferência foi aquela obtida através da identificação, Eq. (2).

Utilizando-se a Eq. (4) implementou-se o controlador PD no ambiente Labview com os mesmos ganhos utilizados na simulação. Constatou-se que o sistema experimental apresentou oscilações excessivas tornando necessário fazer ajustes para obter uma resposta mais satisfatória. Verificou-se que diminuindo o ganho derivativo de 0,156 para 0,11 e mantendo o ganho proporcional em 4,3, o sistema apresentava um sobresinal menor e menos oscilações. As curvas de resposta ao degrau com o controlador PD simulado e experimental e as variáveis de controle são mostradas nas Fig. (7 e 8).

Verificou-se que os resultados experimentais apresentaram um sobresinal ligeiramente maior, 14% contra 12% do simulado, porém, teve um tempo de subida menor, 0,135s contra 0,175s.

Como foi constatado na Fig. (7), o sistema experimental apresentou um desvio no sentido contrário, nos primeiros instantes da partida, como se o motor tender-se a realizar um movimento no sentido oposto. A origem desse comportamento ainda não foi identificada, mas pretende-se encontrar a causa deste efeito indesejável para obter-se melhores resultados em trabalhos futuros, como a implementação da técnica de controle via imposição de pólos, que será implementada experimentalmente.

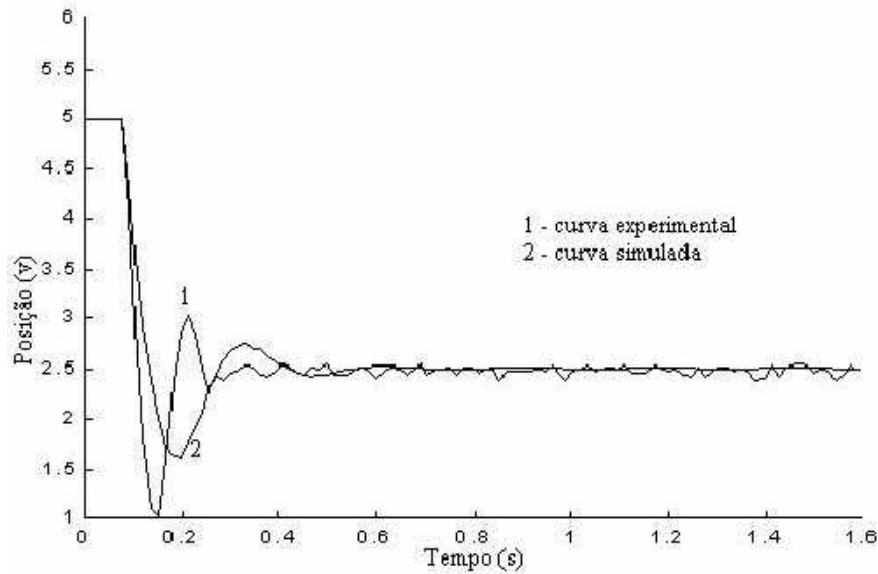


Figura 7. Curvas de resposta ao degrau do controlador PD simulado e experimental.

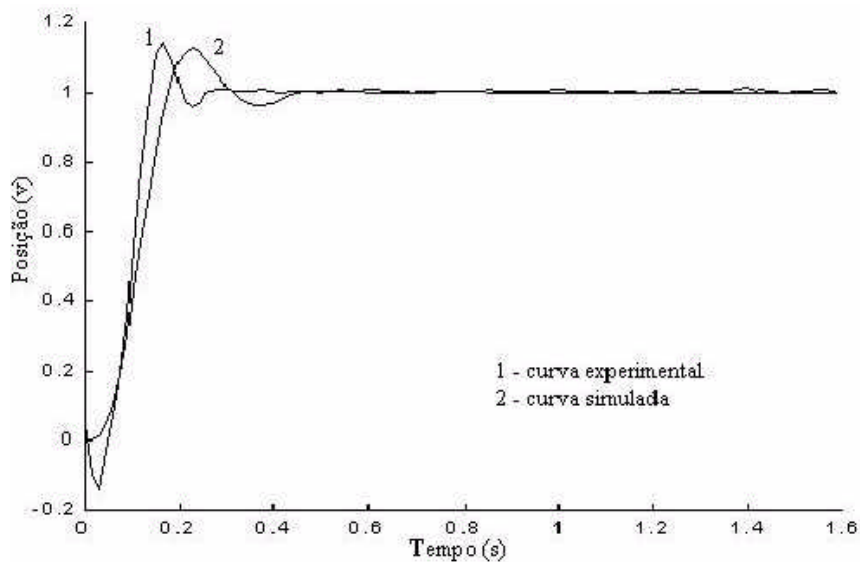


Figura 8. Curvas simuladas e experimental das variáveis de controle do controlador PD.

7. PROJETO DE CONTROLADORES UTILIZANDO A TÉCNICA DE ALOCAÇÃO DE PÓLOS

O projeto de um sistema de controle via alocação de pólos é realizado através de uma realimentação de estados. Para isso, torna-se necessário conhecer as equações de estado do sistema.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \text{e} \quad y(t) = Cx(t) \quad (5)$$

$$u(t) = -Kx(t) + K_1 r(t) \quad \text{com} \quad K = [K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4] \quad (6)$$

onde: A é a matriz de estado, B é a matriz de entrada e C é a matriz de saída.

A configuração do sistema de controle descrito pelas Eq. (5 e 6), com realimentação de estados é mostrada na Fig. (9).

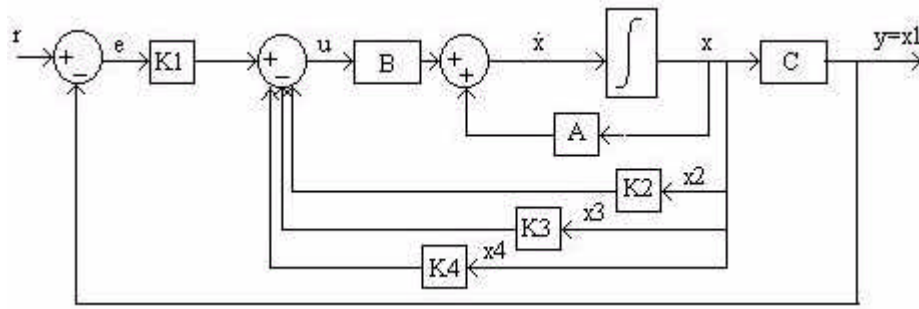


Figura 9. Diagrama em blocos do sistema de controle com realimentação de estados.

O projeto via imposição de pólos, definido pela Eq. (5), com o sinal de controle dado pela Eq. (6) obedece uma seqüência de cálculos estabelecidas em Ogata (1994) e Chen (1999). Este procedimento visa determinar os valores de K_1 , K_2 , K_3 e K_4 de forma a atender certas especificações de desempenho. Os pólos a serem usados no sistema em malha fechada são escolhidos através de simulações executadas no programa computacional Matlab. Estas simulações são feitas testando-se diversos conjuntos de pólos, calculando-se a matriz de ganho K e verificando-se a saída $y(t)$.

Através da função de transferência identificada, Eq. (2), obteve-se as seguintes equações na forma de espaço de estados:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -65000 & -5504 & -138 \end{bmatrix} \quad B = [0; 0; 0; 330960] \quad (7)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad D = [0]$$

8. SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES

Utilizando a mesma função, na forma de espaço de estados fez-se a simulação utilizando a técnica de imposição de pólos. Nesta técnica, os pólos foram impostos com vistas a obter-se as especificações de desempenho desejadas. Estes pólos foram $-14,5 \pm 17,5i$ e $-14,5 \pm 17,5i$ resultando nos seguintes ganhos: $K_1 = 0,806$, $K_2 = -0,106$, $K_3 = -0,010$ e $K_4 = -0,000242$. Os resultados das simulações para as duas técnicas de controle são mostrados nas Fig. (10 e 11).

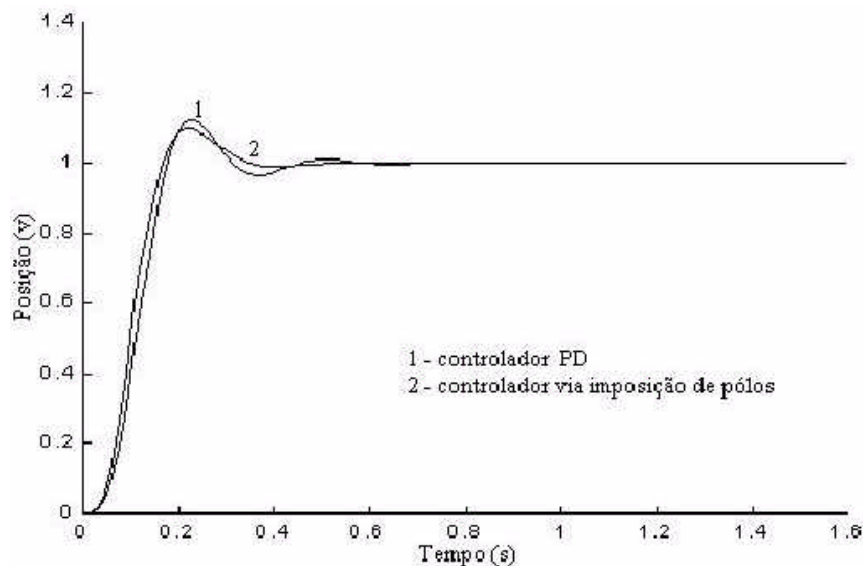


Figura 10. Curvas simuladas de resposta ao degrau dos controladores PD e imposição de pólos.

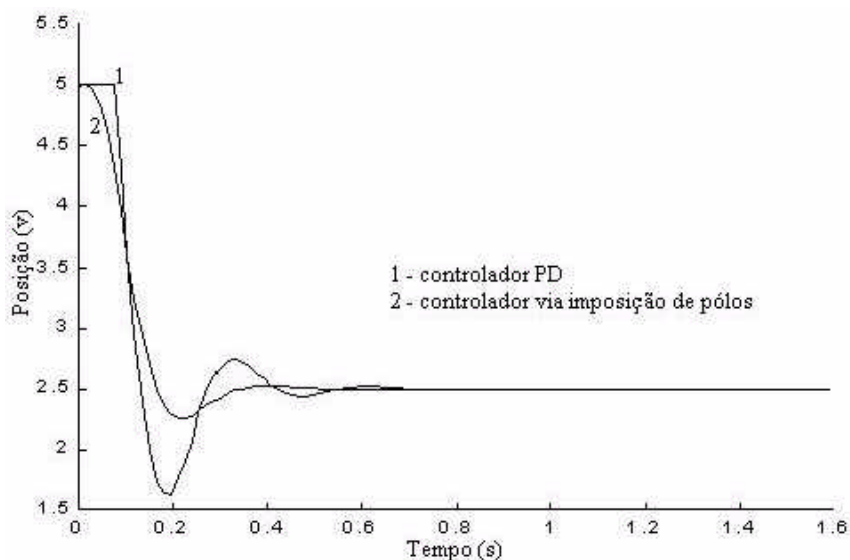


Figura 11. Curvas simuladas das variáveis de controle dos controladores PD e imposição de pólos.

Constata-se na Fig. (10) que a resposta ao degrau do controlador via imposição de pólos foi ligeiramente mais eficiente que o convencional. Com aproximadamente o mesmo tempo de subida, a técnica por alocação de pólos apresentou um sobre sinal menor, 10% contra 12% do controlador PD e apresentou menos oscilações. Para haver compatibilidade com o sistema experimental a variável de controle foi limitada em 5 Volts como mostra a Fig. (11).

9. CONCLUSÕES

Analisando-se os resultados obtidos, verificou-se que as respostas simuladas, sob a ação dos controladores proporcional-derivativo e via imposição de pólos apresentaram sobresinal e erro em regime permanente nulo, sendo que este último teve um sobresinal ligeiramente menor com menos oscilações. O controlador convencional experimental foi mais rápido no transitório, apesar do atraso provocado pelo defeito no circuito de potência. Os resultados obtidos na simulação com a técnica de imposição de pólos, não foi tão eficiente quanto se esperava, devido a sua complexidade em relação ao controlador convencional, que é simples de projetar e apresentou resultados semelhantes. Talvez os pólos impostos necessitassem de um ajuste mais fino, o que é muito laborioso. Em trabalhos futuros, resultados experimentais utilizando esta técnica serão apresentados.

10. REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., 2000, "Introdução à Identificação, Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas à sistemas reais". Ed. UFMG, Belo Horizonte - MG.
- Basilio, J. C. e Matos, S. R., 2000, "Uma nova Técnica de Ajuste Automático de Controladores PI e PID Industriais", CBA 2000 - Florianópolis - SC.
- Chen C. T., 1999, "Linear System Theory and Design", Oxford University Press - New York.
- Filho, C.J. P., 2000, "Aplicação e Avaliação de Técnicas de Controle Clássico e do Controle via Imposição de pólos em um Sistema Hidráulico", Dissertação - UFPB - João Pessoa - PB.
- Hemerly, E. M., (1996), "Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos", Editora Edgard Blucher LTDA - São Paulo - SP.
- Ogata, K., 1993, "Engenharia de Controle Moderno", Prentice Hall do Brasil LTDA - Rio de Janeiro.
- Ogata, K., 1994, "Designing Linear Control Systems With Matlab", Prentice Hall - New Jersey.
- Shahian, B. e Hassul, M., (1993), "Control System Design Using Matlab", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Phillips, C. L. e Harbor, R. D., 1997, "Sistemas de Controle e realimentação" , Editora MAKRON Books do Brasil Ltda. São Paulo - SP.
- Ziegler, J. G. e Nichols, N. B., 1942, "Optimum Settings for Automatic Controllers", Trans. ASME, vol. 64, pp. 759-768

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PROJECT OF CONTROLLERS APPLIED IN A
SYSTEM ELECTRO-MECHANIC OF POSITION**

José Bezerra de Menezes

Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: jbmenezes@bol.com.br

Simplicio Arnaud da Silva

Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: lacerdaarnaud@uol.com.br

José Antônio Riul

Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: riul@ct.ufpb.br

Seyyed Said Dana

Department of Mechanical Technology - CT - UFPB - Campus I - CEP:58059-900 - João Pessoa - PB, Fax: 2167186, e-mail: dana@dtm.ct.ufpb.br

***Abstract.** The objective of this work is presenting the theoretical and experimental design of the controllers for the positioning of an electric-mechanic system using the identified model of the system. The identification process is done by the parametric models Box Jenkins and ARMAX, using the experimental data (input and output) found in a test bench. The controllers parameters are obtained by the identified transfer function, which are implemented in the experimental system. A simulation of the designed controllers has been done also by imposition pole technique, with the objective of comparing its performance with the classical controller obtained by Ziegler and Nichols's technique.*

***Keywords:** Control, servo-motor, systems identification.*