



CONTROLADOR NEURAL ADAPTATIVO DIRETO APLICADO EM UM ATUADOR PNEUMÁTICO

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

Benedito Santana de Oliveira – Departamento de Tecnologia Mecânica – CT–UFPB – Campus I - CEP: 58059–900 – João Pessoa – PB, Fax: 2167186, e–mail: bsso@openline.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

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

***Resumo.** Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um sistema de controle não-linear para o posicionamento de um atuador pneumático. A estratégia de controle proposta é realizada em duas etapas, utilizando-se redes neurais multi-camadas. Na primeira etapa os parâmetros de uma rede neural são ajustados, através de treinamento supervisionado; e na segunda, o controle da planta é efetuado de forma similar ao treinamento, a partir dos parâmetros obtidos na primeira etapa. Resultados de simulação são mostrados para a avaliação do desempenho do sistema proposto.*

***Palavras-chave:** Atuadores Pneumáticos, Controle não-linear e Redes neurais.*

1. INTRODUÇÃO

Os posicionadores pneumáticos são relativamente baratos, leves e de fácil instalação. As não-linearidades associadas à compressibilidade, ao atrito entre o êmbolo e a camisa do cilindro atuador, juntamente com os atrasos devidos à baixa velocidade de propagação das ondas de pressão no ar, tornam os sistemas pneumáticos difíceis de serem controlados. Essas características limitam o uso dos controladores convencionais em aplicações de alto desempenho.

Perondi e Guenther (1999) testaram algoritmos convencionais de controle através de um modelo dinâmico não-linear. Em um trabalho posterior, Perondi e Guenther (2000) fizeram um estudo experimental de um controle por modos deslizantes (SLM) aplicado também a um servo-posicionador pneumático.

O objetivo do presente trabalho é o projeto de um sistema de controle não-linear para posicionamento de um pistão pneumático. Riul et al. (1999) projetaram um controlador neural inverso direto para posicionamento de um atuador hidráulico, e constataram que o erro de posicionamento era pequeno quando não existia perturbação no sistema. Se o sistema fosse perturbado, o erro aumentava e a resposta não acompanhava o sinal de referência imposto. Visando eliminar o problema verificado com a utilização do controlador neural inverso direto, quando o sistema era submetido a perturbações, Riul et al. (2000)

projetaram um controlador híbrido (neural inverso direto e proporcional) e verificaram que o erro de posicionamento do atuador hidráulico era pequeno.

Neste trabalho usa-se um controlador neural adaptativo direto para o posicionamento proposto. O controlador é projetado em duas etapas. Na primeira, uma rede neural multi-camadas (Haykin, 1994), (Beale et al., 1991) é treinada “off line” tendo como entradas a posição, a velocidade e a aceleração de referência, especificadas para a planta, e como saída a variável de controle da planta. O controlador neural tem seus pesos ajustados pelo algoritmo de propagação retroativa do erro entre a saída desejada e a obtida para a carga, através da minimização de um índice de desempenho. Na segunda etapa, o controle do sistema é realizado “on line” de forma similar ao do treinamento, a partir dos parâmetros determinados na primeira etapa. Para avaliação do desempenho do sistema de controle projetado, resultados de simulação são mostrados e comparados com os obtidos através do uso de um controlador proporcional.

2. MODELO DINÂMICO DO ATUADOR PNEUMÁTICO

O sistema é constituído basicamente de uma válvula eletro-pneumática proporcional de cinco vias, marca FESTO, tipo MPYE-5 - 1/8HF - 010B; um cilindro de dupla ação e haste simples de 25mm de diâmetro e 200mm de curso, marca PARKER, tipo PIA-R025DS - 0200; uma régua potenciométrica, marca FESTO, tipo PDT-225-TLF; um computador PC pentium-200 mmx com 32 mb de memória RAM; uma placa de entrada e saída de dados, marca QUATECH, modelo DAQ-801 e o programa computacional LABVIEW.

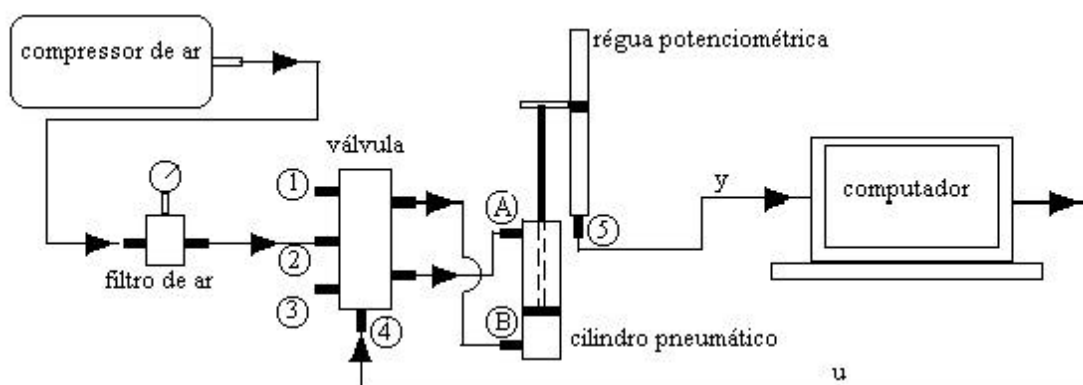


Figura 1. Diagrama Esquemático do Atuador Pneumático

O modelo dinâmico do atuador pneumático em estudo é obtido através de técnica de identificação. Na aquisição dos dados para identificação do sistema, a válvula eletro-pneumática mostrada na Fig. (1), é excitada com o sistema em malha aberta por um sinal do tipo mostrado na Eq. (1).

$$u = \left(\frac{A}{0.25t} \right) \text{sen}(0.25t) + 5 \quad (1)$$

onde: A é uma constante, t é o tempo e u é o sinal de excitação em volts.

O sinal de excitação da válvula é mostrado na Fig. (2), para vários valores de amplitude A. A Figura (3) mostra as curvas de deslocamento do pistão, obtidas com uma pressão de suprimento de 400 KPa.

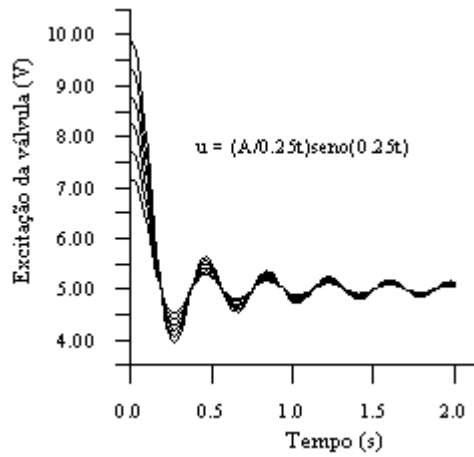


Figura 2. Sinal de Excitação da Válvula

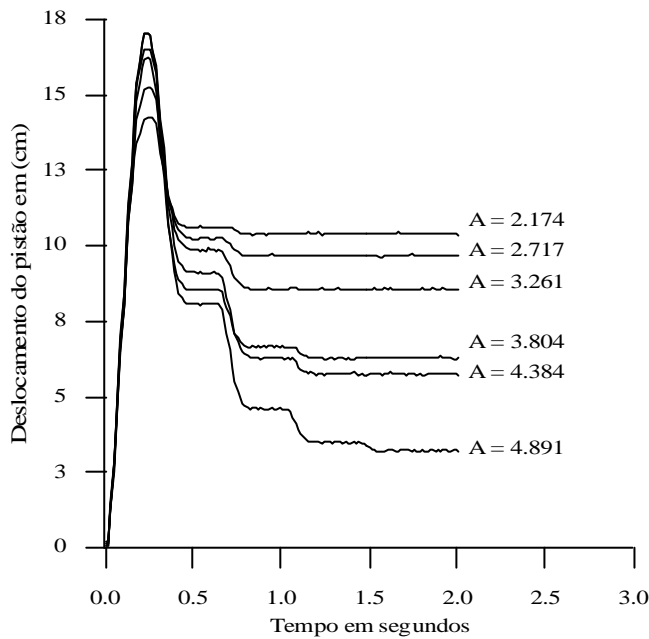


Figura 3. Resposta do Sistema em Malha Aberta

Para a identificação do sistema, foram utilizados os modelos BJ (Box Jenkins model) e ARMAX, que são técnicas de identificação paramétricas (Ljung, L., 1987), implantadas no programa computacional MATLAB.

Após a seleção do modelo para representar o sistema, foi realizado o 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 da identificação é dada pela Eq. (2).

$$G(s) = \frac{31237,5}{s(s^2 + 32,13s + 1274,49)} \quad (2)$$

O modelo do sistema, representado na forma de função de transferência é mostrado na forma de espaço de estados através da Eq. (3.a) e da Eq. (3.b).

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -35.7 & -127.5 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} u \quad (3.a)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 31237.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \quad (3.b)$$

3. CONTROLADOR NEURAL ADAPTATIVO DIRETO

A Figura (4) mostra um esboço do controlador neural adaptativo direto (Cavalcanti, 1994) e da planta. O controlador é treinado “off line” para que a saída y da planta siga a referência y_r . Isto é obtido pela minimização do índice de desempenho I'_w dado pela Eq. (4). A minimização é realizada como segue: primeiro, o alvo da rede é determinado usando-se o algoritmo de propagação retroativa do erro (APR) de forma a minimizar o índice de desempenho I_u dado pela Eq. (5). Definindo-se como u_r o valor de saída da rede, então o valor de entrada da planta u_p é obtido pela Eq. (6), que é o resultado da minimização do índice de desempenho I_u . Dessa forma, o alvo da rede u_p depende do erro entre y_r e y , do Jacobiano da planta e do fator de adaptação η . O Jacobiano é calculado impondo-se uma sequência de entrada impulsiva $u(K)$ e determinando-se a sequência de saída $y(K)$ da planta; e através dessas duas sequências a curva $y(u)$ é obtida e conseqüentemente sua derivada. E, na sequência, os pesos de entrada W_e e de saída W_s da rede neural são ajustados utilizando-se o algoritmo anterior, para obtenção do sinal de controle u com a minimização do índice de desempenho I_w dado pela Eq. (7).

$$I'_w (K) = \frac{1}{2} [\text{erroy}(K)]^2 \quad (4)$$

onde: $\text{erroy}(K) = y_r(K) - y(K)$

$$I_u (K) = \frac{1}{2} [\text{erroy}(K)]^2 \quad (5)$$

$$u(K+1) = u(K) - \eta \nabla I_u (K) \quad (6)$$

onde: $\nabla I_u = -\text{erroy} \cdot \frac{\partial y(K)}{\partial u(K)}$

$u(K+1) = u_p$ e $u(K) = u_r$.

$$I_w (K) = \frac{1}{2} [u(K+1) - u(K)]^2 \quad (7)$$

O ajuste dos pesos da rede é obtido conforme Eq. (8) e Eq. (9).

$$W_s (K+1) = W_s (K) - \mu \nabla I_w (K) \quad (8)$$

$$W_e(K+1) = W_e(K) - \mu \nabla I_{w_e}(K) \quad (9)$$

onde μ é o fator de treinamento.

A rede neural usada para o controlador adaptativo direto (CNAD) é composta por uma camada de entrada com função de ativação linear (L), uma intermediária com função de ativação tangente hiperbólica (tgh) e a de saída com função linear (L). A camada de entrada da rede tem três neurônios e as entradas são: trajetória, velocidade e aceleração de referência. A camada intermediária contém sete neurônios e a de saída um, que é a variável de controle da planta. A fase de controle “on line” é realizada da mesma forma que a “off line”, a partir dos pesos obtidos durante o treinamento.

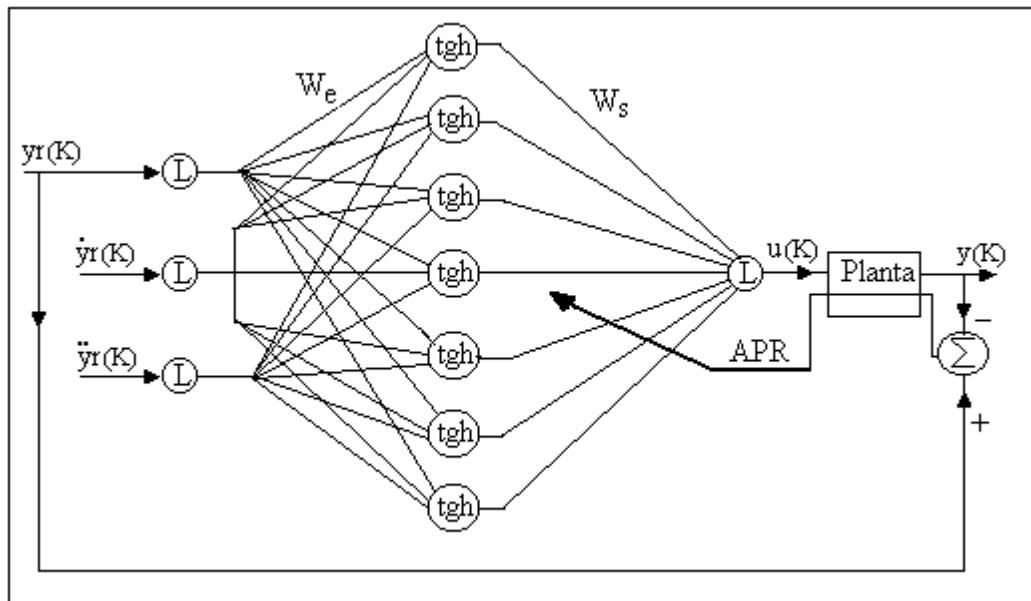


Figura 4. Rede do Controlador Neural Adaptativo Direto e Planta.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para a fase de treinamento da rede utilizou-se como sinal de entrada o polinômio de grau 7, $y_r(t) = -6,0t^7 + 21,0t^6 - 25,2t^5 + 10,5t^5$ para $0,0 \leq t < 1,0$ s e $y_r(t) = 0,3$ m para $t \geq 1,0$ s e sua primeira e segunda derivadas. O treinamento do controlador neural foi concluído com 400 épocas, e índice de desempenho I_w mínimo de $1,5 \times 10^{-7}$ m², como mostrado na Fig. (5), para um fator de treinamento $\mu = 0,06$, Jacobiano da planta = 2,7 e fator de adaptação $\eta = 0,012$. Na fase “on line”, realizaram-se simulações tendo como sinais de referência o polinômio de grau 7 usado no treinamento da rede, variando-se sua amplitude, e a função senoidal $y_r(t) = 0,3\sin(0,5\pi t)$. O controlador neural adaptativo direto (CNAD) foi testado e os resultados foram comparados com os obtidos através de um controlador proporcional (CP) com ganho $K_p = 0,7$ (Ogata, 1982 e D’Azzo, 1988) determinado a partir do limite de estabilidade calculado com base no modelo identificado da planta.

A Figura (6) mostra a resposta da planta à referência polinomial de grau 7, com variação na amplitude, usando-se o CNAD. Verificou-se um erro de posição do pistão da ordem de milímetros, para todas amplitudes testadas. As Figuras (7) e (8) mostram as respostas da planta às referências polinomial de grau 7 e senoidal, obtidas com os controladores neural adaptativo direto e proporcional. O teste visou comparar o desempenho do sistema usando-se os dois controladores. Verificou-se um erro de posição do pistão da ordem de 5 mm com o CNAD e da ordem de 35 mm com o CP, para as duas referências.

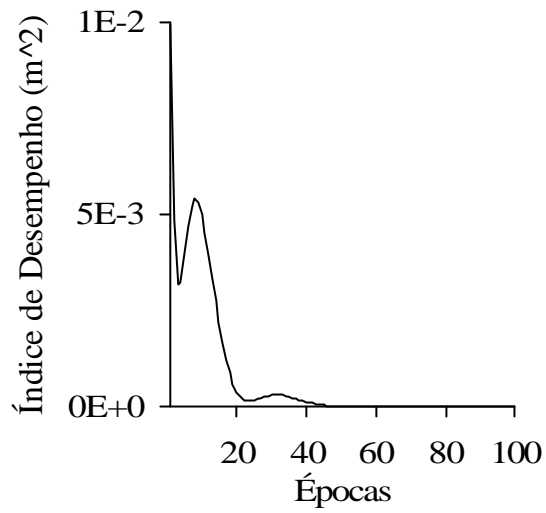


Figura 5. Índice de Desempenho do Controlador Neural Adaptativo Direto

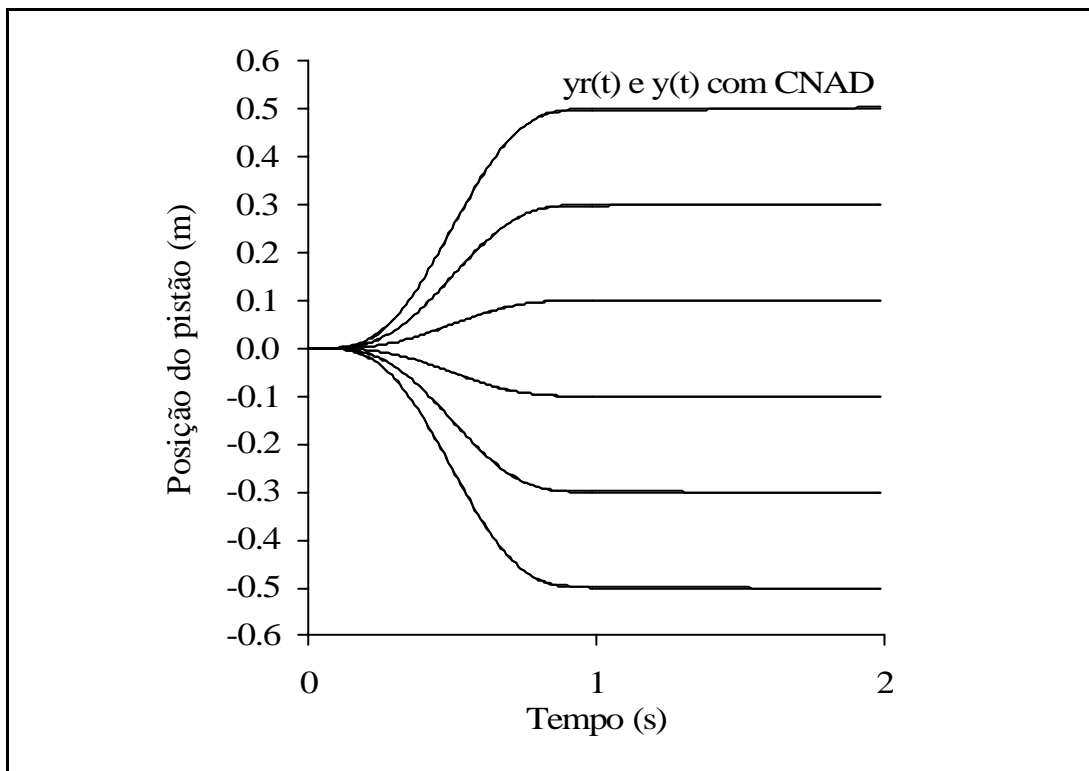


Figura 6. Respostas da planta à referência polinomial de grau 7, com variação na amplitude e controlador neural adaptativo direto

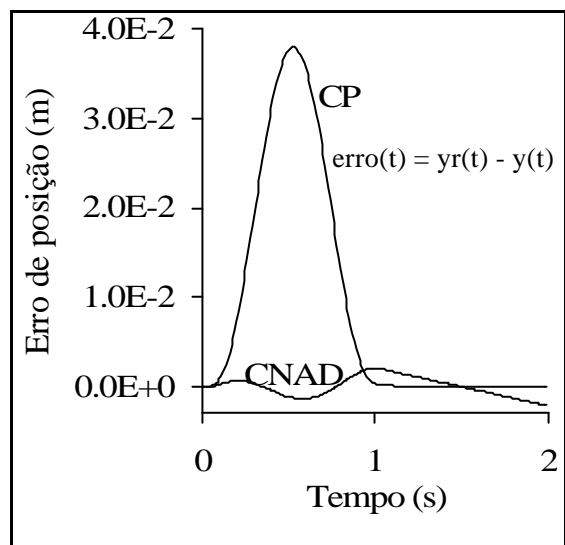
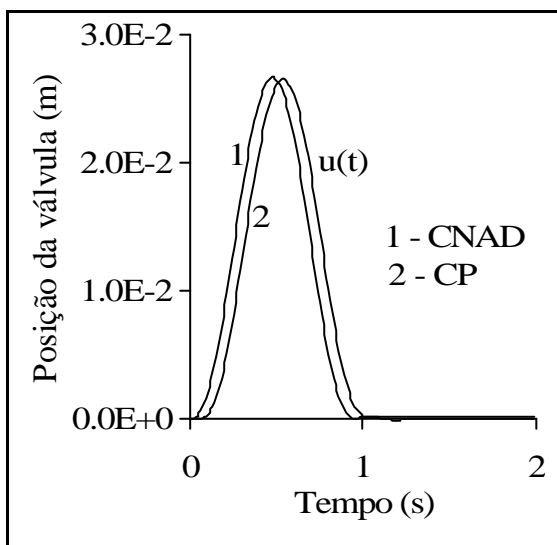
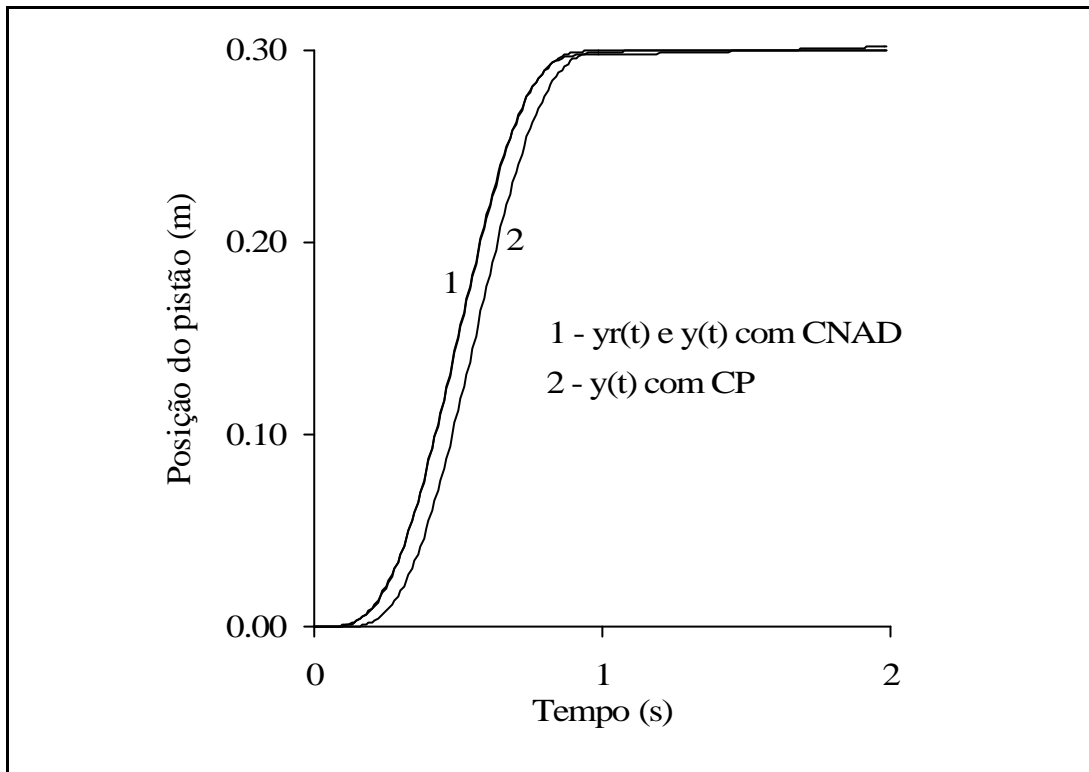


Figura 7. Respostas da planta à referência polinomial de grau 7, com controladores neural adaptativo direto e proporcional

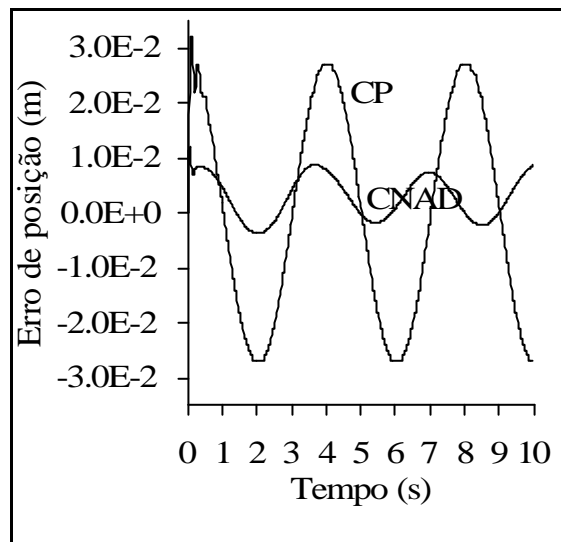
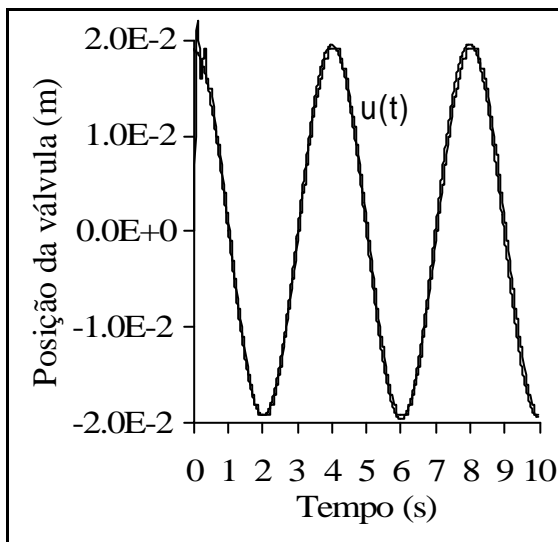
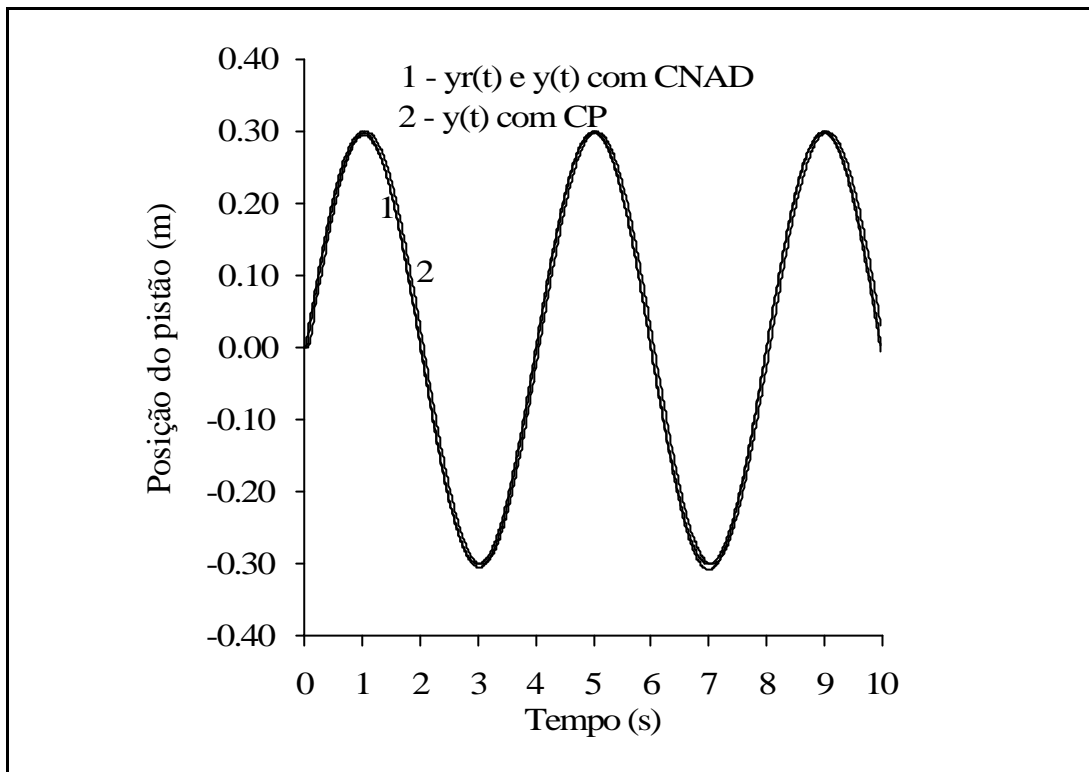


Figura 8. Respostas da planta à referência senoidal, com controladores neural adaptativo direto e proporcional

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho projetou-se um controlador neural adaptativo direto para posicionamento de um pistão pneumático. O projeto foi realizado em duas etapas; a primeira, para treinamento de uma rede neural multi-camadas e a segunda, para efetuar o controle de posição do pistão.

Realizaram-se simulações para posicionamento usando-se o controlador projetado e um proporcional. O Controlador Neural Adaptativo Direto (CNAD) foi testado, com o polinômio de grau 7 usado no treinamento, tendo sua amplitude variada, e com a função senoidal. Através dos resultados obtidos para o posicionamento do pistão pneumático, observou-se que o CNAD apresentou boa capacidade nos testes de generalização, e que o desempenho do sistema controlado pelo CNAD foi muito superior ao obtido quando controlado pelo proporcional (CP).

Pesquisas futuras serão desenvolvidas com o intuito de implementar o controlador neural experimentalmente.

6. REFERÊNCIAS

- Beale, R., Jackson, T., 1991, "Neural Computing: An Introduction", Editora Adam Hilger, New York.
- Cavalcanti, J. H. F., 1994, "Controladores Neurais Adaptativos", Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- D'Azzo, J. J., Houpis, C. H., 1988, "Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares", Editora Guanabara S. A., Rio de Janeiro - RJ.
- Haykin, S., 1994, "Neural Networks - A Comprehensive Foundation", Macmillan, New York.
- Ljung, L., 1987, "System Identification: Theory for the User", Ed. Prentice - Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ogata, K., 1982, "Engenharia de Controle Moderno", Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro - RJ.
- Perondi, E. A. e Guenther, R., 1999, "Controle em Malha Fechada de um Servo-posicionador Pneumático", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Aguas de Lindóia, SP, Brasil.
- Perondi, E. A. e Guenther, R., 2000, "Controle de um Servo-posicionador Pneumático por Modos Deslizantes", I Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil.
- Riul, J. A., Cavalcanti, J. H. F., Silva, J. F., 1999, "Neurocontrolador Inverso Direto Aplicado a um Atuador Hidráulico", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Aguas de Lindóia, SP, Brasil.
- Riul, J. A., Silva, J. F., Cavalcanti, J. H. F., 2000, "Controlador Híbrido Aplicado a um Atuador Hidráulico", I Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal, RN, Brasil.

DIRECT ADAPTIVE NEURAL CONTROL APPLIED TO A PNEUMATIC ACTUATOR

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

Benedito Santana de Oliveira – Departamento de Tecnologia Mecânica – CT–UFPB – Campus I - CEP: 58059–900 – João Pessoa – PB, Fax: 2167186, e-mail: bs@openline.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

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

***Abstract.** This work has as main objective to show a system of non-linear control for the positioning of a pneumatic actuator. The control strategy proposed is made in two steps by using of neural network. In the first step all neural network parameters are learned by supervised training. For the second step the plant control is made in similar way to supervised training from parameters obtained in the first step. The simulation results are presented to evaluate the performance of the proposed system.*

***Keywords.** Pneumatic actuator, Non-linear control and Neural network*