



## NEUROCONTROLADOR INVERSO DIRETO APLICADO A UM ATUADOR HIDRÁULICO

**JOSÉ A. RIUL**, UFPB - DTM - CT - Campus I - E-mail:riul@ct.ufpb.br

**JOSÉ H. F. CAVALCANTI**, UFPB-DEE - CCT - Campus II - E-mail:homero@dsc.ufpb.br

**JOSÉ F. SILVA**, UFPB - DTM - CT - Campus I - E-mail:felicio@funape.ufpb.br

***Resumo.** Este trabalho tem como objetivo a apresentação de um sistema de controle moderno para o posicionamento de atuadores hidráulicos. A estratégia de controle proposta utiliza-se da dinâmica inversa da planta para numa primeira etapa efetuar-se o treinamento do neurocontrolador. Na segunda etapa o neurocontrolador atua na planta realizando o controle de posicionamento. Resultados de simulação são mostrados para a avaliação do desempenho do sistema proposto.*

***Palavras-chave:** Controle de sistemas hidráulicos, Atuadores hidráulicos, Redes neurais.*

### 1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é o projeto de um sistema de controle moderno para o posicionamento de atuadores hidráulicos. Estes atuadores são utilizados onde cargas elevadas devem ser manipuladas, uma vez que fornecem força em alta escala.

Como a compressibilidade do fluido pode causar efeitos indesejáveis na resposta dinâmica dos atuadores hidráulicos, estes não são usados em aplicações onde se exige pequenos erros de posicionamento, como por exemplo nos robôs.

Neste trabalho, propõe-se o uso de um neurocontrolador para o posicionamento de atuadores hidráulicos, que minimiza os erros. O neurocontrolador é projetado em duas etapas. Na primeira, a dinâmica inversa da planta é treinada usando-se uma rede neural artificial de forma a obter-se a variável de controle. Na segunda etapa, o controle do sistema é realizado utilizando-se os pesos e parâmetros da rede neural treinada na primeira etapa em uma segunda rede neural. Para avaliação do desempenho do neurocontrolador, resultados de simulação são mostrados conjuntamente com respostas de controladores proporcionais e proporcionais-derivativos, bem como comparação de respostas para os modelos linear e não-linear da planta.

### 2. MODELO DINÂMICO DO ATUADOR HIDRÁULICO

O atuador hidráulico a ser analisado é composto basicamente de uma válvula e de um cilindro hidráulico conforme mostrado na Fig. 1. A válvula é do tipo carretel de quatro vias e

centro crítico (Guenther e De Pieri,1997). Na Figura 1,  $P_s$  é a pressão de suprimento,  $P_d$  é a pressão de descarga,  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões nas câmaras 1 e 2 do cilindro hidráulico,  $v_1$  e  $v_2$  são os volumes das câmaras 1 e 2 do cilindro hidráulico,  $Q_1$  é a vazão da válvula para a câmara 1,  $Q_2$  é a vazão da câmara 2 para o reservatório,  $M$  é a massa do sistema,  $C$  é o coeficiente de atrito viscoso,  $u$  é a posição do carretel da válvula e  $y$  é a posição da massa do sistema.

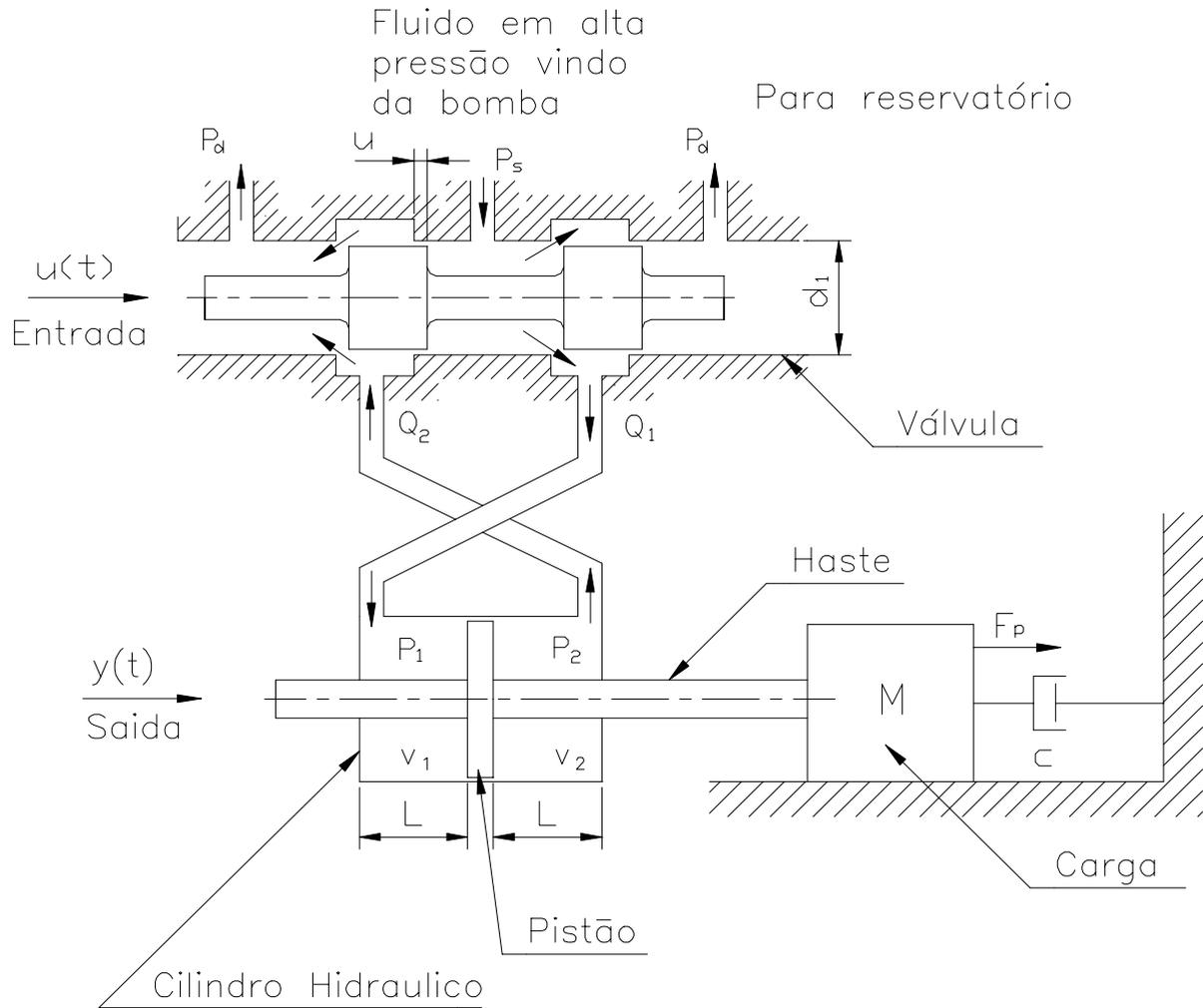


Figura 1 - Esquema do atuador hidráulico

Para se obter o modelo dinâmico do atuador hidráulico, usa-se: a equação de vazão em orifícios, a equação da continuidade e a segunda lei do movimento de Newton. O modelo resultante (Cunha et al., 1998) que relaciona a saída  $y$  e a entrada  $u$  é não-linear e de terceira ordem conforme Eq. (1) e Eq. (2).

$$M\ddot{y} + C\dot{y} = AP_1 \quad (1)$$

$$\dot{P}_1 = -\frac{\beta v}{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - (Ay)^2} A\dot{y} + \frac{\beta v}{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - (Ay)^2} K_1 \sqrt{P_s - \text{sign}(u)P_1} \cdot u \quad (2)$$

onde:  $A$  é a área da seção transversal do pistão hidráulico,  $P_1 = P_1 - P_2$  é a diferença de pressão nas câmaras 1 e 2 do cilindro,  $\beta$  é o módulo de elasticidade volumétrico do fluido,  $v = v_1 + v_2$  é o volume total do cilindro e  $K_l$  é uma constante obtida em função da massa específica do fluido, do gradiente da área da válvula e do coeficiente de arraste.

Com a linearização da Eq. (1) e da Eq. (2) em torno da posição de equilíbrio (Stringer, 1976) obtém-se o modelo dinâmico linearizado do atuador hidráulico representado pela Eq. (3) e Eq. (4).

$$M\ddot{y} + C\dot{y} = AP_1 \quad (3)$$

$$\frac{v}{4b K_q} \dot{P}_1 + \frac{K_c}{K_q} \dot{P}_1 + \frac{A}{K_q} \dot{y} = u \quad (4)$$

onde:  $K_q$  é o coeficiente de vazão da válvula e  $K_c$  é o coeficiente de pressão da válvula

### 3. NEUROCONTROLADOR INVERSO DIRETO

A dinâmica do atuador hidráulico é descrita pela Eq. (1) e pela Eq. (2) na forma não-linear e pela Eq. (3) e Eq. (4) na forma linear. Dessa forma, uma rede neural multi-camadas (Haykin, 1994), (Beale and Jackson, 1991) pode ser utilizada para aprender o mapeamento entrada-saída definido pelas equações dinâmicas. Diversas estruturas de controladores neurais foram propostas por Miller III et al. (1995) e Cavalcanti (1994). Essas estruturas baseiam-se na determinação da dinâmica da planta, onde a rede neural multi-camadas é denominada de rede neural emulador e na inversa da dinâmica da planta a ser controlada, onde a rede neural é denominada de rede neural inversa. A Figura 2, mostra o diagrama de blocos das duas estruturas anteriormente comentadas.

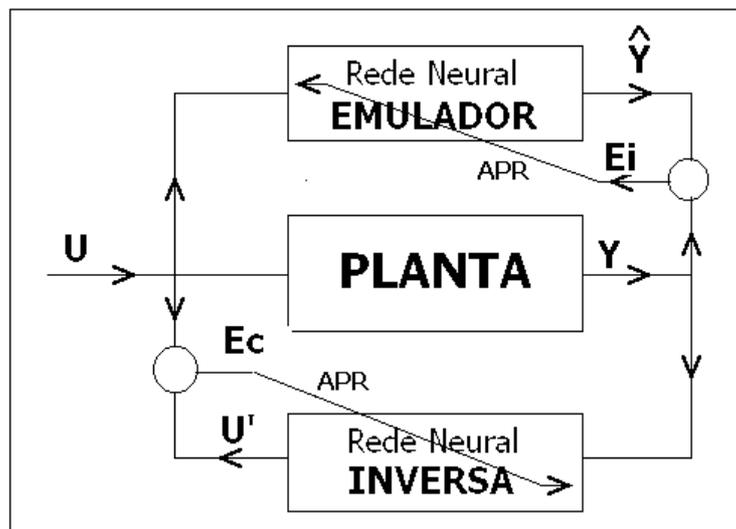


Figura 2 - Diagrama de blocos de duas redes neurais e planta

O neurocontrolador inverso direto é um tipo de controlador neural baseado na inversa da dinâmica da planta. Para este tipo de controlador, duas fases são necessárias. Na fase 1, chamada fase de treinamento que é realizada “off line”, os pesos de entrada  $W_e$  e de saída  $W_s$  e os demais parâmetros da rede neural inversa são treinados utilizando-se o algoritmo de

propagação retroativa (APR), para obtenção do sinal de controle  $u$  com base no índice de desempenho dado pela Eq. (5). Conforme mostrado na Fig. 3, a rede neural inversa utilizada para a fase 1, possui quatro neurônios na camada de entrada, sete na camada oculta e um na camada de saída. Os neurônios da camada oculta são ativados pela função tangente hiperbólica e o da camada de saída pela função linear.

$$I(t + 1) = \frac{1}{2} e^{2(t + 1)} = \frac{1}{2} [u(t + 1) - u'(t + 1)]^2 \quad (5)$$

onde:  $I$  é o índice de desempenho,  $u$  é o sinal desejado ou alvo da rede e  $u'$  é o sinal de saída da rede.

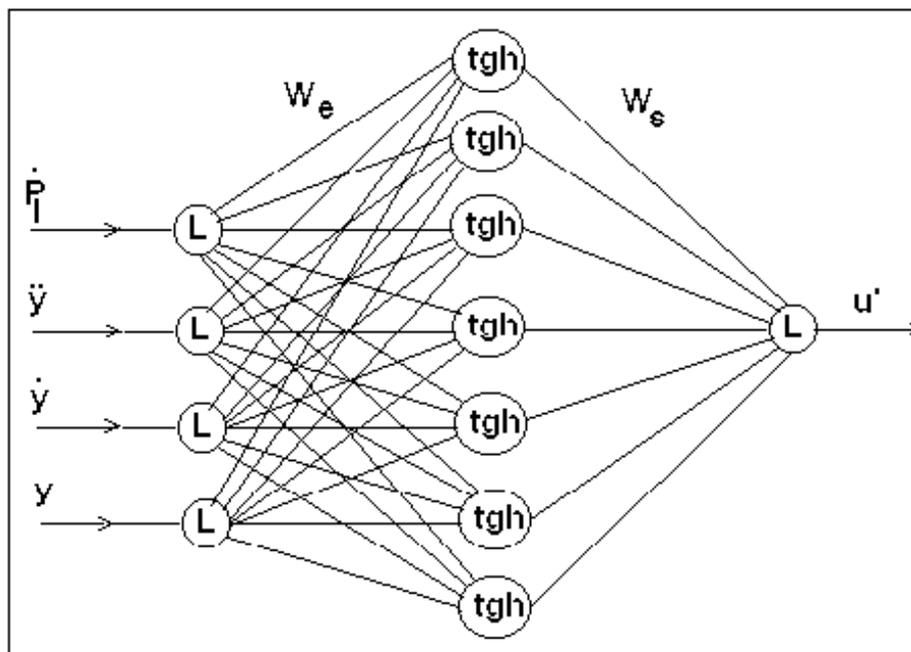


Figura 3 - Rede neural inversa

A fase 2 que é a de controle ou de operação Fig. 4., é realizada “on line”, utilizando-se os pesos e parâmetros da rede determinados na fase 1 em uma outra rede neural inversa. Um sinal de comando ou de referência é definido na entrada da rede e o sinal de controle  $u'$  é então obtido na saída da mesma e em seguida atua na planta. Observa-se assim que este controlador é de malha aberta.

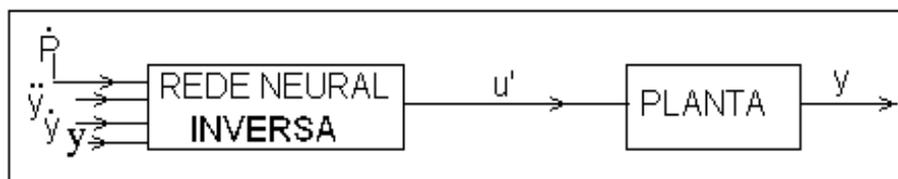


Figura 4 - Diagrama de blocos do neurocontrolador e da planta

#### 4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para a fase 1 deste trabalho, utilizou-se como sinal de entrada na rede a variação de pressão, a aceleração, a velocidade e o deslocamento da massa do atuador hidráulico, obtidos pela solução das equações dinâmicas do sistema (modelo linear) usando-se como entrada na planta uma onda quadrada de amplitude e frequência variável. O alvo ou saída desejada da rede é a onda quadrada acima referida. O treinamento efetuado (fase 1) foi concluído após 10000 épocas, resultando em um erro quadrático médio de  $7,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ . Os parâmetros utilizados para planta foram:  $M = 128,7 \text{ kg}$ ,  $C = 162,73 \text{ Ns/m}$ ,  $A = 1,075 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,  $v = 0,874 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $\beta = 14,0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ,  $K_c = 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^5/\text{Ns}$  e  $K_q = 0,73 \text{ m}^2/\text{s}$ . Na fase 2, utilizou-se como sinais de referência o polinômio de grau 7,  $y_r(t) = -2t^7 + 7t^6 - 8,4t^5 + 3,5t^4$  para  $0,0 \leq t \leq 1,0 \text{ s}$  sendo  $y_r(1) = 0,1 \text{ m}$  e  $y_r(t) = 0,1 \text{ m}$  para  $t > 1,0 \text{ s}$  e a função senoidal  $y_r(t) = 0,1 \sin(0,5\pi t)$ .

A Figura 5 mostra a resposta do atuador hidráulico (modelo linear) usando-se o neurocontrolador e um controlador proporcional (Merritt, 1967).

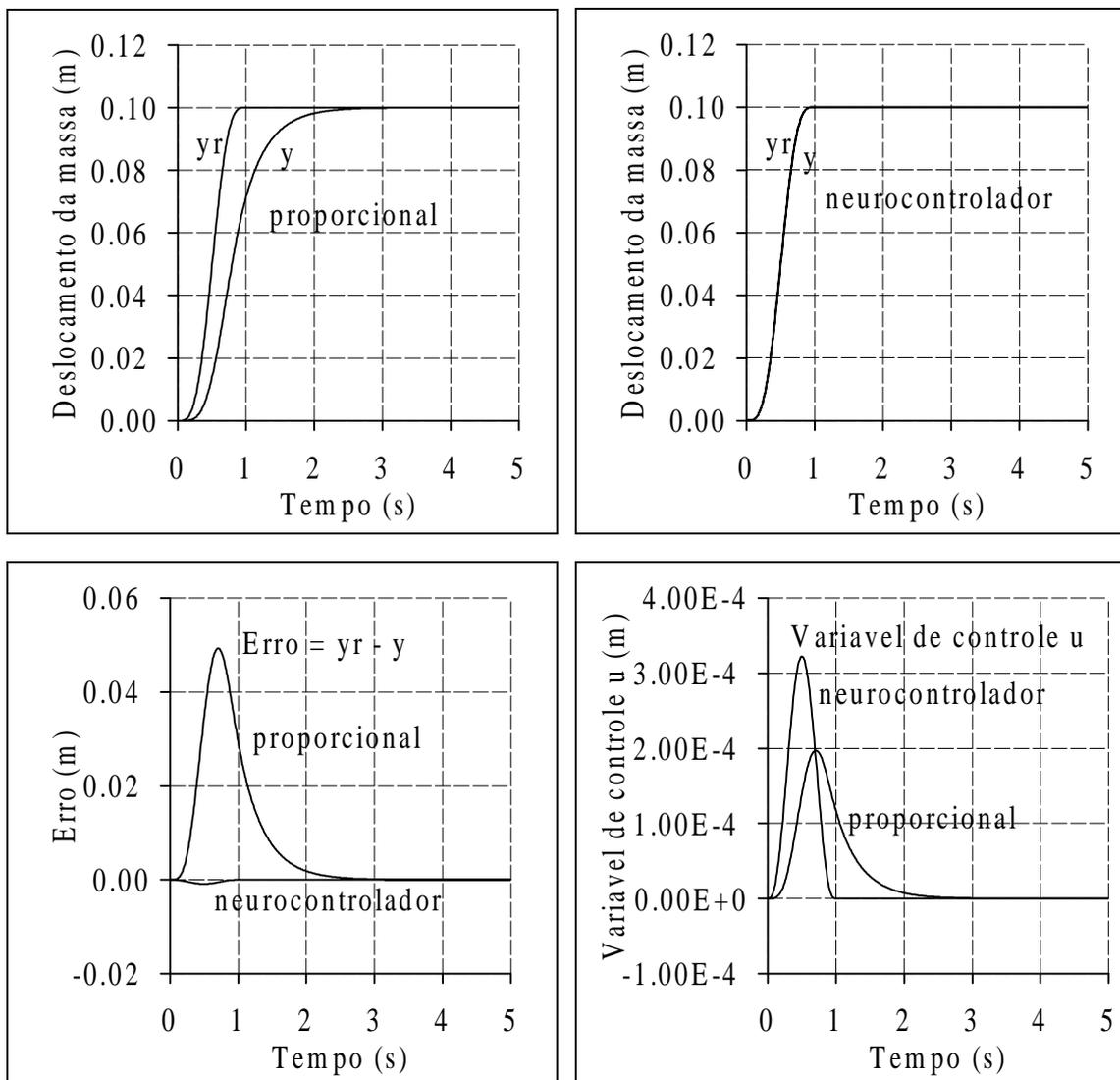


Figura 5 - Resposta da planta (modelo linear) com o controlador proporcional e o neural

O sinal de referência utilizado na Fig. 5 é o polinômio de grau 7 e o ganho proporcional é  $K_p = 4 \times 10^{-3}$  correspondente ao limite de estabilidade.

A Figura 6 mostra a resposta do atuador hidráulico (modelo linear) usando-se o neurocontrolador e um controlador proporcional-derivativo (Ogata, 1982), (D' Azzo, 1988) e (Matlab, 1995) com ganhos  $K_p = 9 \times 10^{-3}$  e  $K_d = 5 \times 10^{-3}$  para o mesmo sinal de referência que foi utilizado na Fig. 5.

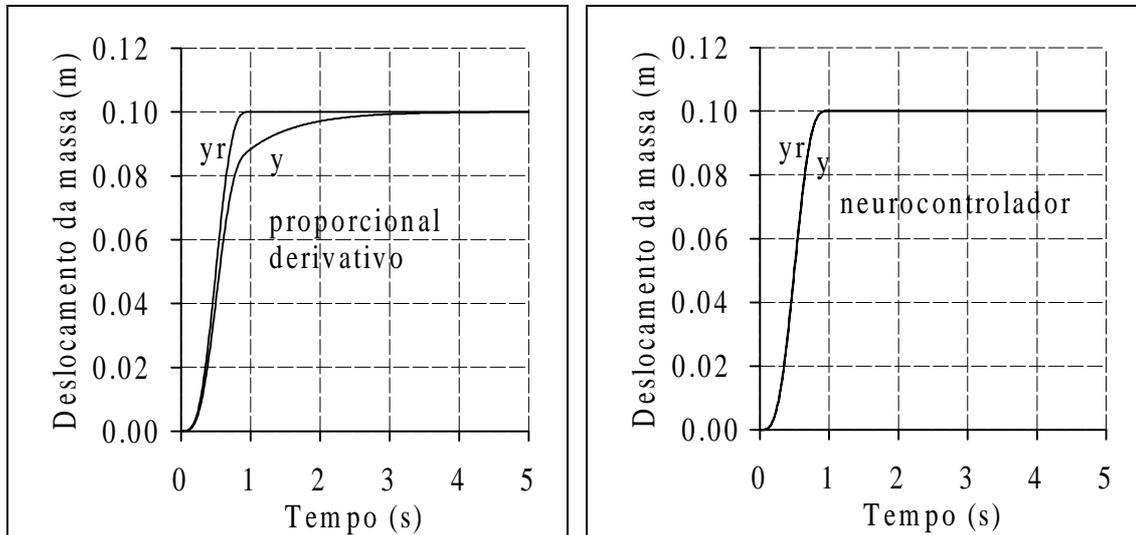


Figura 6 - Resposta da planta (modelo linear) com o controlador proporcional-derivativo e o neural

Observa-se pela Fig. 5 e pela Fig. 6 que o erro no estado permanente ( $\text{erro}_y = y_r - y$ ) é zero para os controladores proporcional, proporcional-derivativo e neurocontrolador. O controlador proporcional-derivativo reduz o erro máximo com respeito ao proporcional e o neurocontrolador apresenta pequenos erros em relação ao sinal de referência na faixa de 0 a 1s. A Figura 7 mostra a resposta do atuador hidráulico (modelo linear) usando-se o neurocontrolador e o controlador proporcional. O sinal de referência é a função senoidal descrita anteriormente e o ganho proporcional é  $K_p = 4 \times 10^{-3}$  correspondente ao limite de estabilidade.

A Figura 8 mostra a resposta do atuador hidráulico (modelo linear) usando-se o neurocontrolador e um controlador proporcional-derivativo com ganhos  $K_p = 9 \times 10^{-3}$  e  $K_d = 5 \times 10^{-3}$  para o mesmo sinal de referência que foi utilizado na Fig. 7.

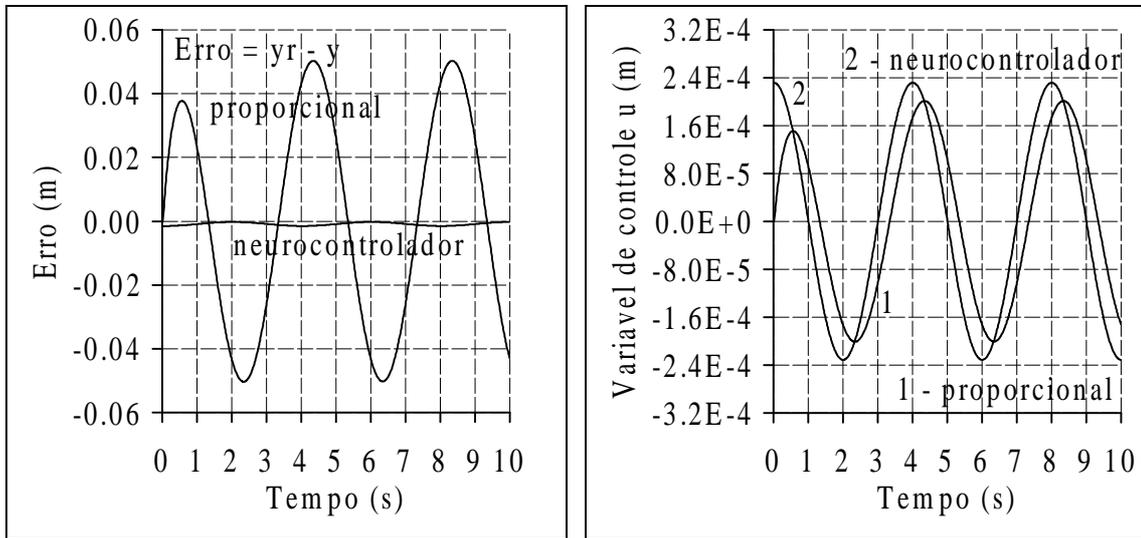
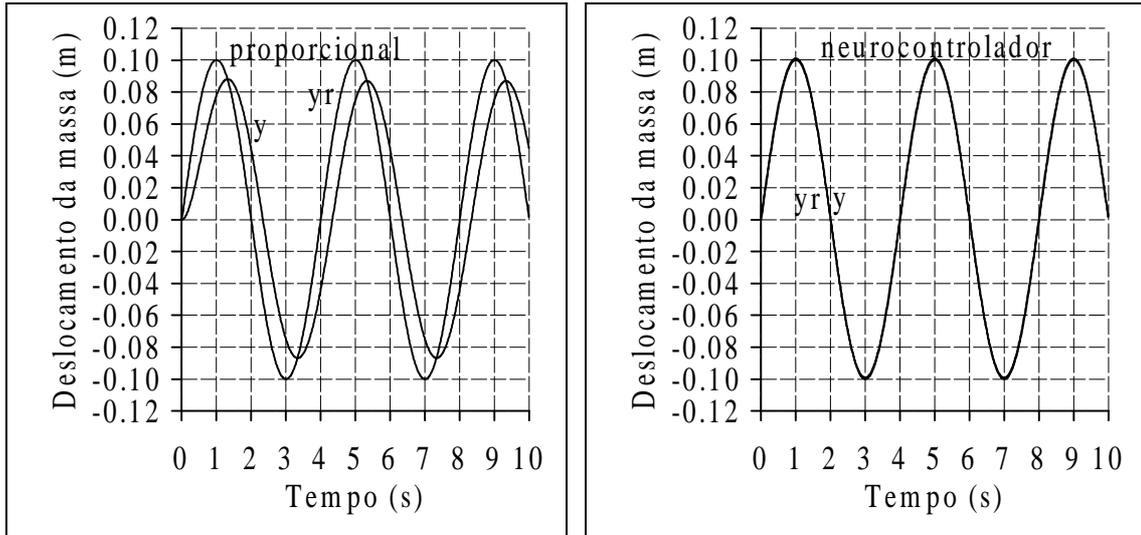


Figura 7 - Resposta da planta (modelo linear) com o controlador proporcional e o neural

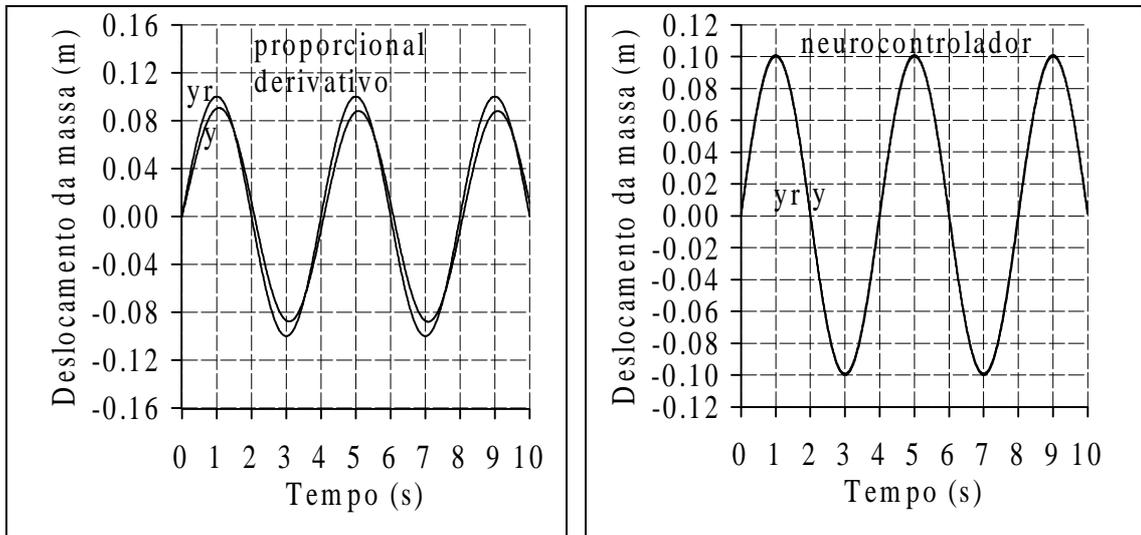


Figura 8 - Resposta da planta (modelo linear) com controlador proporcional-derivativo/neural

Observa-se pelas figuras 7 e 8, que há um erro ( $\text{erro}_y = y_r - y$ ) quando os controladores proporcional, proporcional-derivativo são utilizados, o qual é desprezível quando o neurocontrolador atua.

Guenther e De Pieri (1997) projetaram um controlador em cascata para atuadores hidráulicos e realizaram comparação de resultados com controladores proporcionais e proporcionais-derivativos da mesma forma que ora se apresenta neste trabalho. Através de comparação qualitativa entre os resultados do controlador em cascata e do neurocontrolador, pode-se afirmar que ambos tem desempenho aproximadamente iguais.

Após a obtenção dos resultados considerando o modelo linear do atuador hidráulico, foram realizadas simulações utilizando-se o neurocontrolador projetado anteriormente e o modelo não-linear da planta dado pela Eq.(1) e pela Eq.(2). A Figura 9 mostra as respostas da planta usando o modelo linear e o não-linear, tendo sido usado como sinal de referência o polinômio de ordem 7 usado anteriormente e o erro de posicionamento da planta não-linear. Verifica-se que quando o modelo não-linear é utilizado existe um aumento do erro na faixa de tempo de 0 a 1,0 s e acima de 1,0 s aparece um pequeno erro de posicionamento.

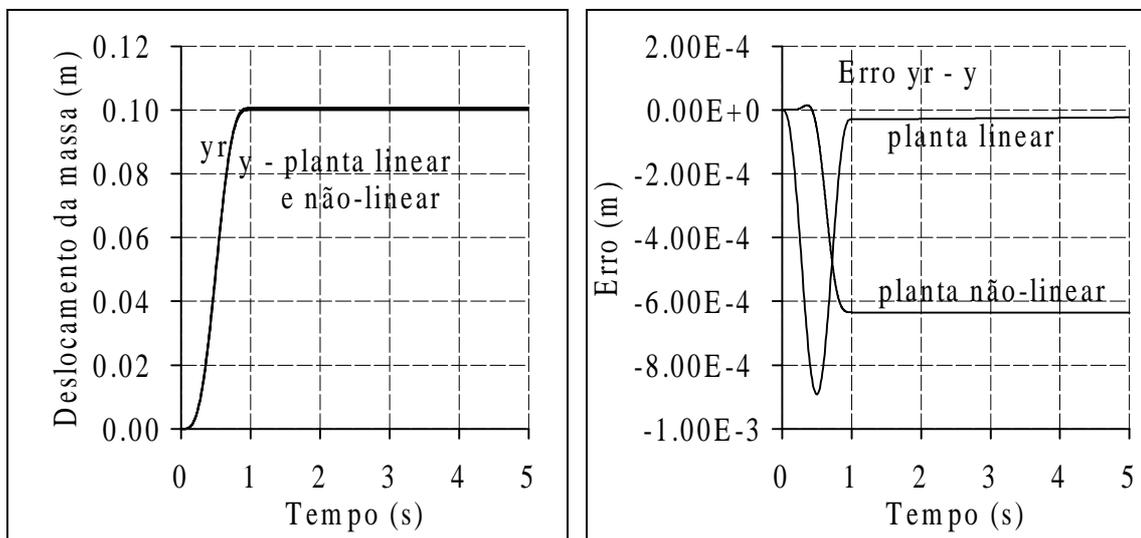


Figura 9 - Resposta do atuador hidráulico usando os modelos linear e não-linear

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido o projeto de um neurocontrolador que utiliza a dinâmica inversa da planta na fase de treinamento de uma rede neural artificial, e os pesos e parâmetros obtidos nesta fase em uma segunda rede neural para realização do controle da planta. Em seguida, foram realizadas simulações usando-se controladores proporcionais, proporcionais-derivativos e o neurocontrolador para dois sinais de referência distintos. Através dos resultados obtidos observa-se que o neurocontrolador apresenta desempenho superior ao dos outros controladores utilizados. Os resultados da simulação apresentados, também mostram que o neurocontrolador revela um pequeno erro de posicionamento da planta quando seu modelo não-linear é usado. Pesquisas futuras serão desenvolvidas com o intuito de implementar na fase de controle, a correção do erro de posicionamento de atuadores hidráulicos, bem como, novas técnicas de controle usando redes neurais.

## REFERÊNCIAS

- Beale, R., Jackson, T., 1991, Neural Computing: An Introduction, Editora Adam Hilger, New York.
- Cavalcanti, J. H. F., 1994, Controladores neuronais adaptativos, Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Cunha, M. A. B., Guenther, R., De Pieri, E. R., 1998, Controlador em cascata com adaptação de parâmetros aplicado a um atuador hidráulico, Proceedings of XII Brazilian Automatic Conference - XII CBA, September 14-18, Uberlândia, MG, Brazil, vol. 1, pp. 211-216.
- D'Azzo, J. J., Houpis, C. H., 1988, Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares, Editora Guanabara S. A., Rio de Janeiro - RJ.
- Guenther, R., De Pieri, E. R., 1997, Cascade Control of Hydraulic Actuators, RBCM - Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, vol. XIX, n. 2, pp. 108-120.
- Haykin, S., 1994, Neural Networks - A Comprehensive Foundation, Macmillan, New York.
- Matlab Reference Guide, 1995, The MathWorks Inc.
- Merritt, H. E., 1967, Hydraulic Control Systems - Part 1, Joh Wiley & Sons, New York.
- Miller III, W. T., Sutton, R. S., Werbos, P. J., 1995, Neural Networks for Control, The MIT Press, London.
- Ogata, K., 1982, Engenharia de Controle Moderno, Editora Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro - RJ.
- Stringer, J., 1976, Hydraulic Systems Analysis: An Introduction, The Macmillan Press Ltd, London.

## DIRECT INVERSE NEURAL CONTROL APPLIED TO HYDRAULIC ACTUATORS

***Abstract.** In this paper, a modern control system for positioning hydraulic actuators is proposed. The control strategy utilized is based on the inverse dynamic of the plant with which the learning of the neural control is processed. In the second stage the neural control acts in the plant in order to achieve the position control. The simulation results are presented to evaluate the performance of the proposed system.*

***Keywords:** Hydraulic control systems, Hydraulic actuators, Neural networks*