

Validação Experimental do Modelo Matemático de 3ª. Ordem para um Atuador Pneumático

Claudio da S. dos Santos, Sandra E. B. Viecelli, Antonio C. Valdiero, Luiz A. Rasia

DECEEng/UNIJUI/ Campus Panambi/Caixa Postal 121/ CEP 98280-000, Panambi – RS, Brasil.

E-mails: claudiosilvsant@gmail.com, sandra_edinara@hotmail.com, valdiero@unijui.edu.br,
rasia@unijui.edu.br.

Resumo – O presente trabalho trata da validação experimental de um modelo matemático para um atuador pneumático simétrico e sem haste. Os atuadores pneumáticos possuem diversas não linearidades devido à compressibilidade do ar e ao comportamento das vazões mássicas nos orifícios da servoválvula. A modelagem matemática contribuiu para o projeto e o controle do atuador pneumático com aplicações em equipamentos que são usados nas indústrias, na automação e na robótica. O objetivo principal é a validação experimental de um modelo não linear de 3ª ordem. A formulação do modelo matemático é baseada na literatura recente, as simulações computacionais são realizadas com auxílio da ferramenta computacional Matlab e a validação é realizada em uma bancada experimental. Os resultados ilustram as características do modelo matemático utilizado.

1. Introdução

Este trabalho trata da validação experimental do modelo matemático de um atuador pneumático simétrico e sem haste montado numa bancada experimental. Utilizou-se o modelo não linear de 3º ordem proposto por Bavaresco [1], a partir do qual foi implementado um diagrama de blocos para simulação computacional, cujos resultados de simulação computacional foram comparados com os resultados experimentais. Conforme Weickgenannt [6], o sistema pneumático possui diversas aplicações na automação industrial, na mecanização agrícola e em robôs de transporte de peças ou de pintura.

O campo de aplicações da pneumática é muito amplo e pode ser mais bem compreendido considerando-se as vantagens e limitações do uso do ar como meio de armazenamento e transmissão de energia, em conjunto com as forças, velocidades, potências e precisões, geralmente obtidas com sistema de atuação. Segundo Bollmann [2], também devem ser consideradas as principais características técnicas e qualidades dos componentes de transmissão e processamento dos sinais pneumáticos, elétricos e eletrônicos associados aos atuadores para constituírem os sistemas de comandos e automação.

A utilização da pneumática tornou-se uma das principais tecnologias utilizadas na indústria por se tratar de um sistema que possui características específicas, como baixo custo de instalação, manutenção fácil, boa relação peso/ potência, ação rápida, com alta variação de velocidade, e por ser uma tecnologia limpa que não polui o meio ambiente [4]. Também possui rapidez de resposta, tanto no movimento de um sistema pneumático, como no aumento do ritmo de trabalho [3].

Porém a modelagem matemática de atuadores pneumáticos é complexa quando comparada a outros tipos de acionamentos, pois o ar é bastante compressível e a vazão mássica nos orifícios de controle da servoválvula é uma relação não linear da pressão do sinal de controle. O atrito entre as partes móveis e as vedações do atuador também exhibe características não lineares, tornando difícil o controle do sistema [1].

No controle de sistemas pneumáticos também se deve levar em consideração a frequência natural que é uma das não linearidades presentes no sistema resultante da baixa rigidez da compressibilidade do ar dificultando o controle devido ao baixo amortecimento desse atuador Wang [5].

Conforme apresentado nesta seção, a modelagem matemática é muito importante para entendimento e previsão do comportamento dinâmico de atuadores pneumáticos e pode

contribuir para a adequada aplicação e desempenho em sistemas automáticos, principalmente na definição de estratégias de controle.

Este trabalho inicia na seção 2 onde apresenta uma breve descrição do atuador pneumático. A seção 3 apresenta o modelo matemático de 3ª. ordem do sistema que objetiva representar suas características. A seção 4 mostra a descrição da bancada experimental e a seção 5 mostra os resultados obtidos na modelagem matemática e nas simulações computacionais, validados nos testes experimentais. Por fim, apresentam-se as conclusões.

2. Descrição do Atuador Pneumático

O sistema do atuador pneumático adotado neste estudo é constituído por uma servoválvula de controle e cilindro simétrico e sem haste, conforme mostrado na Figura 1:

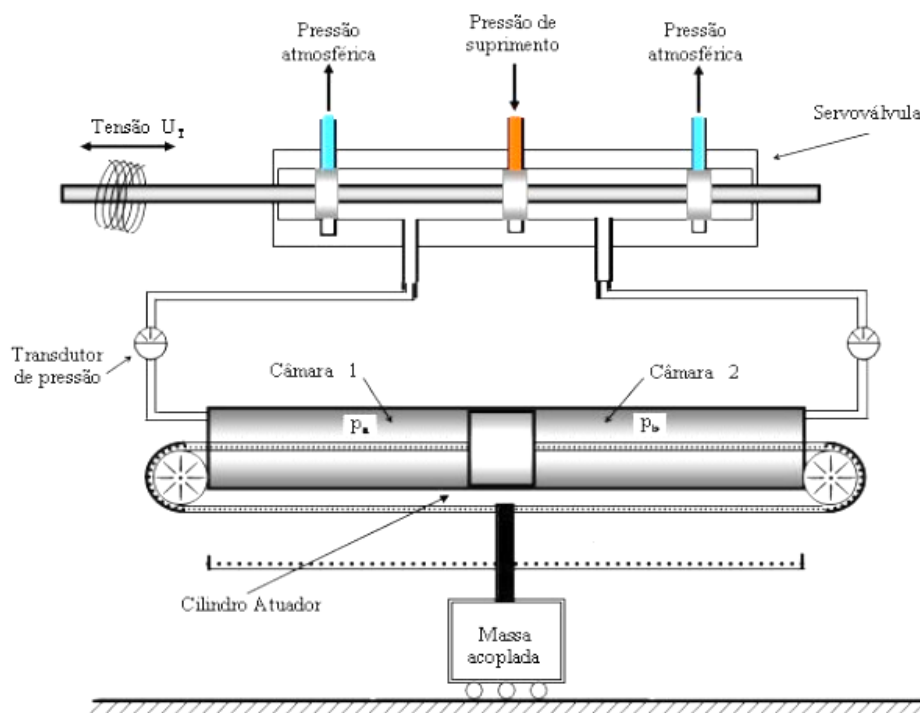


Figura 1: Desenho esquemático de um atuador pneumático

Fonte: Bavaresco [1].

O atuador pneumático é um sistema que permite posicionar uma carga em um determinado ponto do curso do atuador ou seguir uma trajetória variável em função do tempo.

Durante a operação, o ar comprimido é fornecido a servoválvula a uma dada pressão de suprimento regulada. Com o objetivo de seguir as referências e a partir dos sinais das malhas de realimentação, o controlador gera uma tensão de controle U_T , que energiza as bobinas dos solenoides da servoválvula e produz um deslocamento do carretel. O carretel, ao ser deslocado, gera orifícios de passagem, fornecendo o ar comprimido para uma das câmaras do cilindro e permitindo que o ar da outra escoe para a atmosfera [1]. Dessa forma, produz uma diferença de pressão nas câmaras do cilindro, que dá origem a uma força pneumática resultante que move o êmbolo do cilindro e gera um deslocamento positivo ou negativo, dependendo do sinal de entrada. A seguir tem-se a modelagem matemática do sistema proposto.

3. Modelagem Matemática do Atuador Pneumático

Neste trabalho utiliza-se um modelo não linear de 3º ordem proposto por Bavaresco [1] e descrito por um sistema de equações diferenciais, representado na forma de variáveis de estado:

$$\dot{y}_1 = y_2 \tag{1}$$

$$\dot{y}_2 = y_3 \tag{2}$$

$$\dot{y}_3 = -\omega_n^2 y_2 - 2\xi \omega_n y_3 + K_q \omega_n^2 U_T \tag{3}$$

onde $y_1 = y$ é a posição do êmbolo do atuador, $y_2 = \dot{y}$ é a velocidade, $y_3 = \ddot{y}$ é a aceleração, ω_n e ξ são respectivamente a frequência natural e a taxa de amortecimento do movimento do sistema, K_q é o ganho de velocidade da malha aberta e U_T é o sinal de controle em tensão aplicado a servoválvula. O ganho de velocidade em malha aberta pode ser calculado através da equação (4).

$$K_q = \frac{Q_n P_{atm}}{\frac{2}{3} p_s U_{Tmax}} \tag{4}$$

sendo Q_n a vazão volumétrica normal da válvula, P_{atm} a pressão atmosférica, p_s a pressão de suprimento e U_{Tmax} a tensão máxima de entrada na válvula.

A partir da modelagem matemática e dos valores dos parâmetros dimensionais do cilindro, pode-se calcular a frequência natural do cilindro e verificar os limites de uma região central do curso onde ela permanece praticamente constante. Fora desta região e próximo dos finais de curso há um acréscimo brusco da frequência natural [1].

A expressão geral para determinação da frequência natural de atuadores lineares é dado por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{A^2 \beta}{V_1 M} + \frac{A^2 \beta}{V_2 M}} = \sqrt{\frac{A^2 \beta}{M} \left(\frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \right)} \tag{5}$$

onde M é massa total acoplada do êmbolo do atuador, A é área da seção transversal do cilindro, V_1 e V_2 são respectivamente os volumes nas câmaras 1 e 2 e β é o fator de compressibilidade do ar dado por:

$$\beta = \frac{2}{3} \gamma p_s \tag{6}$$

onde γ é a relação entre os calores específicos do ar e p_s a pressão de suprimento.

O volume das câmaras depende da posição do êmbolo do atuador, dessa forma a expressão para representação da frequência natural em atuadores pneumáticos é descrita pela seguinte equação não linear:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2\gamma p_s}{3M} \left(\frac{A^2}{V_{A0} + Ay_1} + \frac{A^2}{V_{B0} - Ay_1} \right)} \tag{7}$$

onde V_{A0} e V_{B0} são os volumes mortos nas câmaras 1 e 2 respectivamente.

Na seção seguinte, apresentam-se os valores dos parâmetros do modelo matemático para um atuador pneumático, montado em uma bancada de testes no Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS) da UNIJUÍ Câmpus Panambi. Estes valores são utilizados nas simulações computacionais do modelo, cujos resultados são comparados com testes experimentais para validação.

4. Descrição da Bancada Experimental do Atuador Pneumático

Para os testes experimentais, utilizou-se uma bancada composta por um microcomputador interligado em uma placa dSPACE 1104 responsável pela captura e armazenagem dos dados, a qual utiliza a integração dos softwares Matlab/Simulink e ControlDesk. Uma servoválvula proporcional responsável pela vazão do ar e acionada por solenoides e um atuador pneumático simétrico e sem haste, acoplado em um sensor de posição, conforme mostrado na Figura 2:

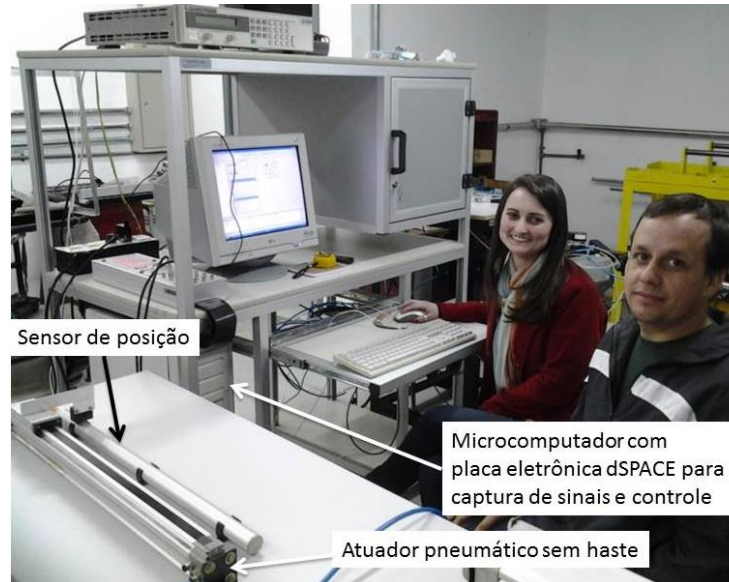


Figura 2- Fotografia da bancada experimental de testes

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do atuador pneumático para fins de utilização para simulação computacional, os quais foram obtidos através de medições e nos catálogos do fabricante.

Parâmetros	Valor	Unidade
γ	1,4	Adimensional
A	$4,91 \times 10^{-4}$	m^2
M	0,5	Kg
P_s	6×10^5	Pa
p_{atm}	1×10^5	Pa
V_{A0}	$1,25 \times 10^{-4}$	m^3
V_{B0}	$1,25 \times 10^{-4}$	m^3
L	0,5	M
ε	0,4	Adimensional
Q_n	0,012	m^3/s
U_{Tmax}	10	Volts

Tabela 1. Valores dos parâmetros do atuador pneumático

Após a determinação e identificação dos parâmetros do atuador pneumático, realizou-se a simulação computacional através da implementação do modelo matemático proposto na forma de um diagrama de blocos no software MatLab/Simulink, apresentado na seção seguinte.

5. Resultados

Apresentamos a seguir a simulação computacional da dinâmica do atuador pneumático e sua comparação com os testes experimentais. As simulações computacionais foram realizadas com o diagrama de blocos da Figura 3, utilizando-se o método de integração Runge Kutta de 4ª ordem com passo de integração de 1milisegundo igual ao tempo de amostragem na captura dos sinais dos testes experimentais.

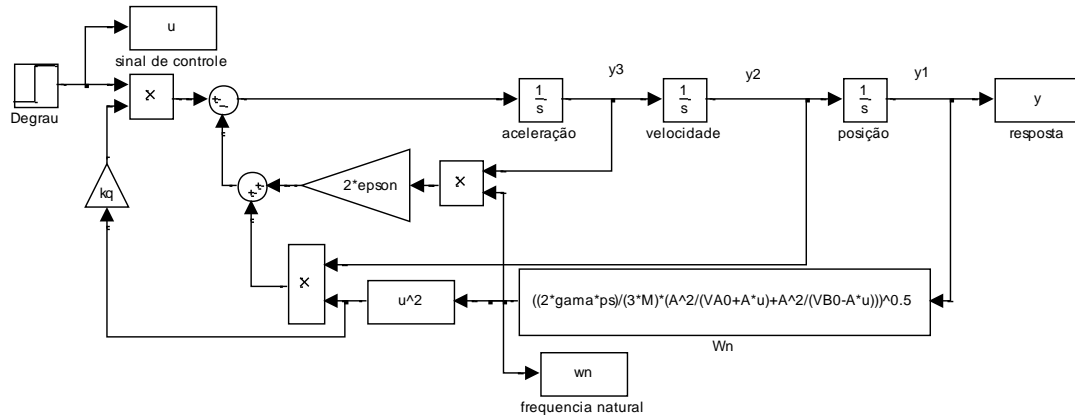


Figura 3: Diagrama de blocos utilizado nas simulações computacionais do modelo matemático de 3ª. ordem do atuador pneumático.

Foram realizadas diversas simulações computacionais e testes experimentais para vários sinais de controle. Como exemplo ilustrativo da validação experimental deste modelo matemático de 3ª. ordem, apresenta-se na Figura 4 os resultados para uma entrada em degrau de sinal de controle de 2 Volts, com a condição inicial do atuador pneumático na sua extremidade de curso (posição inicial recuado, $y = -0,25\text{m}$), e o comportamento dinâmico da resposta até atingir a posição máxima de avanço ($y = 0,25\text{m}$).

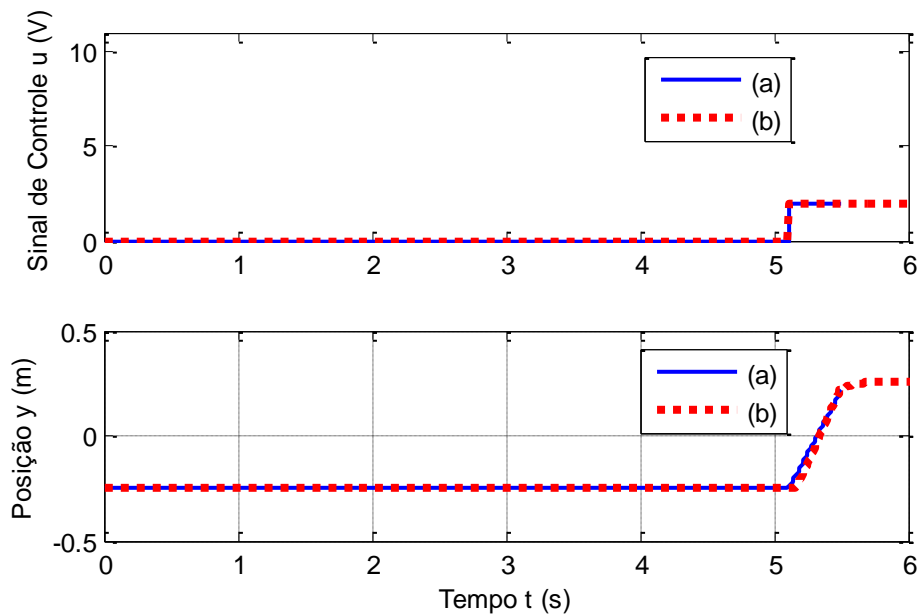


Figura 4: Gráfico comparativo de validação experimental do modelo de 3ª. ordem do atuador pneumático: (a) simulação computacional e (b) teste experimental.

6. Conclusão

Neste trabalho apresentou-se o modelo matemático de 3ª. ordem que representa a dinâmica do movimento de um atuador pneumático simétrico e sem haste, no qual a frequência natural é uma função linear dependente da posição do êmbolo do cilindro. A partir das simulações computacionais deste modelo matemático, utilizando-se os parâmetros de uma bancada de testes com atuador pneumático, foram obtidos resultados para validação com testes experimentais, sendo esta a principal contribuição deste trabalho. Os resultados ilustram as características do modelo utilizado.

7. Agradecimentos

Os autores são agradecidos ao CNPq pelo apoio na forma de bolsas de mestrado, à Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelas bolsas de iniciação científica e desenvolvimento tecnológico, à UNIJUÍ pelo apoio e incentivo na realização da pesquisa, além da infraestrutura do Núcleo de Inovação em Máquina Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS), implantado com recursos provenientes do SEBRAE e do FINEP/SEBRAE/MCT, num convênio de interação Universidades-Empresas do Arranjo Produtivo Local Metal-Mecânica, e modernizado recentemente com o apoio financeiro da CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) por meio de um projeto de pesquisa aplicada no âmbito do Programa de P&D da ANEEL.

Referências Bibliográficas

- [1] Bavaresco, D. (2007). Modelagem matemática e controle de um atuador pneumático. 2007. 107f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- [2] Bollmann, A. (1997). Fundamentos da Automação Industrial Pneumática. Projeto de Comandos Binários Eletropneumáticos. São Paulo: Associação Brasileira de Hidráulica e Pneumática, 1997.
- [3] Morgado, F. D. J. (2011). Modelagem e Controle de Músculo Pneumático. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- [4] Ritter, C. S. (2010). Modelagem matemática das características não lineares de atuadores pneumáticos. 2010. 90f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí.
- [5] Wang, L and Li, I-Hsum. (2010). A Fourier Series-based Adaptive Silding-Mode Controller for Nonlinear Pneumatic Servo Systems. IEEE International Conference on Control Applications.
- [6] Weickgenannt, M; Zimmert, N; Klumpp, S. and Sawodny, O. (2010). Application of SDRE Control to Servopneumatic Drives. IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1725 – 1730.