

DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO ACIONADO PNEUMATICAMENTE¹

*Pedro Luís Andrighetto²
Antonio Carlos Valdiero³
Leonardo Carlotto⁴
Ibson Ivan Harter⁵*

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados obtidos na pesquisa e desenvolvimento de um manipulador robótico com dois graus de liberdade acionado pneumaticamente. Embora este tipo de acionamento tenha várias vantagens, há muitas dificuldades de controle de atuadores pneumáticos causadas pela compressibilidade do ar e pelo atrito em suas vedações. Atualmente o desenvolvimento de servoválvulas pneumáticas e de técnicas de controle trouxe novas possibilidades de aplicação de acionamentos pneumáticos em robôs industriais. Neste trabalho, descreve-se o desenvolvimento de uma concepção para o manipulador robótico, o resultado do cálculo das tensões e deformações na estrutura, o detalhamento do projeto, a especificação dos componentes do mecanismo, do sistema pneumático e do sistema de controle, a construção do protótipo e a realização de testes de funcionamento. Nos testes experimentais foi utilizado um controlador proporcional para seguimento de trajetória nas juntas do robô, obtendo resultados limitados. Para atingir bom desempenho, é necessário o uso de bons modelos matemáticos, representando adequadamente as não linearidades inerentes a este sistema, inclusive com a compensação do atrito nos atuadores pneumáticos. Este trabalho apresenta o primeiro robô pneumático construído e testado no Brasil, com grande potencialidade de aplicação industrial, em tarefas como soldagem e manuseio de materiais, inclusive na siderurgia e metalurgia. Uma das dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho é o reduzido número de trabalhos sobre robôs pneumáticos na literatura.

Palavras-chave: Robótica; Robôs pneumáticos; Pneumática; Servopneumática.

¹ Trabalho a ser apresentado no IX Seminário de Automação e Processos – Sistemas de Manipulação - Robótica, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curitiba PR, 05 a 07 de outubro de 2005.

² Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia Mecânica, professor da UNIJUÍ.

³ Engenheiro Mecânico e Doutor em Engenharia Mecânica, professor da UNIJUÍ.

⁴ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica da UNIJUÍ, Bolsista PIBIC – CNPq.

⁵ Engenheiro Mecânico, Bruning Tecnometal SA.

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos na pesquisa e desenvolvimento de um manipulador robótico com dois graus de liberdade e acionado pneumáticamente. Os acionamentos pneumáticos tipicamente são reservados para manipuladores menores, usados em aplicações de simples transporte de material (do tipo manipulador de seqüência fixa), onde a seqüência de movimentos não pode ser alterada sem realizar modificações na sua estrutura mecânica ou no seu sistema de controle. Isto é determinado pelas dificuldades de controle de atuadores pneumáticos causadas pela compressibilidade do ar e pelo atrito em suas vedações.⁽¹⁾ Atualmente, com o desenvolvimento de servoválvulas pneumáticas e de técnicas de controle, os acionamentos pneumáticos surgem como uma possibilidade de aplicação em robôs mais sofisticados.

O uso da pneumática no acionamento de robôs industriais tem como vantagens: o ar comprimido é limpo, facilmente disponível na maioria das instalações industriais e usa componentes com custo relativamente baixo em relação aos acionamentos elétricos e hidráulicos. Também possui manutenção fácil, boa relação peso/potência, rápida atuação com altas acelerações e flexibilidade de instalação. Os acionamentos elétricos usam servomotores ou motores de passo e são os mais comuns nos robôs disponíveis comercialmente na atualidade. Em contraste com os acionamentos elétricos, o acionamento servopneumático é do tipo direto, permitindo eliminar motores pesados com sistemas complexos de transmissão por engrenagens.⁽²⁾ O acionamento elétrico também é caro, devido ao alto custo dos servomotores que acionam as juntas do robô.

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho envolve a concepção de um manipulador robótico que permita flexibilidade na realização de testes, o cálculo das tensões e deformações na estrutura, o detalhamento do projeto, a especificação dos componentes do mecanismo, do acionamento pneumático e do sistema de controle, a construção do protótipo e a realização de testes de funcionamento.

Para a modelagem cinemática utilizou-se a convenção de Denavit-Hartenberg. Através desta modelagem, obtêm-se as relações matemáticas entre as posições de junta do robô e a posição do efetuador final no espaço operacional, necessárias para realizar o planejamento da trajetória desejada e a implementação do controle do robô.

ESCOLHA DE UMA CONCEPÇÃO PARA O MANIPULADOR PNEUMÁTICO

O desenvolvimento da concepção para o manipulador pneumático iniciou a partir da análise das concepções apresentadas por outros autores nos poucos trabalhos disponíveis sobre o assunto. Bobrow e Mcdonell⁽³⁾ apresentam um robô pneumático com três graus de liberdade, com juntas rotativas acionadas por atuadores pneumáticos lineares de haste dupla através de cabos de aço. Também apresentam resultados dos testes de seguimento de trajetória e controle de força no efetuador. Guoliang e Xuanyin⁽¹⁾ desenvolveram um robô com três graus de liberdade, na configuração cartesiana, com controle com compensação de atrito.

A concepção para o manipulador pneumático com dois graus de liberdade apresentada neste trabalho (Figura 1) foi desenvolvida partindo-se de uma estrutura cinemática antropomórfica de dois graus de liberdade com ambas as juntas rotativas, acionadas por dois cilindros pneumáticos de dupla ação, adaptando-se os resultados apresentados por Valdiero, Guenther e De Pieri⁽⁴⁾ para um manipulador

hidráulico. A posição angular de cada junta é medida por encoders incrementais. Também foram considerados como requisitos na definição da concepção o baixo custo de construção e dos materiais, a possibilidade de trabalho num plano horizontal ou vertical e o uso de atuadores pneumáticos disponíveis no Laboratório de Automação Industrial da UNIJUÍ.

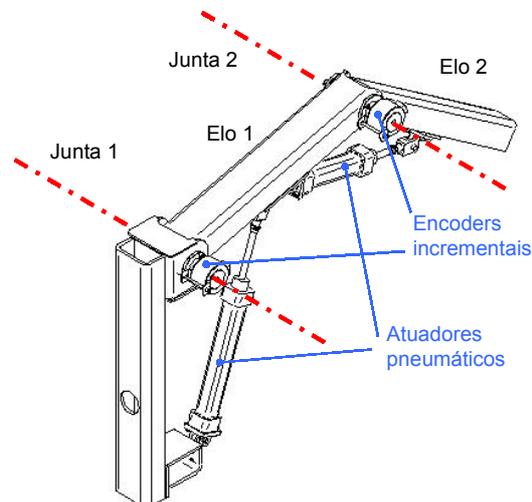


Figura 1. Desenho de conjunto do manipulador pneumático.

O manipulador foi projetado para montagem em uma bancada de estrutura soldada em cantoneiras, que permite a mudança de plano de trabalho e serve de suporte para os demais componentes pneumáticos, compressor de ar e microcomputador de controle.

TENSÕES E DEFORMAÇÕES NA ESTRUTURA DO MANIPULADOR

O dimensionamento estrutural dos elos e das juntas do manipulador pneumático foi realizado através do método numérico dos elementos finitos para o cálculo das tensões e deformações, usando-se o software Nastran. Foi simulada uma carga vertical de 7,5 kg na extremidade do manipulador, com as hastes dos atuadores pneumáticos totalmente estendidas. A maior tensão calculada foi de 118 MPa, situada dentro da faixa de tensões admissíveis para o aço SAE 1020. A maior deformação calculada é 0,089 mm. A Figura 2 ilustra o resultado do cálculo das deformações.

DETALHAMENTO E CONSTRUÇÃO DO MANIPULADOR

A Figura 3 mostra um desenho de conjunto do manipulador robótico e da bancada. Os elos são formados por tubos de aço SAE 1020. As juntas têm a finalidade de permitir os movimentos radiais dos elos e são compostas por um eixo montado em mancais com rolamentos de esferas de contato angular, para permitir a manipulação no plano horizontal.

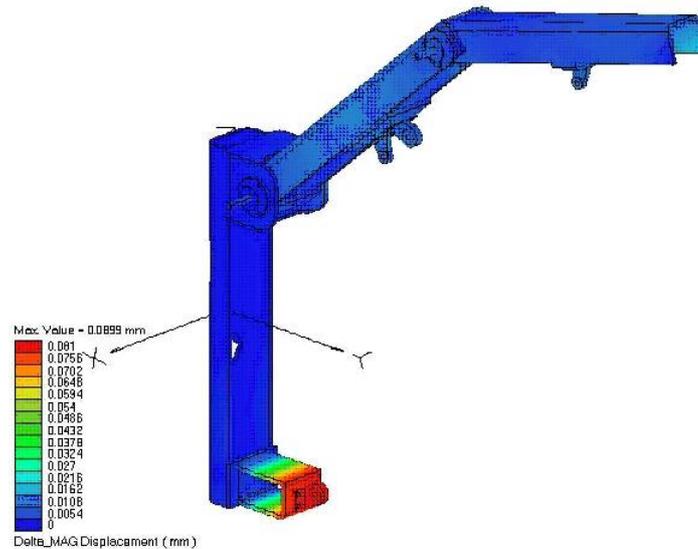


Figura 2. Resultado do cálculo de deformações pelo método dos elementos finitos.

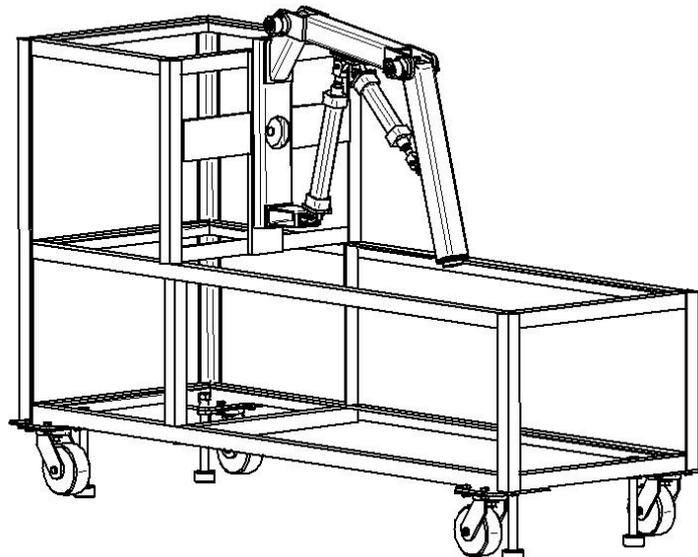


Figura 3. Desenho de conjunto do manipulador robótico.

A Figura 4 apresenta uma vista lateral do manipulador robótico com a identificação dos parâmetros de localização dos atuadores pneumáticos em relação ao sistema de referência. Eles são descritos na Tabela 1, juntamente com as características principais dos cilindros pneumáticos. Tais parâmetros são necessários para calcular as relações cinemáticas entre os deslocamentos lineares das hastes dos atuadores e as rotações dos elos, que podem ser encontradas em Valdiero.⁽⁵⁾ O modelo cinemático é necessário no planejamento das trajetórias desejadas e no controle do robô, sendo também importante em caso de simulações computacionais.

Os cilindros pneumáticos são acionados por servoválvulas Festo código MPYE - 5 -1/8. As pressões nas câmaras dos atuadores pneumáticos são medidas por sensores de pressão marca Gefran, código TKG E 1M 1D M, com faixa de medição de 0 a 10 bar. A rotação das juntas é medida por encoders incrementais marca Hohner, código 7510-0622-0500, com 500 pulsos por rotação.

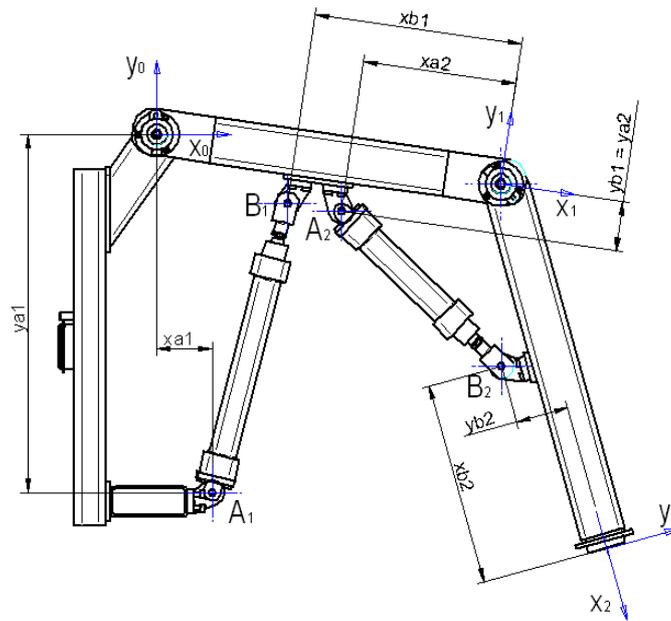


Figura 4. Identificação dos parâmetros de localização dos atuadores pneumáticos baseada nos sistemas de referência da Convenção de Denavit-Hartenberg.

Tabela 1. Parâmetros de localização e características dos atuadores pneumáticos.

Parâmetro	Atuador 1	Atuador 2
Posição do ponto a_i	$x_{a1} = 0,072$ m $y_{a1} = -0,467$ m	$x_{a2} = -0,200$ m $y_{a2} = -0,065$ m
Posição do ponto b_i	$x_{b1} = -0,270$ m $y_{b1} = -0,065$ m	$x_{b2} = -0,265$ m $y_{b2} = -0,068$ m
Distância entre os pontos a_i e b_i para o êmbolo posicionado no meio do curso	$l_{ab1} = 0,400$ m	$l_{ab2} = 0,340$ m
Fabricante	Norgren	Norgren
Código	RA/8032/M/200/C	RA/8032/M/100/C
Curso (mm)	200	100
Diâmetro (mm)	32	32

A Figura 5 permite visualizar o volume de trabalho do robô configurado para manipulação no plano vertical, com os atuadores completamente retraídos e estendidos. O volume de trabalho é definido como o conjunto de todos os pontos do efetuador final que podem ser manipulados durante a sua movimentação.

O sistema de aquisição e controle usado é montado em um microcomputador PC e é formado por uma placa dSPACE DS1102, integrada ao software Simulink/Matlab, responsável pela medição da posição angular das juntas, medição da pressão nas câmaras dos atuadores pneumáticos, implementação do algoritmo de controle e geração dos sinais de controle das servoválvulas pneumáticas. A Figura 6 mostra a configuração do sistema de aquisição e controle ligado ao sistema pneumático.

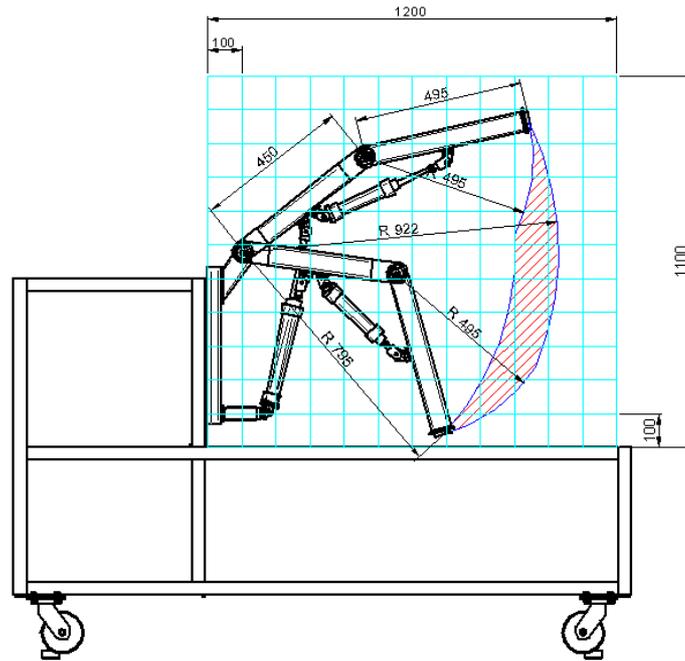


Figura 5. Volume de trabalho.

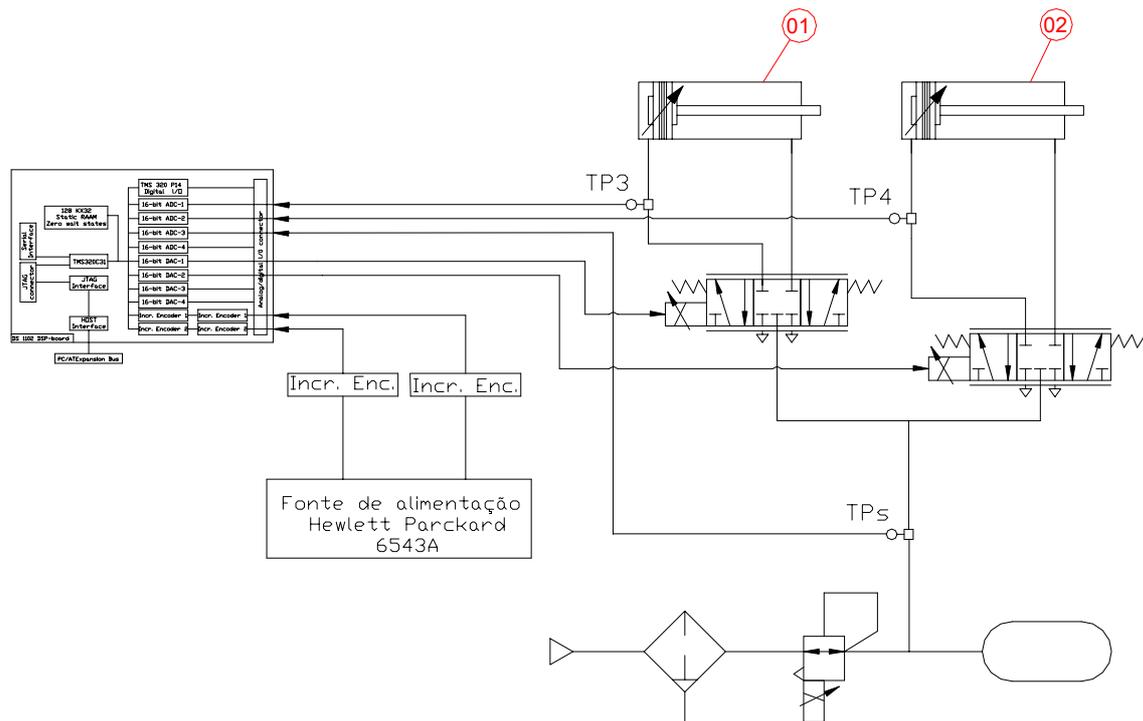


Figura 6. Sistema de aquisição e controle.

CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E TESTES DE FUNCIONAMENTO

O protótipo construído (Figura 7) a partir do projeto detalhado foi submetido a diversos testes de funcionamento, com a configuração de trabalho no plano horizontal (semelhante a um manipulador SCARA). Nesta configuração, as juntas do manipulador não sofrem a ação de torques gravitacionais devido ao peso dos elos.



Figura 7. Protótipo do manipulador pneumático configurado para trabalho no plano horizontal.

Os testes de funcionamento foram realizados à pressão de 6,0 bar e com a placa DS1102 configurada com uma taxa de amostragem de 1 ms e taxa de aquisição de 10 ms. Através de interpolação realizada pela placa DS1102, o número de pulsos por rotação dos encoders foi ampliado para 2000.

O primeiro teste do manipulador foi realizado em malha aberta, onde a abertura das válvulas foi limitada a 15 %, a partir do comando de um sinal senoidal com período de 50 s. Os resultados deste teste são visualizados na Figura 8.

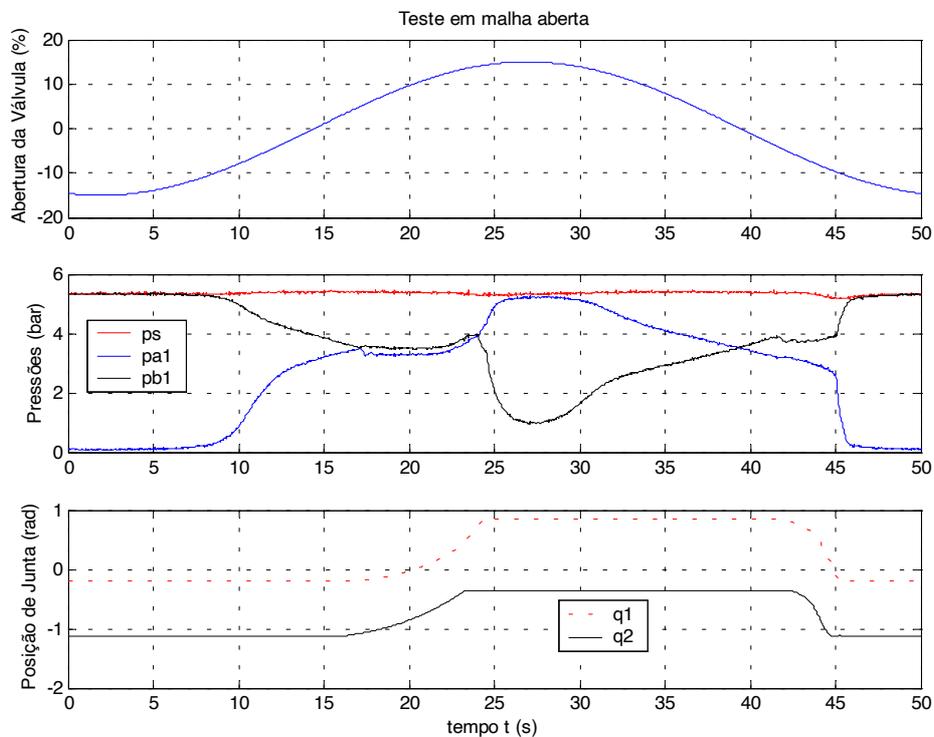


Figura 8. Teste em malha aberta.

O segundo teste foi realizado em malha fechada com controlador proporcional (P), onde o manipulador segue uma trajetória programada obedecendo uma curva

polinomial, seguida de uma parada e finalizada com uma senóide. Os testes foram realizados com ganho proporcional variando de 1,0 a 12,0, quando neste ganho o sistema demonstrou instabilidade. A Figura 9 ilustra a trajetória realizada com um ganho 7,0 nas duas juntas, juntamente com a trajetória desejada.

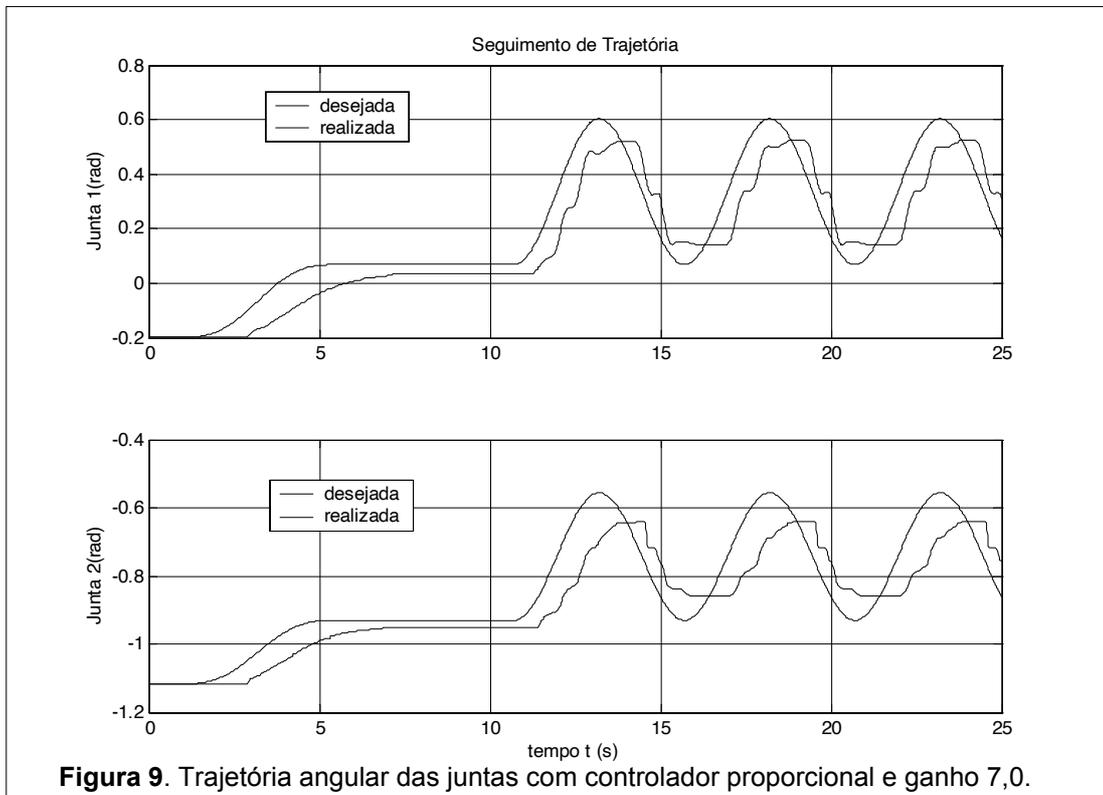


Figura 9. Trajetória angular das juntas com controlador proporcional e ganho 7,0.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES

A análise dos resultados obtidos com os testes do controlador proporcional no manipulador pneumático permite concluir que as juntas movimentam-se de maneira suave para ganhos menores, mas com erro e atraso de posicionamento maiores. Aumentando-se o ganho, diminui-se o erro e o atraso, mas o sistema começa a ficar oscilatório, conforme visualizado na Figura 9. Verifica-se também que o sinal de controle tem comportamento oscilatório, proveniente do atrito nos atuadores e da compressibilidade do ar.

O controlador proporcional não se mostra adequado para o controle preciso de atuadores pneumáticos, reforçando resultados anteriores.⁽⁶⁾ Segundo Bobrow e Mcdonell,⁽³⁾ a melhor forma de obter alto desempenho em servopneumática é a utilização de bons modelos matemáticos, representando adequadamente as não linearidades inerentes a este sistema. Guoliang e Xuanyin⁽¹⁾ citam a necessidade de compensação do atrito na servopneumática, principalmente em baixas velocidades. Nesta linha de ação, os autores já vem pesquisando o atrito em atuadores pneumáticos,⁽⁷⁾ visando a compensação de atrito e o uso de modelos e controladores mais sofisticados no controle de robôs pneumáticos, como o controlador em cascata apresentado por Perondi.⁽⁸⁾

CONCLUSÃO

A partir da construção e testes do robô pneumático aqui descrito, conclui-se que o controlador proporcional tem desempenho limitado no controle de atuadores pneumáticos. A melhora do desempenho pode ser conseguida usando-se modelos matemáticos que representam melhor as não linearidades típicas dos acionamentos servopneumáticos, aliados à compensação do atrito em controladores mais sofisticados, como o controlador em cascata.

A servopneumática é uma técnica de acionamento mais barata, onde o componente mais caro é a servoválvula, mas com dificuldades maiores de controle. A aplicação de novos controladores poderá permitir que os atuadores pneumáticos rivalizem em desempenho com os atuadores elétricos em certas aplicações.

Com este trabalho, os autores pretendem colaborar para aumentar as aplicações da servopneumática e da robótica. Este trabalho apresenta o primeiro robô pneumático construído e testado no Brasil, com grande potencialidade de aplicação industrial, em tarefas como soldagem, corte a plasma e manuseio de peças e ferramentas. Uma das dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho é o reduzido número de trabalhos sobre robôs pneumáticos na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 GUOLIANG, T., XUANYIN, W. Research on pneumatic-servo calligraphy robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUID POWER TRANSMISSION AND CONTROL, 5., 2003, China. **Anais...** China: International Academic Publishers, 2003. p. 219-222.
- 2 LIU, S.; BOBROW, J. E. An analysis of a pneumatic servo system and its application to a computer-controlled robot. **Transactions of the ASME – Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 110, p. 228-235, Sep. 1988.
- 3 BOBROW, J.E.; MCDONELL, B.W. Modeling, identification, and control of a pneumatically actuated, force controllable robot. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 14, n.5, p. 732-742, Oct. 1998.
- 4 VALDIERO, A. C.; GUENTHER, R.; DE PIERI, E. R. Controle de manipuladores robóticos acionados hidraulicamente. In: SEMINÁRIO DE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS, 7., 2003, Santos. **Anais...** São Paulo: ABM, 2003.
- 5 VALDIERO, A. C. **Controle de robôs hidráulicos com compensação do atrito**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- 6 ANDRIGHETTO, P.L.; VALDIERO, A.C.; VINCENSY, C.N. Experimental comparisons of the control solutions for pneumatic servo actuators. In: COBEM 2003 - BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABCM, 2003. 1 CD.
- 7 VALDIERO, A. C.; ANDRIGHETTO, P. L.; CARLOTTO, L. Dynamic modeling and friction parameters estimation to pneumatic actuators. In: MUSME 2005, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MULTIBODY SYSTEMS AND MECHATRONICS, 2005, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: ABCM, 2005. 1 CD. Guoliang e Xuanyin, 2003.
- 8 PERONDI, E. A. **Controle não-linear em cascata de um servoposicionador pneumático com compensação do atrito**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

DEVELOPMENT OF A ROBOTIC MANIPULATOR WITH PNEUMATIC SERVO DRIVE

*Pedro Luís Andrighetto
Antonio Carlos Valdiero
Leonardo Carlotto
Ibson Ivan Harter*

Abstract

This paper presents the obtained results in research and development of a two degree of freedom robotic manipulator with pneumatic servo drive. Although this drive type has many advantages, pneumatic cylinders have many control difficulties caused by air compressibility and friction and actuator seals. Today the development of pneumatic servo valves and control techniques has brought new application possibilities to pneumatic servo drives in industrial robots. This work depicts the development of a conception to robotic manipulator and calculated stresses and deformations of its structure. Also the mechanism parts are specified together pneumatic and control systems. A prototype was built and tested. As experimental results, a proportional controller was tested with limited performance. To attain good performance, it is necessary to use good mathematical models, that represent in a appropriated form the typical pneumatic non-linearities, with actuator friction compensation. This paper presents the first pneumatic robot built and tested in Brazil. It has big possibilities of industrial application as welding, food industry and material manipulation. Among the faced difficulties, can be cited the lack of other works covering pneumatic robots in the current literature.

Key-words: Robotics; Pneumatic robots; Pneumatics; Pneumatic servo systems.