

PROJETO E MODELAGEM DE UM BRAÇO ROBÓTICO ACIONADO POR ATUADORES PNEUMÁTICOS

Claudio da Silva dos Santos, prof.claudiosant@hotmail.com¹
Sandra Edinara Baratto Vicelli, Sandra_edinara@hotmail.com¹
Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹
Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹
Djonatan Ritter, djo_ritter@hotmail.com¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, DECEEng/UNIJUÍ/Câmpus Panambi/Caixa Postal 121/CEP 98290-000, Panambi-RS, Brasil

Resumo: O presente trabalho trata do projeto e modelagem de um braço robótico acionado por atuadores pneumáticos. O braço robótico tem grande potencial de aplicações nas indústrias e em equipamentos agro-florestais para manuseio de peças ou posicionamento de ferramentas. A utilização de atuadores pneumáticos tem as vantagens de baixo custo, alta relação potência por tamanho, flexibilidade de instalação, são limpos e não poluem o meio ambiente. Entretanto, os atuadores pneumáticos possuem diversas não linearidades tais como a zona morta na servoválvula, a compressibilidade do ar e o atrito causado pelas vedações nas partes móveis, que aliadas ao acoplamento dinâmico entre as variáveis de junta do robô dificultam sua modelagem e controle preciso. O braço robótico projetado possui dois graus de liberdade com juntas rotativas acionadas por atuadores diferenciais. Para fins de modelagem e de compensação no controle, é realizada a identificação experimental das características não lineares do atrito. O objetivo principal é a validação experimental do comportamento do robô pneumático projetado. Para a aquisição de sinais e controle, utiliza-se uma placa eletrônica dSPACE e o processamento dos resultados é realizado com o auxílio da ferramenta computacional MatLab. Como resultados têm-se a modelagem matemática das principais características não lineares do braço robótico. Estas características causam efeitos danosos ao controle, tais como os fenômenos chamados de adere-desliza (*stick-slip*), as oscilações em torno da posição desejada, a perda do movimento e os erros nas inversões de movimentos. Pretende-se assim, contribuir para o desenvolvimento de soluções robotizadas com acionamento pneumático para problemas da indústria e agro-industriais. Esta pesquisa contou com o apoio da CELPE no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, da FAPERGS e do CNPq.

Palavras-chave: Rôbo Pneumático, Modelagem Matemática, Testes Experimentais

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do projeto e modelagem de um braço robótico acionado por atuadores pneumáticos, incluindo-se a modelagem e identificação do atrito dinâmico nos atuadores. O braço robótico tem grande potencial de aplicações nas indústrias (Valdiero, 2012) e em equipamentos agrícolas e agro-florestais para manuseio de peças ou posicionamento de ferramentas (Dandan *et al.*, 2013). A utilização de atuadores pneumáticos tem as vantagens de baixo custo, alta relação potência por tamanho, flexibilidade de instalação, são limpos e não poluem o meio ambiente (Pradipta *et al.*, 2013; Abry *et al.*, 2013; Riachy *et al.*, 2013). Entretanto, os atuadores pneumáticos possuem diversas não linearidades tais como a zona morta na servoválvula, a compressibilidade do ar e o atrito causado pelas vedações nas partes móveis, que aliadas ao acoplamento dinâmico entre as variáveis de junta do robô dificultam sua modelagem e controle preciso (Ritter, 2010). De modo geral, a modelagem e a compensação de atrito tem se constituído como um desafio importante para o desempenho de sistemas mecatrônicos e envolve aspectos de teoria de controle, tribologia e projeto de máquinas (Canudas *et al.*, 1995).

Na literatura recente pode-se citar os trabalhos (Pradipta *et al.*, 2013; Abry *et al.*, 2013; Riachy *et al.*, 2013; Dandan *et al.*, 2013) que trataram com relevância as características não lineares de atuadores pneumáticos e que foram objeto de estudo de diversos pesquisadores (Bavaresco, 2007; Ritter, 2010). Entre estas características não lineares, destaca-se o atrito, o qual está presente nos sistemas mecatrônicos que apresentam movimentos relativos e ele pode causar erros em regime permanente de controle de posição e atrasos no seguimento, podendo inclusive causar efeitos danosos ao desempenho e até mesmo provocar a instabilidade do sistema. Valdiero (2012) apresenta vários efeitos de degradação do desempenho do movimento causados pelas características não lineares do atrito. Alguns destes efeitos são chamados de adere-desliza (*stick-slip*), *hunting*, perda de movimento (*standstill*) e *quadrature glitch*. A expressão adere-desliza

(*stick-slip*) refere-se a uma alternância entre o movimento de deslizamento e o repouso, sendo definido como um ciclo limite estável surgido durante o movimento e que é mais comum quando é utilizado o controle integral. O fenômeno *hunting* diz respeito também a um limite associado ao controle integral, mas que ocorre quando o movimento oscila em torno de uma dada posição desejada de valor constante, acontece com controle de realimentação e não é possível em sistemas passivos. A perda de movimento (*standstill*) relaciona-se ao efeito de atrito que ocorre quando o sistema é detido no repouso por um intervalo de tempo ao passar pela velocidade nula. E o termo *quadrature glitch* refere-se ao erro de seguimento num movimento de múltiplos eixos.

A seção seguinte descreve o protótipo da bancada do robô pneumático construído e a seção 3 apresenta o modelo dinâmico desenvolvido para fins de simulação e controle. Na seção 4 tem-se a identificação experimental das características não lineares do atrito nos atuadores pneumáticos utilizados no robô. E na seção 5 estão ilustrados os resultados de testes experimentais em malha aberta que foram utilizados para determinação dos valores de parâmetros do modelo dinâmico. Por fim, apresentam-se as conclusões e perspectivas futuras.

2. DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL DO BRAÇO ROBÓTICO PNEUMÁTICO

O braço robótico desenvolvido neste trabalho é do tipo SCARA com dois graus de liberdade e acionamento pneumático, conforme mostrado na Fig. 2 (c) do protótipo e na Fig. 3 (desenho do braço do robô). Para o acionamento pneumático é utilizado dois atuadores pneumáticos de haste simples e dupla ação, ou seja de avanço e recuo, sendo os mesmos responsáveis pelo movimento do braço robótico. O atuador 1 utilizado no movimento da junta um do braço possui curso de 200mm e o atuador 2 responsável pelo deslocamento da junta dois possui curso de 160mm. As hastes estão conectadas ao êmbolo, que através do sinal de controle enviado por uma servoválvula permite posicionar o braço em um determinado curso dos cilindros ou seguir uma variável em função do tempo. As especificações técnicas do acionamento pneumático estão descritas na Tab. 1.

Tabela 1 – Especificação técnica da servoválvula e cilindros

Descrição do Componente	Fabricante	Código	Especificações
Servoválvula de Controle Direcional	Festo	MPYE-5-1/8-HF-010B	5 vias e 3 posições Vazão = 700 L/min
Cilindro Pneumático	Festo	DCN-80-200-PPV	Curso = 0,2 m
Cilindro Pneumático	Festo	DCN-80-160-PPV	Curso = 0,16 m

Os atuadores pneumáticos funcionam com o ar comprimido que é enviado pela servoválvula com certa pressão de suprimento (p_s) devidamente ajustada, conforme desenho esquemático apresentado na Fig. 1.

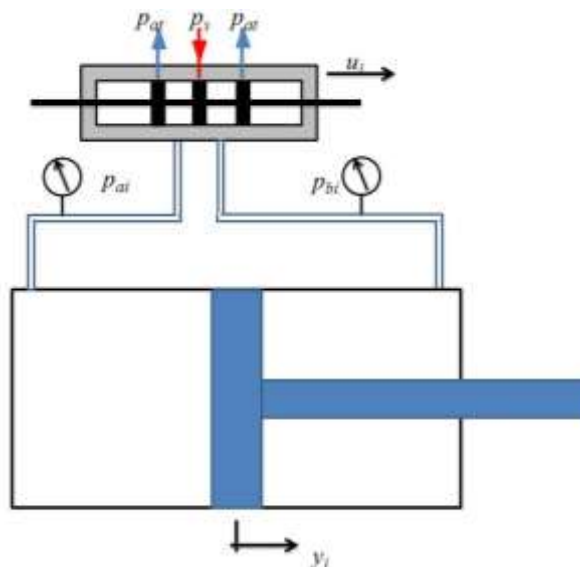


Figura1. Desenho esquemático de um servoposicionador pneumático linear.

Inicialmente, o sinal de controle u_i energiza o solenoide da válvula de modo que uma força magnética resultante é aplicada no carretel da válvula, produzindo o deslocamento do carretel. O deslocamento do mesmo abre o orifício de controle para que uma câmara do atuador linear seja ligada a linha de pressão de suprimento e a outra seja ligada à pressão atmosférica (p_{atm}). Desta forma, produzindo uma diferença de pressão nas câmaras do atuador linear, dando

origem a uma força resultante movendo o elo do braço robótico que está preso ao atuador, em deslocamento no sentido positivo ou negativo y_i , conectado diretamente ao sinal de entrada. A força produzida pelo atuador pneumático é dada pelo produto da área do êmbolo do atuador pela diferença de pressão nas câmaras e é chamada de força pneumática.

A bancada experimental de testes utilizada é composta por um microcomputador responsável pela visualização dos dados e interface com o operador. A este está conectada uma placa eletrônica dSPACE 1104 responsável pela captura e armazenagem dos dados da bancada de testes, a qual utiliza a integração dos softwares Matlab/Simulink e ControlDesk permitindo a captura, controle e manipulação dos dados em tempo real através da construção de uma interface gráfica, o que possibilita a análise detalhada dos resultados obtidos. Esta placa eletrônica dSPACE realiza a captura dos valores das pressões medidas pelos os sensores de pressão, nas câmaras a e b dos atuadores, assim como a pressão de suprimento, assim como dos sensores de deslocamento angular (encoder incremental).

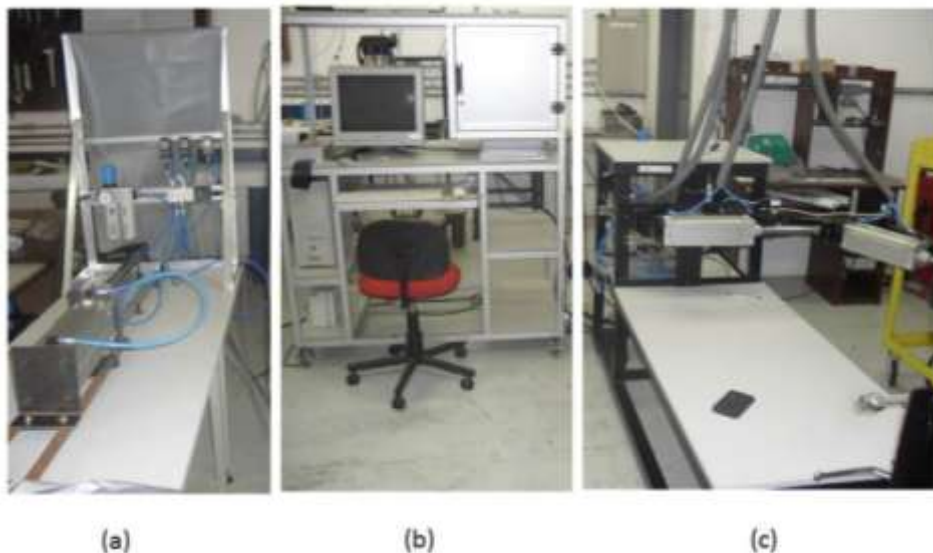


Figura2. Fotografia da bancada de aquisição de dados experimentais: (a) bancada para identificação do atrito; (b) microcomputador com placa eletrônica dSPACE e (c) Protótipo do braço robótico.

Os parâmetros do atrito foram obtidos utilizando a bancada mostrada na Fig. 2(a) e os testes experimentais realizados com o manipulador robótico na bancada experimental mostrada na Fig. 2(c).

3. MODELAGEM DE UM ROBÔ COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO

Este trabalho apresenta a modelagem dinâmica de um manipulador acionado por atuadores pneumáticos. A formulação do modelo dinâmico se faz necessário para realização da simulação computacional, de análise do desempenho e de algoritmos de controle. O modelo dinâmico do robô com dois graus de liberdade de elos rígidos não considerando a dinâmica do atuador pneumático. O modelo explicitado apresenta a equações que relacionam os torques gerados nas juntas e o movimento da estrutura. As equações dinâmicas do movimento são obtidas a partir das formulações de Lagrange que encontram-se desenvolvidas no trabalho de (Sciavicco e Siciliano, 1996) que fazem o detalhamento dessas equações.

Ao se considerar o robô antropomórfico com dois graus de liberdade e ignorando as forças do efetuador bem como a variabilidade do atrito na estrutura, encontramos um modelo dinâmico no espaço de juntas por meio da formulação de Lagrange e escrevemos em forma matricial representado através da Eq. (1):

$$H(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (1)$$

onde $\theta \in R^n$ é o vetor de coordenadas das juntas; $H(\theta) \in R^{n \times n}$ é a matriz de inércia simétrica, definida positiva e em geral dependente da configuração; $C(\theta, \dot{\theta}) \in R^{n \times n}$ é a matriz que representa os efeitos centrífugos e de Coriolis; $G(\theta) \in R^n$ é o vetor que representa o momento gerado em cada eixo de junta do manipulador devido a presença da gravidade; $\tau \in R^n$ é o vetor de torques do movimento das juntas.

Neste caso o vetor de torques τ é aplicado por atuadores pneumáticos os quais dispõem de dinâmicas específicas devido a complexidade desse sistema. Desta forma o comportamento dinâmico do mecanismo do robô acionado pneumáticamente pode ser representado por equações do equilíbrio dinâmico e da dinâmica do atrito. Nessa perspectiva são descritas as matrizes e os parâmetros para descrever o mecanismo do robô utilizado na bancada experimental conforme (Valdiero 2012).

$${}^*(\theta)\ddot{\theta} + C^*(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \tau_{atr}(\theta, \dot{\theta}, z_{atr}, \dot{z}_{atr}) + G^*(\theta) = \bar{J}^T f_p \quad (2)$$

$$\dot{z}_{atr} = h_{atr}(\theta, \dot{\theta}, z_{atr}) \quad (3)$$

$$\dot{f}_p = f_q(\theta, \dot{\theta}) + g_u(\theta, p_a, p_b, u) \quad (4)$$

onde $\tau_{atr}(\theta, \dot{\theta}, z_{atr}, \dot{z}_{atr}) = \bar{J}^T f_{atr}$ é o vetor de torques devido à força de atrito nos atuadores, dependente das posições e velocidades das juntas e da dinâmica das micro deformações das rugosidades.

O modelo dinâmico do manipulador acionado pneumaticamente, incluindo a dinâmica do atrito, é descrito pelo conjunto de equações não lineares de quinta ordem e pode ser representado pelo vetor de estado $[\theta \ \dot{\theta} \ z_{atr} \ p_a \ p_b]^T$.

Em seguida temos a matriz de inércia modificada $H^*(\theta) = [H(\theta) + \bar{J}^T M \bar{J}]$ que é constituída pela matriz de inércia $H(\theta)$ do manipulador rígido e pela parcela de inércia dos atuadores $(\bar{J}^T M \bar{J})$, cujas matrizes são:

$$H(\theta) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H_{11} = I_{l1} + m_{l1}l_1^2 + I_{l2} + m_{l2}(a_1^2 + l_2^2 + 2a_1l_2 \cos(\theta_2)) + m(a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_2)) \quad (6)$$

$$H_{12} = I_{l2} + m_{l2}(l_2^2 + a_1l_2 \cos(\theta_2)) + m(a_2^2 + a_1a_2 \cos(\theta_2)) \quad (7)$$

$$H_{21} = H_{12} \quad (8)$$

$$H_{22} = I_{l2} + m_{l2}l_2^2 + ma_2^2 \quad (9)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Os elos possuem respectivamente as massas m_{l1} e m_{l2} , cujas posições dos centros de massa são dadas por l_1 e l_2 , além de possuírem os valores I_{l1} e I_{l2} como momentos de inércias em relação aos respectivos centros de massa. M_1 e M_2 são as massas inerciais deslocadas nos atuadores 1 e 2. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros inerciais.

Tabela 2 –Parâmetros inerciais do manipulador robótico acionado pneumaticamente.

Inércia do robô	Elo 1	Elo 2
Massa do elo i (m_{li})	$m_{l1}=3,96$	$m_{l2}=3,96$
Distância do centro de massa do elo i até o eixo de sua junta (l_i)	$l_1=0,223$	$l_2=0,252$
Momento de inércia do elo i (I_{li}) em relação ao centro de massa	$I_{l1}=1,4$	$I_{l2}=0,433$

As relações cinemáticas entre os deslocamentos lineares das hastes dos atuadores e as rotações dos elos foram deduzidas em Valdiero (2012), conforme uma metodologia proposta para manipuladores seriais com atuadores lineares e são definidas por parâmetros de localização do atuador em relação aos sistemas de referências da convenção de Denavit-Hartenberg.

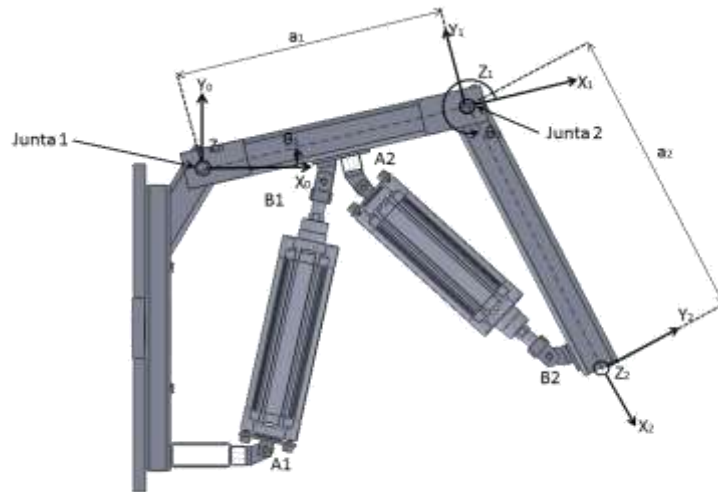


Figura 3. Vista lateral do mecanismo do manipulador robótico acionado pneumicamente com indicação de parâmetros.

A partir da definição do sistema de coordenadas de cada elo, a posição e orientação do sistema de referência *i* podem ser completamente especificadas com relação ao sistema de referência *i-1* que através da convenção de Denavit-Hartenberg estabelecemos os parâmetros como mostra a Tab. 3.

Tabela 3 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Elo <i>i</i>	θ_i (rad)	d_i (m)	a_i (m)	α_i (rad)
1	θ_1	0	$a_1=0,455$	0
2	θ_2	0	$a_2=0,534$	0

4. IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS NÃO LINEARES DO ATRITO

Pode-se caracterizar o atrito como um fenômeno não linear multifacetado que apresenta diversas características não lineares. Dentro dessas características podemos citar o atrito estático, atrito de Coulomb, atrito viscoso e de arraste, os quais compõem os modelos mais simples baseados em mapas estáticos. Também esse comportamento pode ser constituído por fenômenos dinâmicos mais complexos, chamados de atrito de *Stribeck*, atrito estático crescente, memória de atrito e deslocamento de predeslizamento. É importante salientar que as características de atrito são, na sua maioria, dependentes da velocidade, da temperatura, do sentido de movimento, da lubrificação e do desgaste entre as superfícies, da posição e da trajetória do movimento.

A força de atrito F_{atr} usada no deslocamento de cada junta do braço robótico é dada pelo modelo LuGre (Canudas-de-Wit *et al.*, 1995), e a equação da força de atrito entre as superfícies é dada pela equação:

$$F_{atr} = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 (\dot{y}(t))^2 \text{sgn}(\dot{y}(t)) \quad (11)$$

onde σ_0 é o coeficiente de rigidez das deformações entre as superfícies em contato, z é um estado interno não mensurável que representa a deformação média entre as superfícies, σ_1 é o coeficiente de amortecimento associado à taxa de variação de z , σ_2 é o coeficiente de amortecimento viscoso e \dot{y} é a velocidade relativa entre as superfícies.

A equação da dinâmica do estado z é dada por:

$$\frac{dz}{dt} = \dot{y} \left(1 - \alpha(z, \dot{y}) \frac{\sigma_0}{g_{ss}(\dot{y})} \text{sgn}(\dot{y}) z \right) \quad (12)$$

Os comportamentos dinâmicos do atrito são responsáveis por degradações no desempenho do sistema e necessitam serem entendidas e observadas para uma adequada compensação e consequente diminuição de seus efeitos.

O atrito estático ocorre na velocidade zero, opõe-se a todo o movimento com a mesma magnitude da força de torque aplicada $u(t)$ até um valor máximo de força de atrito estático F_s e pode ser descrito como:

$$F_{estático}(t) = \begin{cases} u(t), & \text{se } |u(t)| < F_s \\ F_s \delta(y(t) \text{sgn}(u(t))), & \text{se } |u(t)| \geq F_s \end{cases} \quad (13)$$

onde $\dot{y}(t)$ é a velocidade e $\delta(\dot{y}(t))$ é a função impulso dada por:

$$\delta(\dot{y}(t)) = \begin{cases} 1, & \text{se } \dot{y}(t) = 0 \\ 0, & \text{se } \dot{y}(t) \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

Segundo Valdiero (2012) a função impulso é empregada para descrever o fato de que o atrito estático ocorre apenas no repouso, mas em implementações computacionais práticas pode ser aproximada por um perfil triangular ou retangular.

Pode-se considerar a força de atrito estático como sendo uma força de restrição na fase de predeslizamento entre duas superfícies, onde o comportamento é semelhante ao de uma mola. Para pequenos movimentos da ordem de microns, existe uma elasticidade das asperezas entre as superfícies onde a força aplicada é sempre proporcional ao movimento.

Já a característica do atrito de Coulomb independe da área de contato, opõem-se ao movimento relativo e é proporcional à força normal de contato, podendo ser representado por:

$$F_{Coulomb}(t) = F_c \text{sgn}(\dot{y}(t)) \quad \text{quando } \dot{y}(t) \neq 0 \quad (15)$$

onde F_c é a magnitude do atrito de coulomb, a qual é independente da magnitude da velocidade relativa $\dot{y}(t)$.

O atrito viscoso corresponde a uma situação de boa lubrificação e é linearmente proporcional à velocidade e pode ser escrito através da equação:

$$F_{viscoso}(t) = B\dot{y}(t) \quad (16)$$

onde B é chamado coeficiente de amortecimento viscoso.

O atrito de arraste é o atrito causado pela resistência ao movimento de um corpo através de um fluido, sendo que no nosso caso o mesmo é o ar, o qual é proporcional ao quadrado da velocidade e muitas vezes decorrente de um escoamento turbulento, que pode ser escrito como:

$$F_{arraste}(t) = F_D(\dot{y}(t))^2 \text{sgn}(\dot{y}(t)) \quad (17)$$

onde F_D é o coeficiente de arraste. A Equação (18) representa a força de atrito em regime permanente para o movimento com velocidades constantes:

$$F_{atr,ss} = \text{sgn}(\dot{y}) \left(F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{\dot{y}}{\dot{y}_s}\right)^2} \right) + \sigma_2 (\dot{y}(t))^2 \text{sgn}(\dot{y}(t)) \quad (18)$$

Com o objetivo de demonstrar as características reais de atrito em atuadores pneumáticos e a habilidade de identificação dos principais parâmetros do modelo, foram realizados testes experimentais em uma bancada. Os experimentos foram realizados em malha aberta, em que uma abertura constante da válvula possibilita a passagem de uma vazão através da válvula para a câmara do cilindro. Esta vazão em regime permanente provoca o deslocamento do êmbolo do atuador em velocidade constante. Quando a velocidade é constante, a aceleração anula-se e a força de no atuador, conforme mostrado na equação.

$$M_i \ddot{y}_i + F_{atri} = A_{1i} p_{ai} - A_{2i} p_{bi} \quad (19)$$

onde M_i é a massa deslocada no atuador i , \ddot{y}_i é a aceleração do atuador i , A_{1i} e A_{2i} são as áreas transversais dos cilindros do atuador i , p_{ai} e p_{bi} são respectivamente as pressões do cilindro nas câmaras a e b do atuador i e F_{atri} é a força de atrito no atuador i . No presente trabalho são dois atuadores.

A força de atrito neste caso é dada pela Eq. (11) e os parâmetros estáticos do atrito no atuador pneumático foram obtidos por meio do ajuste dos dados experimentais, utilizando-se algoritmos computacionais de otimização não linear disponível no *software* MatLab.

A Tabela 3 especifica os valores dos parâmetros do modelo dos cilindros pneumáticos utilizados, e foram construídas através do catálogo do fabricante, de cálculos e testes experimentais. Os parâmetros estáticos do atrito nos atuadores pneumáticos foram determinados a partir de testes experimentais em malha aberta, cujo ajuste é mostrado nos gráficos apresentados na Fig. 4 e Fig. 5. Como os atuadores são de mesmo modelo construtivo e mesmo fabricante, obteve os mesmos valores dos parâmetros de atrito na Tab. 3 para ambos os atuadores. Os parâmetros dinâmicos do atrito são determinados conforme metodologia apresentada em Valdiero (2012).

Tabela 3. Valores dos parâmetros dos cilindros pneumáticos de 200mm e 160mm de curso.

Parâmetros	Valor	Unidade
γ	1,4	Adimensional
$A_{11}=A_{12}$	$5,02 \times 10^{-3}$	m^2
$A_{21}=A_{22}$	$4,5 \times 10^{-3}$	m^2
M_{11}	3,42	kg
M_{12}	3,14	kg
$D_{11}=D_{12}$	0,08	m
p_s (manométrica)	$6,65 \times 10^5$	Pa
p_{atm} (manométrica)	0	Pa
V_{a01}	$5,02 \times 10^{-4}$	m^3
V_{b02}	$4,84 \times 10^{-4}$	m^3
L_{11}	0,2	m
L_{12}	0,16	m

Tabela 4. Parâmetros estáticos do atrito em ambos os cilindros pneumáticos.

Parâmetros	Valores Ajustados	Unidades
$F_s(\dot{y} > 0)$	125	N
$F_s(\dot{y} < 0)$	-35	N
$F_c(\dot{y} > 0)$	120	N
$F_c(\dot{y} < 0)$	-30	N
$\sigma_2(\dot{y} > 0)$	10000	N.s/m
$\sigma_2(\dot{y} < 0)$	-11387	N.s/m
$\dot{y}_s(\dot{y} > 0)$	0,01	m/s
$\dot{y}_s(\dot{y} < 0)$	-0,01	m/s

As curvas experimentais das Fig. 4 e Fig. 5, chamadas de mapa estático de atrito, associam a cada valor de velocidade em regime permanente um valor de força de atrito em regime permanente. Este mapa estático é obtido por meio de diversos experimentos variando de velocidade baixa (em torno de 0,004 m/s) até velocidades perto de 0,3 m/s, cujos sinais são capturados a partir da bancada experimental. Sendo que cada um dos experimentos realizados representa um ponto nos gráficos apresentados na Fig.4 e na Fig.5. Para cada experimento determinou-se a velocidade em regime permanente e a força correspondente produzida pela diferença de pressão medida nas câmaras, a qual corresponde à força de atrito em regime permanente no atuador (Valdiero, 2012). Aplicando-se então a Eq. (18) da força de atrito em regime permanente, obtém-se a curva teórica ajustada à experimental que representa um mapa estático do atrito.

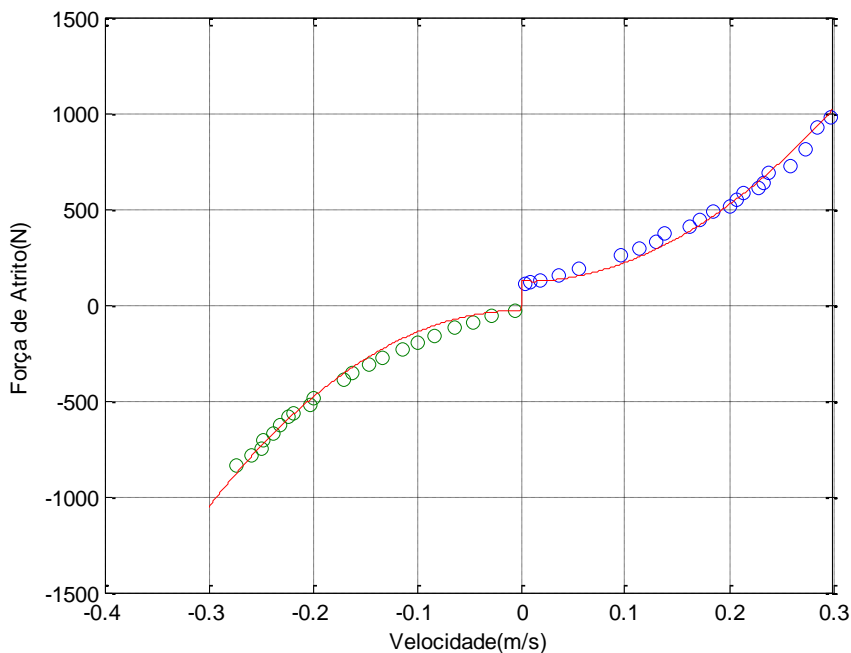


Figura 4. Determinação do mapa estático do atuador 1

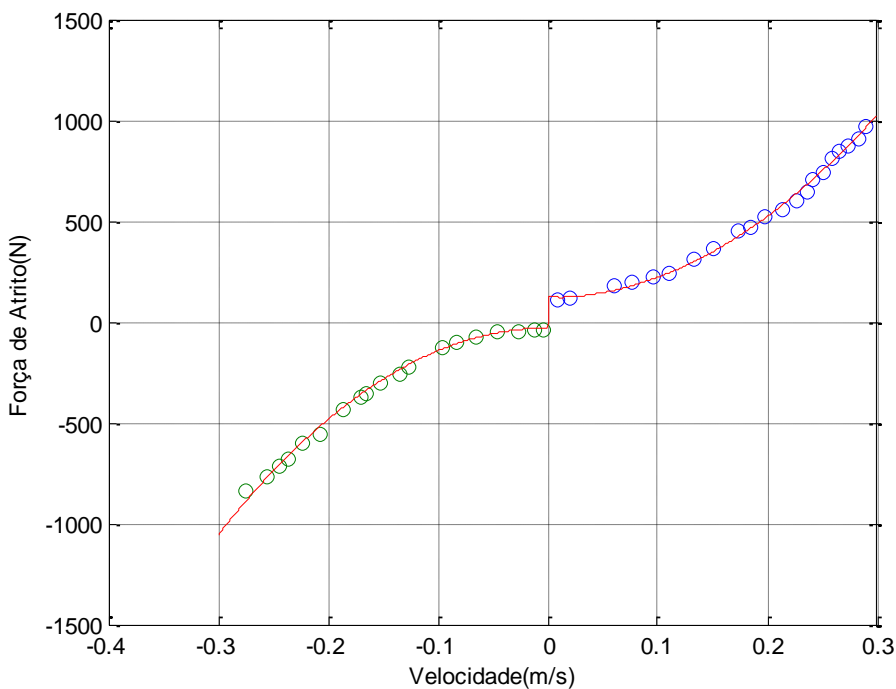


Figura 5. Determinação do mapa estático do atuador 2.

5. RESULTADOS DO TESTE EXPERIMENTAL EM MALHA ABERTA

O objetivo dos testes foi analisar o comportamento real do movimento angular das juntas do robô. A metodologia de teste consiste em manter uma das juntas avançada e aplicar um sinal de tensão para o avanço e recuo da outra junta e posteriormente o recuo da junta 2. Os resultados permitiram a captura dos sinais de pressão nas câmaras dos atuadores e dos ângulos de junta. Estes sinais serão utilizados para auxílio na simulação e na validação computacional do modelo desenvolvido, por exemplo, os sinais em $t=0$ são utilizados como condições iniciais nas simulações.

Apresentam-se a seguir os resultados experimentais do teste em malha aberta, onde se pode observar a dinâmica do braço robótico na bancada. Fez-se a captura dos sinais com o tempo de amostragem de 1 milissegundo.

Foram realizados diversos testes experimentais para vários sinais de controle. Como exemplo ilustrativo, apresenta-se na Fig.6 os resultados para uma entrada em degrau de sinal de 3 Volts. Os testes experimentais foram utilizados para ajustes e determinação dos parâmetros do modelo matemático do robô pneumático descrito nas seções anteriores.

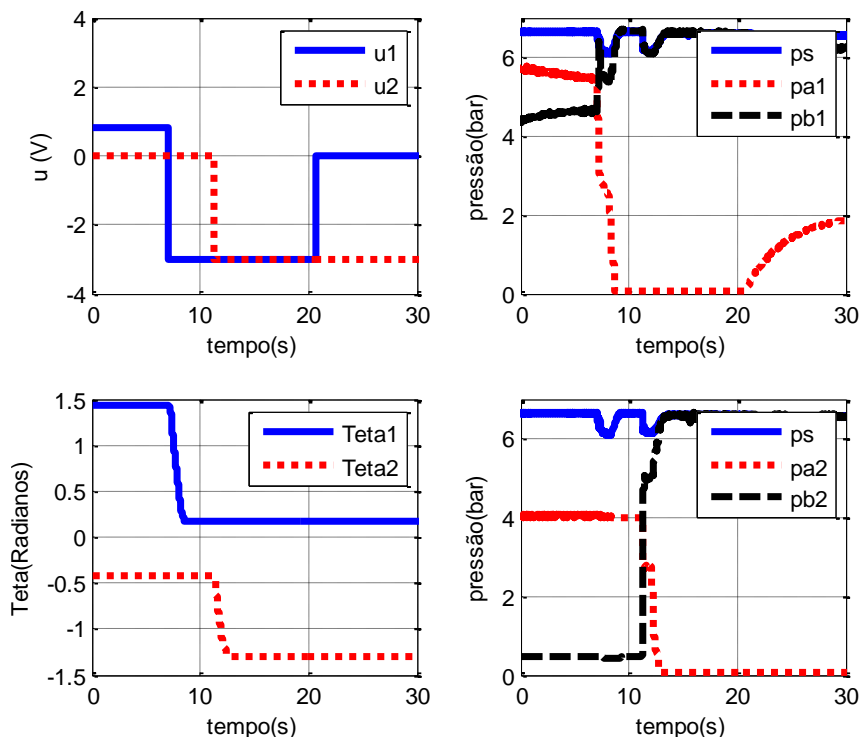


Figura 6. Gráficos dos resultados obtidos no teste experimental em malha aberta: (a) sinais de controle dos atuadores; (b) pressões no atuador 1 ;(c) posição angular das juntas e (d) pressões no atuador 2.

6. CONCLUSÃO

Apresentou-se o projeto e a modelagem matemática de robô pneumático com dois graus de liberdade com acionamento pneumático. O atrito proveniente das vedações nos cilindros pneumáticos se mostrou como fator de influência importante na dinâmica do robô, sendo realizada a identificação experimental das principais características não lineares do atrito. Testes experimentais em malha aberta possibilitaram a determinação e o ajuste de parâmetros do modelo matemático. Os resultados ilustram a eficiência da metodologia proposta para o desenvolvimento do modelo matemático e permitem observar o comportamento dinâmico do robô em teste experimental em malha aberta. Pretende-se assim contribuir para o desenvolvimento de soluções robotizadas com acionamento pneumático para problemas da indústria e agroindustriais, prevendo futuramente a validação experimental em malha aberta (comparação de resultados de simulação computacional com os de testes experimentais), além da implementação de estratégias de controle em malha fechada e a aplicação em estudos de caso.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores são agradecidos ao CNPq pelo apoio na forma de bolsas de mestrado, de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora, 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.

8. REFERÊNCIAS

Abry, F. ; Brun, X., Sesmat, S., Bideaux, E., 2013, “Non-linear position control of a pneumatic actuator with closed-loop stiffness, and damping tuning”, Proceedings of the European Control Conference, Zurich, Switzerland, pp. 1089-1094.

- Bavaresco, D., 2007, “Modelagem matemática e controle de um atuador pneumático.” Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 107f.
- Canudas-de-Wit, C., Olsson, H., Åstrom, K.J., Lischinsky, P., 1995, “A new model for the control of systems with friction”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.40, pp.419-425.
- Dandan, K., Ananiev, A., Kalaykov, I., 2013, “SIRO: The silos surface cleaning robot concept”, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Takamatsu, Japan, pp. 657-661.
- Pradipta, J., Klunder, M., Weickgenannt, M., Sawodny, O. I., 2013, “Development of a pneumatically driven flight simulator Stewart platform using motion and force control”, Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Wollongong, Australia, pp. 158-163.
- Riachy, S., Ghanes, M., 2013, “A Nonlinear Controller for Pneumatic Servo Systems: Design and Experimental Tests”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 99, pp. 1-11.
- Ritter, C. S., 2010, “Modelagem matemática das características não lineares de atuadores pneumáticos”, Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 87 f.
- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1996, “Modeling and control of robot manipulators”, McGraw-Hill, Naples, Italy.
- Valdiero, A. C., 2012, “Modelagem Matemática de Robôs Hidráulicos”, Unijuí, Ijuí.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING AND DESIGN OF A PNEUMATICALLY DRIVEN ROBOTIC ARM

Claudio da Silva dos Santos, prof.claudiosant@hotmail.com¹
Sandra Edinara Baratto Viecelli, Sandra_edinara@hotmail.com¹
Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹
Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹
Djonatan Ritter, djo_ritter@hotmail.com¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, DECEEng/UNIJUI/Câmpus Panambi/Caixa Postal 121/CEP 98290-000, Panambi-RS, Brasil

Abstract: *The present paper is about the modeling and design of a pneumatically driven robotic arm. The robotic arm has great potential of applications in industry and in agro-forestry for its handling of parts or positioning of tools. The utilization of pneumatic actuators has the advantages of low cost, high power ratio by size, installation flexibility, they are clean and do not pollute the environment. However, pneumatic actuators have several nonlinearities such as the dead zone in the servo valve, the compressibility of air and the friction caused by the seals in the moving parts which combined with the dynamic coupling between the joint variables of the robot which make its modeling and precise control difficult. The designed robotic arm has two degrees of freedom with rotary joints driven by differential actuator. For purposes of modeling and compensation in control, the experimental identification of nonlinear characteristics of friction is performed. The main objective is the experimental validation of the behavior of the designed pneumatic robot. For the acquisition of signal and control, it uses an electronic board “dSPACE” and the processing of results is performed with the aid of MatLab computational tool. The results have the mathematical modeling of the main nonlinear characteristics of the robotic arm. These characteristics cause harmful effects to the control, such as the phenomena such as stick-slide (stick-slip), the oscillations around the desired position, the loss of motion and the errors in the inversion of movement. It aims at contributing to the development of robotic solutions for problems with pneumatically operated industrial and agro-industrial automatic actuating. This research had the support of CELPE which is a part of the ANEEL P&D program, and FAPERGS as well as the CNPq.*

Keywords: *Pneumatic Robot, Mathematical Modeling, Experimental Tests*