



18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM ROBÔ GANTRY COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO

Leonardo Bortolon Maraschin, leonardo.maraschin@unijui.edu.br¹

Angelo Fernando Fiori, an@unochapeco.edu.br¹

Sandra Edinara Baratto Viecelli, Sandra_edinara@hotmail.com¹

Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹

Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹

¹Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI) - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias (DCEEng), Rua Prefeito Rudi Franke – 540, 98280000, Panambi/RS, Brasil.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento da modelagem matemática do comportamento dinâmico de um robô Gantry com três graus de liberdade acionado por atuadores pneumáticos, prevendo-se futuramente uma proposta de controle de posição. Este tipo de robô é muito empregado em diversas áreas da indústria, sendo bastante utilizado na manipulação de cargas, nas máquinas de corte a laser e na usinagem CNC. Existem várias vantagens na utilização deste tipo de robô, entre elas estão o aumento da produtividade, a maior qualidade do produto final, a segurança das pessoas, além de serem facilmente adaptáveis para grandes dimensões. Este robô encontra-se em uma bancada experimental na Unijuí Câmpus Pânambi, servirá como plataforma de teste para verificação dos modelos matemáticos e das estratégias de controle de posição. Essa bancada é composta por uma estrutura fixa, com três cilindros pneumáticos controlados cada um por uma servoválvula. Os movimentos horizontais e verticais desse robô citado serão capturados por uma placa eletrônica de aquisição de sinais e controle (dSPACE), montada em um microcomputador do Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS), que está integrado ao software Matlab. Pretende-se contribuir para a robotização de baixo custo em tarefas insalubres e perigosas, tal como o manuseio de peças numa indústria e tarefas de polimento. Como perspectivas futuras, pretende-se a validação do modelo matemático do robô e dos testes experimentais de estratégias de controle.

Palavras-chave: Modelagem Matemática, Robô Gantry, Acionamento Pneumático.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho descreve a modelagem matemática dinâmica de um robô cartesiano tipo pórtico com três graus de liberdade acionado por atuadores pneumáticos para ser utilizado em processos de polimento e lixamento, prevendo-se futuramente uma proposta de controle de posição.

Através da modelagem matemática, pode-se visualizar e compreender o comportamento dinâmico do robô, com isso é possível prever os movimentos do efetuador final (Ferruzzi, 2003) e assim podem-se evitar acidentes por causa de erros de trajetória ou de falhas no manipulador. Nota-se que com a utilização da modelagem a humanidade conseguiu obter grandes avanços tecnológicos, pois foi possível diminuir o custo de produção e aumentar a produtividade de vários produtos, entre eles estão os microcomputadores, os veículos, os telefones celulares e outros diversos bens de consumo.

Observa-se que robô é um dispositivo autônomo ou semi-autônomo que realiza trabalhos de acordo com um controle humano, controle parcial com supervisão, ou de forma autônoma (Alfarro, 2006). Ele foi criado de princípio para desempenhar funções perigosas e danosas para as pessoas, mas com o avanço da ciência, atualmente realiza atividades mais complexas com maior precisão e rapidez.

Os robôs podem ser classificados em: móveis, manipuladores e a combinação destes últimos dois. O manipulador é chamado também de robô industrial, com propósito geral, constituído estruturalmente de vários segmentos mecânicos rígidos ligados em série por juntas e tendo na extremidade uma garra ou ferramenta (Valdiero, 2005). Com ele as

indústrias puderam automatizar algumas linhas de produção, assim elas diminuíram o tempo de fabricação das suas mercadorias e ainda melhoraram a qualidade delas.

Os cinco tipos principais de braços em robótica de manipulação são: cartesiano, cilíndrico, polar, revolução e SCARA (Silva, 1999). Existem várias vantagens de utilizar o robô com braço cartesiano tipo pórtico, também chamado de Gantry (Spong, Hutchinson e Vidyasagar, 2006) entre elas estão o aumento da produtividade, a maior qualidade do produto final, a segurança das pessoas, além de serem facilmente adaptáveis para grandes dimensões. Este tipo de robô é muito empregado em diversas áreas da indústria, sendo bastante usado na manipulação de cargas, nas máquinas de corte a laser e na usinagem CNC.

Existem vários tipos atuadores ou acionadores para os robôs, sendo que são distribuídos em: pneumáticos, óleo-hidráulicos, hidro-hidráulicos, elétricos rotativos (DC e DA) e elétricos lineares (Bavaresco, 2007). Sendo que as vantagens do sistema pneumático são a facilidade para transporte em tubulações, a simplicidade de armazenamento por serem compressíveis em reservatórios e além de o ar ser matéria prima não poluente (Vale, 2011).

O robô Gantry deste trabalho está sendo desenvolvido em uma bancada experimental na Unijuí Câmpus Panambi, servirá como plataforma de teste para verificação de modelos matemáticos e de estratégias de controle de posição. Os movimentos horizontais e verticais serão capturados por uma placa eletrônica de aquisição de sinais e controle (dSPACE), montada em um microcomputador do Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas (NIMASS).

Pretende-se contribuir com a modelagem matemática de um protótipo acionado pneumáticamente e para a robotização de baixo custo em tarefas insalubres e perigosas, tal como o manuseio de peças numa indústria e tarefas de polimento. Como perspectivas futuras, busca-se a validação do modelo matemático do robô e dos testes experimentais de estratégias de controle.

No artigo está à descrição o robô Gantry com acionamento pneumático na seção 2. A seção 3 trata da modelagem matemática do robô cartesiano tipo pórtico com a intenção de mostrar uma proposta de controle de posição. A seção 4 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

2. DESCRIÇÃO DO ROBÔ GANTRY COM ACIONAMENTO PNEUMÁTICO

Este robô cartesiano, conforme Figura 1, foi construído em uma estrutura fixa do tipo pórtico, com três graus de liberdade, sendo que as juntas serão prismáticas e ainda tem uma servoválvula de controle direcional para cada cilindro pneumático de dupla ação. Para manter o ar comprimido limpo e lubrificado na bancada experimental é utilizada uma unidade de conservação.

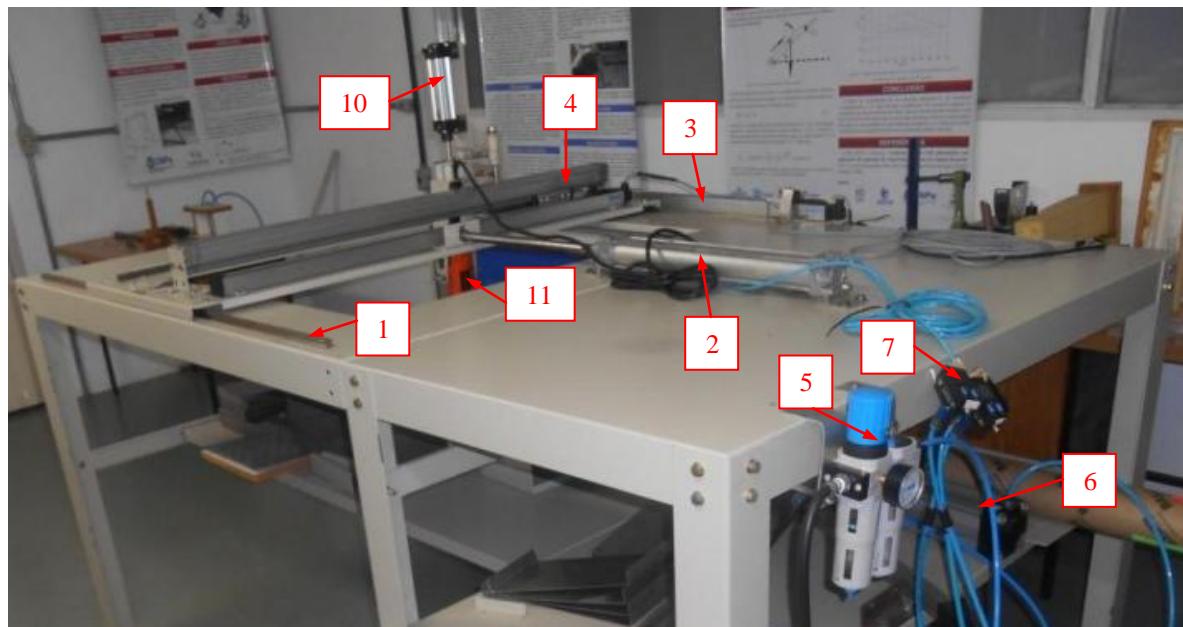


Figura 1. Robô Gantry com descrição de suas partes.

Os componentes apresentados acima e alguns outros que serão montados no protótipo têm as suas especificações descritas na Tab. 1.

Tabela 1. Principais componentes do protótipo do robô Gantry pneumático

Item	Componente	Fabricante	Código Catálogo	Especificações
1	Guia	Kalatec	TR15	Espessura: 13 mm Largura: 15 mm Comprimento: 1200 mm Capacidade carga dinâmica: 897 kgf Capacidade de carga estática: 1863 kgf
2	Cilindro pneumático com haste	Norgren	RA/8050/M/400	Diâmetro da haste: 20 mm Diâmetro do cilindro: 50 mm Curso: 400 mm Força teórica: 1178 N
3	Sistema transdutor linear	Festo	MLO-POT-1000-TLF (152632)	Resolução do trajeto: 0,01 mm Curso: 1000 mm
4	Cilindro pneumático sem haste	Rexroth	5206020400	Diâmetro: 25 mm Curso: 1000 mm Força teórica: 500 N
5	Unidade de conservação	Festo	162773	Grau de filtração: 5 µm Vazão nominal padrão: 1.700 l/min
6	Reservatório de ar comprimido	Proar	RA 080.500.1	Volume: $2,51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
7	Sensor de pressão	Festo	SDE1-D10-G2-R18-C-PU-M8 (529958)	Faixa de medição de pressão: 0 – 10 bar
8	Transmissor de pressão	Gefran	TKG E 1M 1DM	Faixa de medição de pressão: 0 – 10 bar
9	Patins	Kalatec	TRH15FL	Espessura: 21 mm Largura: 47 mm Comprimento: 1200 mm Capacidade carga dinâmica: 897 kgf Capacidade de carga estática: 1863 kgf
10	Cilindro pneumático com haste	Proar	MM 032.249.101 x100 (ISO 6431)	Diâmetro da haste: 12 mm Diâmetro do cilindro: 32 mm Curso: 100 mm
11	Lixadeira LINE-MATE III	Walter	6268 (30A-308)	RPM: 1000 - 3800 Motor: 220 V AC Potência: 1520 W
12	Válvula direcional proporcional	Festo	MPYE-5-1/8-HF-010-B (151693)	Função de válvula: 5/3 vias, fechada Vazão nominal padrão: 700 l/min

As partes chamadas de guia (1) e patins (9) formam juntas a Guia Linear TRH do fabricante Kalatec, mostrado Fig. 2, que servem para aplicações de exigem precisão e têm baixíssima manutenção.

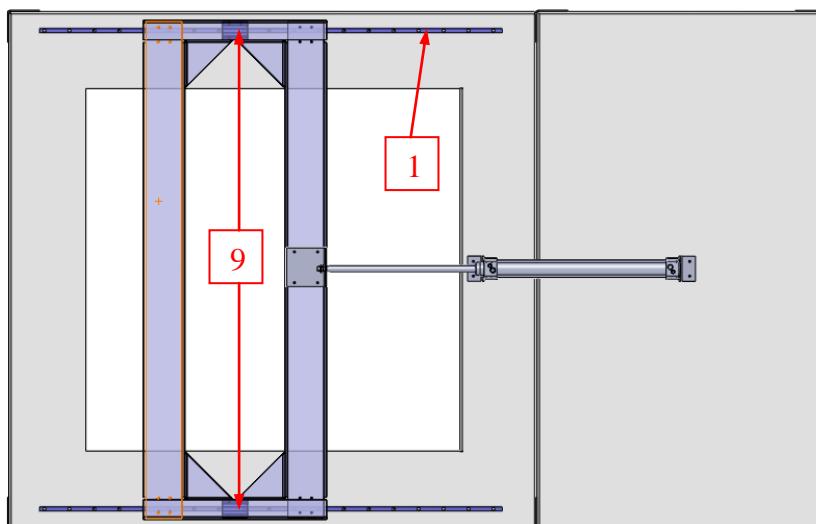


Figura 2: Projeto do protótipo com 1 grau de liberdade (vista superior)

O protótipo está conectado a uma bancada de instrumentação, mostrado na Fig. 3, composto de uma placa alemã dSPACE DS 1104, que está integrada a um microcomputador. Sendo que os movimentos horizontais e verticais desse robô serão capturados pelos sistemas transdutores lineares e enviados em forma de sinais analógicos para a placa citada, após isso ela envia sinais analógicos para as válvulas direcionais proporcionais que liberam a passagem do ar comprimido, com isso controla-se o avanço e recuo dos cilindros pneumáticos e a posição final da ferramenta. As simulações com os dados obtidos nos experimentos serão realizados no software Matlab/Simulink.

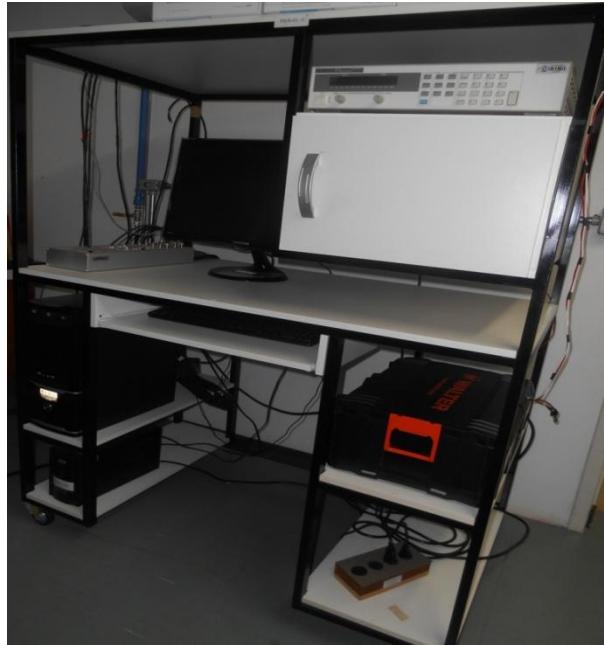


Figura 3: Bancada de Instrumentação com a placa eletrônica dSPACE para aquisição de sinais e controle.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ROBÔ CARTESIANO TIPO PÓRTICO

Utiliza-se o modelo dinâmico de um robô de elos rígidos sem a dinâmica do atuador (Valdiero, 2012). Neste modelo serão utilizadas as equações que relacionam as forças geradas pelos atuadores nas juntas e o movimento da estrutura.

Analizando um robô de n graus de liberdade com ausência de forças externas no efetuador final e desconsiderando o atrito na estrutura, podemos obter assim o modelo dinâmico no espaço das juntas através da formulação de Lagrange e escrevê-lo numa forma matricial compacta, conforme apresentado pela Eq. (1):

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

Onde d é o vetor de coordenadas das juntas; $H(d)$ é a matriz de inércia simétrica, definida positiva; $C(d, \dot{d})$ é a matriz que representa os efeitos centrífugos e de Coriolis; $G(d)$ é o vetor que representa o momento gerado em cada eixo de junta do manipulador devido à presença da gravidade e τ é o vetor de torques do movimento das juntas.

Combinando a dinâmica dos elos do robô, descrita pela Eq. (1) com a dinâmica dos atuadores têm-se a Eq. (2):

$$H(d)\ddot{d} + C(d, \dot{d})\dot{d} + G(d) = \bar{J}^T f_L \quad (2)$$

Sendo que \bar{J} é definida como a matriz Jacobiana do atuador e f_L é o vetor de força de carga nos atuadores lineares medida em N. Onde \bar{J} mapeia as velocidades dos atuadores com as velocidades no espaço das juntas, segundo a Eq. (3) que no caso particular do robô Gantry é igual à matriz identidade:

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \bar{J}_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \bar{J}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

O vetor f_L pode ser escrito na seguinte forma matricial, conforme Eq. (4):

$$f_L = -M\ddot{y} - f_{atr} - f_G + f_P \quad (4)$$

Onde M é uma matriz diagonal que representa a massa deslocada pelos atuadores em kg; f_{atr} é o vetor que corresponde à força de atrito nos atuadores em N; \ddot{y} é o vetor de aceleração dos atuadores em m/s^2 ; f_G é o vetor das componentes gravitacionais que atuam no sentido do movimento do atuador em N e f_p é a força pneumática nos atuadores em N. O vetor \ddot{y} pode ser descrito pela Eq. (5):

$$\ddot{y} = J\ddot{d} + \dot{J}\dot{d} \quad (5)$$

Sendo que \ddot{d} é o vetor de aceleração das juntas em m/s^2 . Combinando a Eq. (4) com a Eq. (2) e agrupando os termos no primeiro membro da equação obtida e isolando a parcela da força pneumática no segundo, obtém-se a equação dinâmica que descreve o movimento de um manipulador acionado por atuadores pneumáticos, conforme Eq. (6):

$$H^*(d)\ddot{d} + C^*(d, \dot{d})\dot{d} + \tau_{atr}(d, \dot{d}) + G^*(d) = \bar{J}^T f_p \quad (6)$$

Onde $H^*(d) = [H(d) + \bar{J}^T M \bar{J}]$ é a matriz de inércia modificada; $C^*(d, \dot{d}) = [C(d, \dot{d}) + \bar{J}^T M \dot{J}]$ é matriz de Coriolis modificada; $\tau_{atr}(d, \dot{d}) = \bar{J}^T f_{atr}$ é o vetor de torques gerados pelo atrito no atuador e $G^*(d) = [\bar{J}^T f_G + G(d)]$ é o vetor de torque gravitacional modificado.

O modelo dinâmico de um manipulador acionado pneumaticamente, incluindo o modelo dinâmico do atrito é descrito pela Eq. (7).

$$H^*(d)\ddot{d} + C^*(d, \dot{d})\dot{d} + \tau_{atr}(d, \dot{d}, z_{atr}, \dot{z}_{atr}) + G^*(d) = \bar{J}^T f_p \quad (7)$$

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

A dinâmica do vetor de estados internos do atrito (z_{atr}) pode ser escrita na forma matricial conforme a Eq. (8):

$$\dot{z}_{atr} = h_{atr}(d, \dot{d}, z_{atr}) \quad (8)$$

Onde $h_{atr}(d, \dot{d}, z_{atr})$ é o vetor cujos elementos são funções que representam a dinâmica do estado interno z_{atr} do atrito em cada atuador i. E o vetor da taxa de variação da força pneumática (\dot{f}_p) pode ser escrito, conforme Eq. (9).

$$\dot{f}_p = f_d(d, \dot{d}) + g_u(d, p_a, p_b, u) \quad (9)$$

Sendo que $f_d(d, \dot{d})$ e $g_u(d, p_a, p_b, u)$ são vetores cujos elementos são funções que representam respectivamente as parcelas da dinâmica pneumática.

O modelo dinâmico do manipulador acionado pneumaticamente, incluindo a dinâmica do atrito, é descrito pelo conjunto de equações não lineares de quinta ordem, em que a ordem total do sistema é 5n e pode ser representado pelo vetor de estado $[d \ \dot{d} \ z_{atr} \ p_a \ p_b]^T$. Onde p_a e p_b são as pressões nas câmaras do atuador medida em Pa (RICHTER, 2013), conforme Fig. 4.

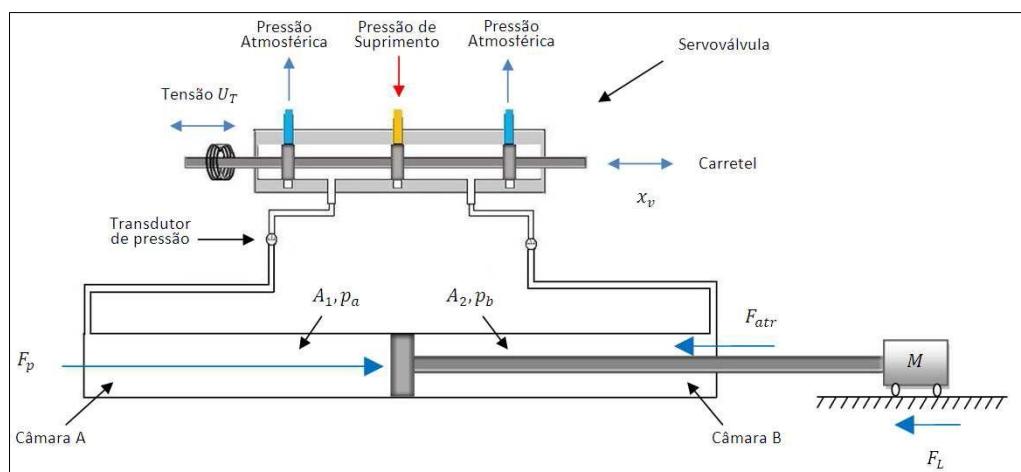


Figura 4: Desenho esquemático da válvula direcional proporcional ligada a um cilindro pneumático com haste de dupla ação da Richter (2013).

Então se observa que o modelo do manipulador robótico acionado pneumáticamente descrito pelas Eq. (7), (8) e (9) podem ajudar no controle dinâmico neste tipo de robô.

A matriz de inércia modificada $H^*(d) = [H(d) + \bar{J}^T M \bar{J}]$ é composta pela matriz de inércia $H(d)$ do manipulador rígido e pela parcela de inércia dos atuadores ($\bar{J}^T M \bar{J}$), e é dada pela Eq. (10) considerando os 3 graus de liberdade e o desacoplamento cinemático no robô cartesiano do tipo Gantry.

$$H(d) = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & 0 \\ 0 & H_{22} & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

onde:

$H_{11} = 15$ kg (massa total deslocada na direção horizontal longitudinal, incluindo-se a massa deslocada no atuador 1)

$H_{22} = 8$ kg (massa total deslocada na direção horizontal transversal, incluindo-se a massa deslocada no atuador 2)

$H_{33} = 5$ kg (massa total deslocada na direção vertical, incluindo-se a massa da ferramenta e da haste do atuador 3)

Maiores detalhes sobre a modelagem matemática do robô Gantry em relação à dinâmica do atrito nas juntas e nos atuadores foram publicados em Richter (2013) e referente às características não lineares da servoválvula estão detalhadamente descritos em Bavaresco (2007).

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Através deste trabalho foram apresentadas as principais etapas do desenvolvimento da modelagem matemática dinâmica de um robô cartesiano tipo pôrtico acionado por atuadores pneumáticos em termos da formulação geral e também as equações que podem ajudar no controle do comportamento dinâmico deste manipulador citado que foi construído em uma bancada experimental na Unijuí Câmpus Pântambé. Com esta pesquisa pretende-se contribuir com a modelagem matemática de um protótipo acionado pneumaticamente e para a robotização de baixo custo em tarefas insalubres e perigosas, tal como o manuseio de peças numa indústria e tarefas de polimento e lixamento de peças da indústria metal-mecânica do Arranjo Produtivo Local de cidade polo Panambi/RS. Sendo que nesse robô serão realizados testes experimentais para identificar as não linearidades presentes nele, tais como o atrito nos atuadores pneumáticos, a vazão mássica na servoválvula e a zona morta. Como perspectivas futuras, busca-se a validação do modelo matemático da dinâmica do robô e dos testes experimentais de estratégias de controle.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. Os autores também são agradecidos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa 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) do Câmpus Pântambé, 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

- Alfaro, S. C. A. 2006. Robôs em Projetos Tecnológicos. *Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC*, Florianópolis, SC. Disponível em: <http://www.sbpnet.org.br/livro/58ra/atividades/TEXTOS/texto_884.html>. Acesso em 01 jun. 2014.
- Bavaresco, D. 2007. *Modelagem Matemática e Controle de um Atuador Pneumático*. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS.
- Ferruzzi, E. C. 2003. *A Modelagem Matemática como estratégia de ensino e aprendizagem do Cálculo Diferencial e Integral nos Cursos Superiores de Tecnologia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84624/190478.pdf?sequence=1>>. Acesso em 15 jun. 2014

- Richter, R. R. M. 2013. *Modelagem Matemática e Controle de Posição de um Atuador Linear Acionado Pneumaticamente*. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS.
- Silva, J. N. C. P. 1999. *Realização de Controlo de Força em Robôs Manipuladores Industriais*. Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. Disponível em:< <http://hdl.handle.net/10316/1594>> Acesso em 07 de jun. 2014.
- Spong, M. W., Hutchinson, S. and Vidyasagar, M. 2006. *Robot Modeling and Control*. New York, EUA: Ed. John Wiley & SONS. Disponível em:< http://www.fit.hcmup.edu.vn/~hungnv/teaching/Robotics/0471649902_-_Robot_Modeling_and_Control.pdf>. Acesso em 1 jul. 2014.
- Valdiero, A.C. 2005. *Projeto Mecânico de Robôs Industriais*. Ijuí, RS: Ed. Unijuí
- Valdiero, A. C. 2012. *Modelagem Matemática de Robôs Hidráulicos*. Ijuí, RS: Ed. Unijuí.
- Vale, V. A. C. 2011. *Controle de Posição de um Robô Cartesiano por meio de Técnicas Adaptativas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. Disponível em: <http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1951>. Acesso em 27 jun. 2014.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MATHEMATICAL MODELING OF A GANTRY ROBOT WITH PNEUMATIC ACTUATOR

Leonardo Bortolon Maraschin, leonardo.maraschin@unijui.edu.br¹

Angelo Fernando Fiori, an@unochapeco.edu.br¹

Sandra Edinara Baratto Viecelli, Sandra_edinara@hotmail.com¹

Antonio Carlos Valdiero, valdiero@unijui.edu.br¹

Luiz Antonio Rasia, rasia@unijui.edu.br¹

¹Regional Northwest University of Rio Grande do Sul (UNIJUI) - Department of exact sciences and engineering (DCEEng), Street Prefeito Rudi Franke – 540, 98280000, Panambi/RS

Abstract. This paper presents the development of mathematical modeling of the dynamic behavior of a gantry robot with three degrees of freedom with pneumatic actuator, is expected in the future a proposal for position control. This type of robot is very used in various areas of the industry, being widely used in cargo handling, in laser cutting machines and CNC machining. There are several advantages of using this type of robot, among them are increased productivity, higher quality of the final product, the safety of people, and are easily adaptable to large. This robot is on a trial bench in Unijuí Campus Panambi, serve as a test platform for verification of mathematical models and control strategies position. This countertop comprises a fixed structure, three pneumatic cylinders controlled each by a servovalve. The horizontal and vertical movements of the robot quoted will be captured by an electronic board data acquisition and control (dSPACE), mounted in a microcomputer of the Center for Innovation in Automatic Machines and Servo Systems (NIMASS), this integrated with Matlab software. It is intended to contribute to the low cost robotics in unhealthy and dangerous tasks, as the handling of parts in an industry and polishing tasks. As future prospects, it is intended to validate the mathematical model of the robot and experimental tests of control strategies.

Keywords: Mathematical Modeling, Gantry Robot, Pneumatic Actuator.