



UM ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A DINÂMICA DE ROBÔS- MANIPULADORES DO TIPO SCARA

Alexandre Irigon Gervini

Leonardo Alves De Paula e Silva

Vagner Santos da Rosa

Sebastião Cícero Pinheiro Gomes

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande, RS

ec4xande@super.furg.br; ec4lapys@super.furg.br; ec5vsr@super.furg.br; dmtscpg@super.furg.br

***Resumo.** O presente trabalho traz um estudo sobre a influência dos atuadores no comportamento dinâmico global de um robô-manipulador, estudo este baseado em resultados experimentais obtidos em um manipulador do tipo SCARA (Selective Compliant Arm for Robotic Assembly), construído exclusivamente para permitir a realização de pesquisas, tanto relativas à concepção de leis de controle quanto a aspectos de modelagem e análise dinâmica. Os atuadores do robô construído (SCARA-FURG), são moto-redutores do tipo harmonic-drive, cuja principal característica é assegurar um jogo angular nulo em razão da grande quantidade dos dentes das engrenagens estarem permanentemente em contato. Pôs-se em evidência os efeitos relativos aos atritos não lineares, efeitos conhecidos em língua inglesa como stick-slip, os quais dificultam em muito o desempenho de leis de controle. Verificou-se ainda uma dependência de parte do torque de atrito com a posição angular do rotor, atrito este que causa uma flutuação no torque resultante através do atuador, visível a partir de flutuações no sinal velocidade do rotor, para ambos os atuadores. Finaliza-se com conclusões gerais sobre os resultados experimentais que deram origem ao presente trabalho.*

***Palavras chave:** Robô, manipulador, modelagem dinâmica, atrito, controle.*

1. INTRODUÇÃO

Existe uma grande quantidade de trabalhos científicos sobre teoria de controle em geral, com aplicações diversas, entre as quais a robôs manipuladores (Ferretti *et. al.*, 1998; Park *et. al.*, 1998). Em sua maioria, os modelos dinâmicos são geralmente simplificados, principalmente com relação à dinâmica dos atuadores. Isto resulta num fato relativamente comum: quando se parte para alguma implementação prática, os resultados de simulação das leis de controle diferem por vezes sensivelmente dos encontrados na experimentação, sendo necessários ajustes nos parâmetros de controle, os quais são conseguidos em exaustivos testes experimentais (Armstrong, 1988). No presente artigo tenta-se elucidar, a partir de resultados experimentais, algumas questões relevantes sobre a modelagem dinâmica de robôs manipuladores. Portanto, não se dará ênfase ao desenvolvimento de controladores e sim, à demonstração experimental sobre efeitos dinâmicos existentes, principalmente relativos aos

atuadores, efeitos estes que são significativos e ainda assim, quase sempre negligenciados em trabalhos exclusivamente teóricos na área de robótica.

2. O ROBÔ SCARA

Construiu-se, no Núcleo de Matemática Aplicada da Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG), um robô-manipulador do tipo SCARA (*Selective Compliant Arm for Robotic Assembly*, Craig, 1986; Groover et al., 1989; Spong and Vidyasagar, 1989) para a obtenção dos resultados experimentais (Fig.(1)). São dois graus de liberdade, sendo os elos em alumínio e suporte e contra-peso em aço 1020. Os atuadores são moto-redutores do tipo *harmonic-drive*. O atuador que está fixo à base, doravante intitulado atuador 1, responsável pelo movimento do primeiro elo, tem índice de redução de 1:100, enquanto que o outro atuador, responsável pelo movimento do segundo elo, possui índice de redução de 1:80. Em cada atuador, existe um *encoder* solidário ao eixo do rotor, com uma resolução de 2000 pulsos por volta. Estes atuadores são dispositivos mecânicos de transmissão de movimento com jogo angular nulo, fato extremamente importante para a robótica de grande precisão.

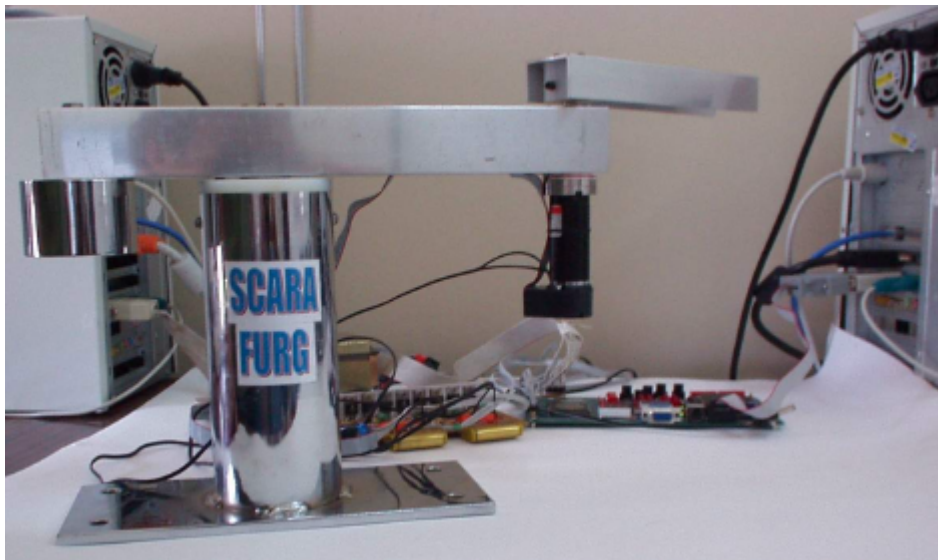


Figura 1. Robô-manipulador do tipo SCARA com dois graus de liberdade.

O SCARA-FURG foi desenvolvido exclusivamente para a realização de pesquisas. O projeto eletrônico foi elaborado visando facilitar a implementação de leis de controle mais complexas, que envolvam eventualmente uma maior quantidade de cálculos a serem efetuados em tempo real (Salicic *et. al.*, 1997; Ercegovic *et. al.*, 1999). O *hardware* utilizado (FPGA – *Field Programmable Gate Array*, ALTERA FLEX EPF10K20, Kit MAX 7000S, ALTERA UNIVERSITY PROGRAM (Max+PLUS II, 1995)), se comunica com um programa escrito em linguagem ANSI C executado em um PC, através da porta paralela (protocolo EPP - *Enhanced Parallel Port*). O *software* desenvolvido proporciona um ambiente de acionamento dos motores no qual o usuário pode definir a lei de controle, as trajetórias de referência para os elos e o tempo total do experimento.

3. FLUTUAÇÕES NA VELOCIDADE ROTOR

Visando identificar possíveis flutuações de mais alta frequência nas velocidades dos rotores dos moto-redutores, trabalhou-se com um passo de discretização do controle muito pequeno, da ordem de 0.0005 segundos. Degraus alternados com diversas amplitudes em torque (malha aberta) foram enviados aos motores, registrando-se as velocidades dos rotores. Um destes resultados é visto na Fig.(2), para o caso do motor 1 (movimenta o primeiro elo). Uma janela do sinal velocidade, na região na qual a velocidade está em média estacionária, foi isolado e sobre esta parte do sinal, foi obtido o espectro de frequências a partir da transformada rápida de Fourier (FFT). No caso da Fig.(2), a frequência mais importante é equivalente a 67Hz, para uma frequência de rotação média do rotor de 33.5Hz, aproximadamente.

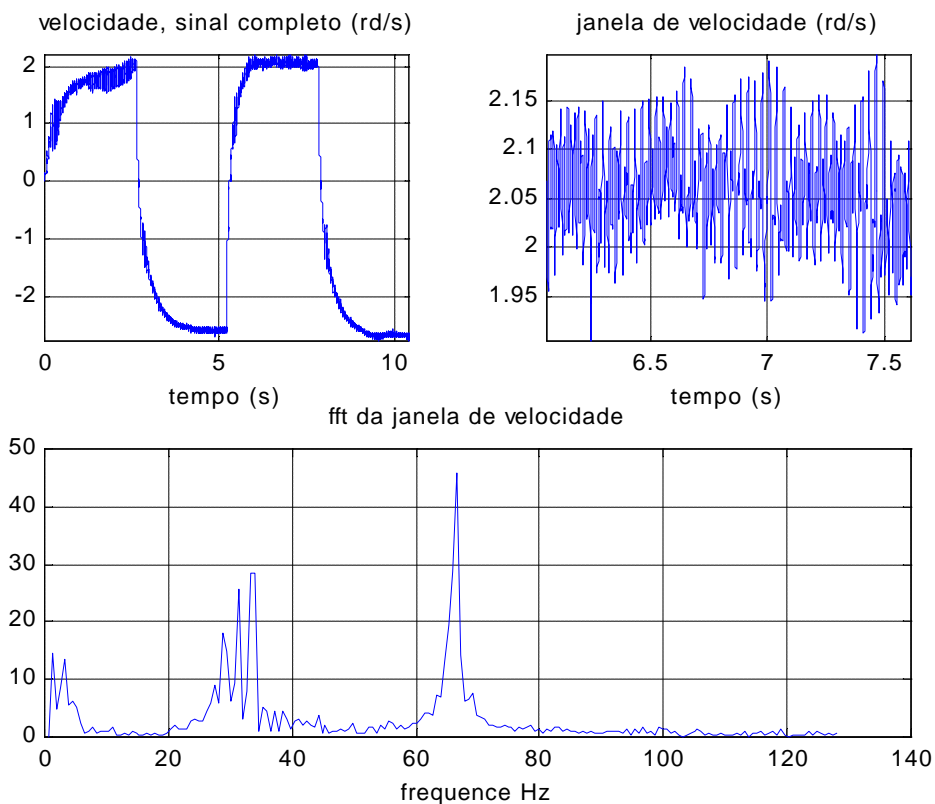


Figura 2. Espectro FFT do sinal velocidade rotor, para o motor 1, com amplitude em torque igual a 35% do torque máximo.

A repetição de resultados experimentais semelhantes, ou seja, com diferentes amplitudes em torque, mostrou que, de fato, existem flutuações nas velocidades dos rotores. Porém, não se trata de flutuações com frequências fixas e muito elevadas e sim, flutuações com frequências proporcionais às frequências de rotação dos próprios rotores. A Fig.(3) foi obtida de forma a quantificar este fenômeno. Para um total de seis experimentos, com torques em degraus alternados com amplitudes variando entre 15% a 40% do torque máximo, colocou-se, na abscissa, as frequências das flutuações e na ordenada, as frequências das rotações médias do rotor do motor 1. Verificou-se então uma perfeita linearidade, tendo as flutuações o dobro das frequências de rotação média dos rotores.

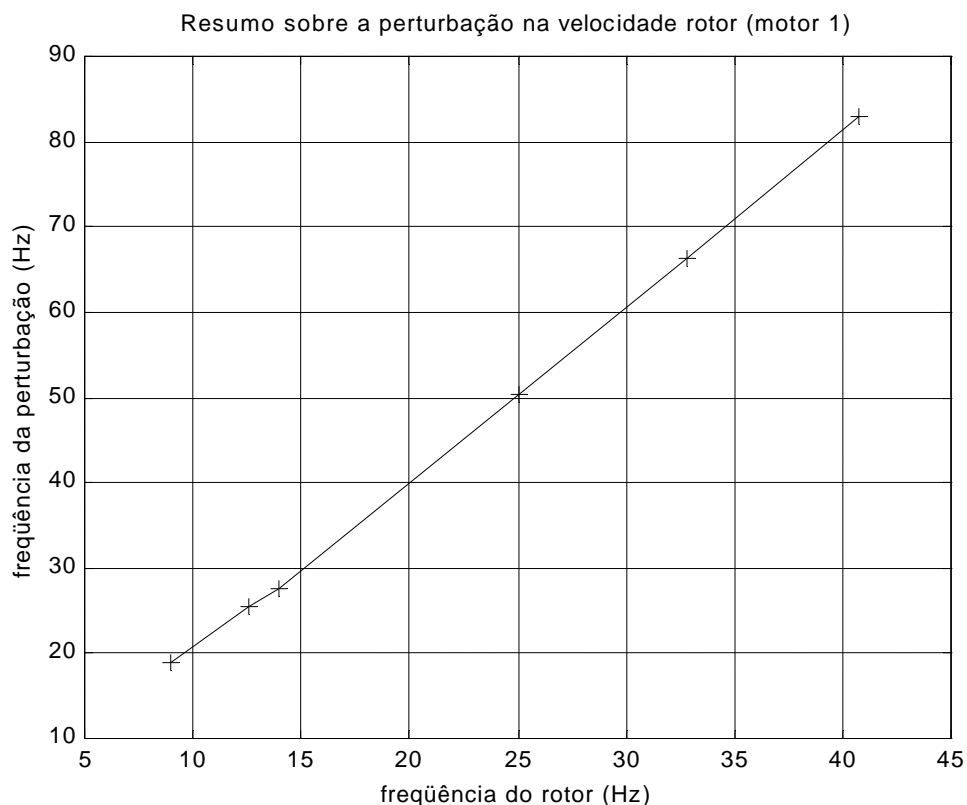


Figura 3. Relação entre as frequências das flutuações e da rotação média do rotor do motor 1.

3.1 Sobre a Causa Provável do Fenômeno

Antes de discorrer sobre a possível origem dinâmica das flutuações registradas na velocidade rotor, é importante ressaltar que resultados semelhantes aos apresentados trabalhando-se com o motor 1 também foram obtidos para o motor 2. Tem-se portanto, um fenômeno que é característico deste tipo de atuador (*harmonic-drive*). O já citado fator de proporcionalidade 2 entre as frequências deve-se em razão de uma variação na força normal de pressão entre os dentes das engrenagens do redutor de velocidade, força esta que deve alcançar os valores máximos e mínimos absolutos duas vezes por volta. Esta variação da força normal induz uma variação também no torque de atrito, indicando assim que uma parcela do torque de atrito é função da posição angular do rotor. A Fig.(4) tenta ilustrar este fenômeno. A engrenagem representada em verde escuro (dentes interiores) é rígida e fixa à árvore de saída do redutor, sendo chamada de *circular spline*. Acoplada a esta e em vermelho está representada a engrenagem flexível de dentes exteriores (*flexspline*). Dentro da *flexspline* rotaciona o gerador de defomações (*wave generator*), fixo ao eixo do rotor, gerador este que deforma a *flexspline* mudando continuamente as regiões de dentes em contato entre as duas engrenagens. As setas em azul representam a intensidade e direção da força de contato. Em resumo, a cada volta do rotor, a intensidade da força passa por seus valores máximos e mínimos absolutos duas vezes, fazendo variar o torque de atrito que por sua vez, provoca variações no torque resultante através do atuador (torque motor menos o torque de atrito). Estas variações no torque resultante estão na origem das flutuações visíveis no sinal velocidade rotor. Armstrong (1988) já havia identificado um torque de atrito função da posição angular, trabalho realizado também sobre atuadores do tipo *harmonic-drive*, embora não tenha tentado identificar a causa do fenômeno. O relato aqui apresentado pode propiciar o

desenvolvimento de um modelo e de uma posterior tentativa de compensação desta “perturbação” dinâmica, que pode ser nociva, principalmente porque pode ativar algum modo flexível estrutural.

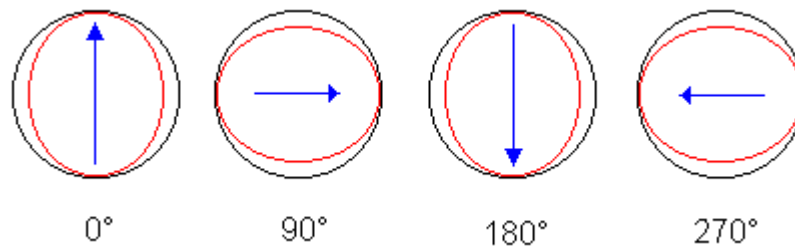


Figura 4. Posições relativas entre as árvores de entrada (rotor) e saída do redutor *harmonic-drive* durante uma volta completa do rotor.

4. O TORQUE NÃO LINEAR DE ATRITO

O objetivo desta sessão é demonstrar, a partir de resultados experimentais em malhas aberta e fechada, os efeitos dinâmicos produzidos pelo torque não linear de atrito existente em cada atuador. Em Gomes (95) há a proposição de um modelo dinâmico para o torque não linear de atrito, modelo este que tem se mostrado bastante representativo da realidade do fenômeno. A Fig.(5) contém o resultado de um experimento em malha aberta. Aplicou-se um torque senoidal ao motor 2 e mediu-se a velocidade do rotor (sinal derivado do *encoder*). As retas em vermelho representam os valores positivo e negativo do atrito seco (aproximadamente igual ao estático), ou seja, delimitam a zona morta em torque. Pode-se perceber claramente os efeitos conhecidos em língua inglesa como *stick-slip*, ou seja, movimentos intermitentes. Em realidade, quando o torque resultante (torque motor menos o torque de reação devido à inércia transportada) encontra-se no interior da zona morta em torque, o movimento é bruscamente interrompido (modo *stick*) e a velocidade permanece em zero até que o torque resultante abandone a referida zona morta (modo *slip*) (Gomes, 92). Deve ser observado que, neste caso, o torque resultante é praticamente igual ao motor, pois a senoide em torque tem um grande período e a inércia do elo 2 é pequena. Este efeito dinâmico é, sem dúvida, a pior característica dos atuadores do tipo moto-redutores em geral. Para se ter uma idéia quantificada sobre o fenômeno, os atuadores utilizados na obtenção dos resultados experimentais do presente trabalho apresentaram uma zona morta em torque de aproximadamente 15% do torque máximo que os mesmos podem desenvolver. Esta é, realmente, uma limitação bastante significativa, que depõe contra o desempenho das leis de controle em geral.

Outro efeito muito presente em resultados experimentais em malha fechada é a existência de erros de estado estacionário, erros estes devidos aos atritos não lineares. A Fig.(6) contém os resultados de um experimento para posição de referência em degrau alternado, de 0.25 *rd* de amplitude. Utilizou-se um controle Proporcional e Derivativo (PD), projetado como se os atuadores fossem lineares (considerando-se apenas o atrito viscoso (proporcional à velocidade) no modelo). No gráfico da resposta em posição, a posição de referência está em vermelho, enquanto que no último gráfico relativo ao torque motor, as retas em vermelho correspondem aos níveis de atrito seco ou estático por aproximação. Percebe-se a existência de significativos erros de estado estacionário, normalmente eliminados com componentes integrais na lei de controle, razão pela qual o controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é utilizado na quase unanimidade das aplicações industriais em robótica.

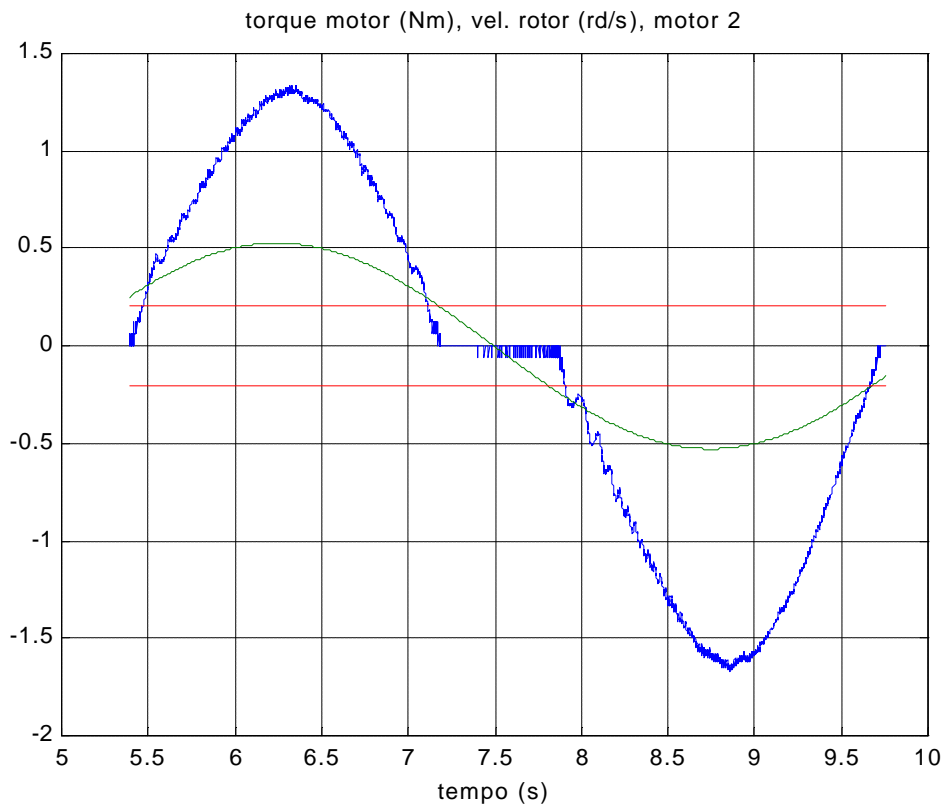


Figura 5. Resultado experimental em malha aberta, torque motor senoidal (velocidade em azul, torque em verde).

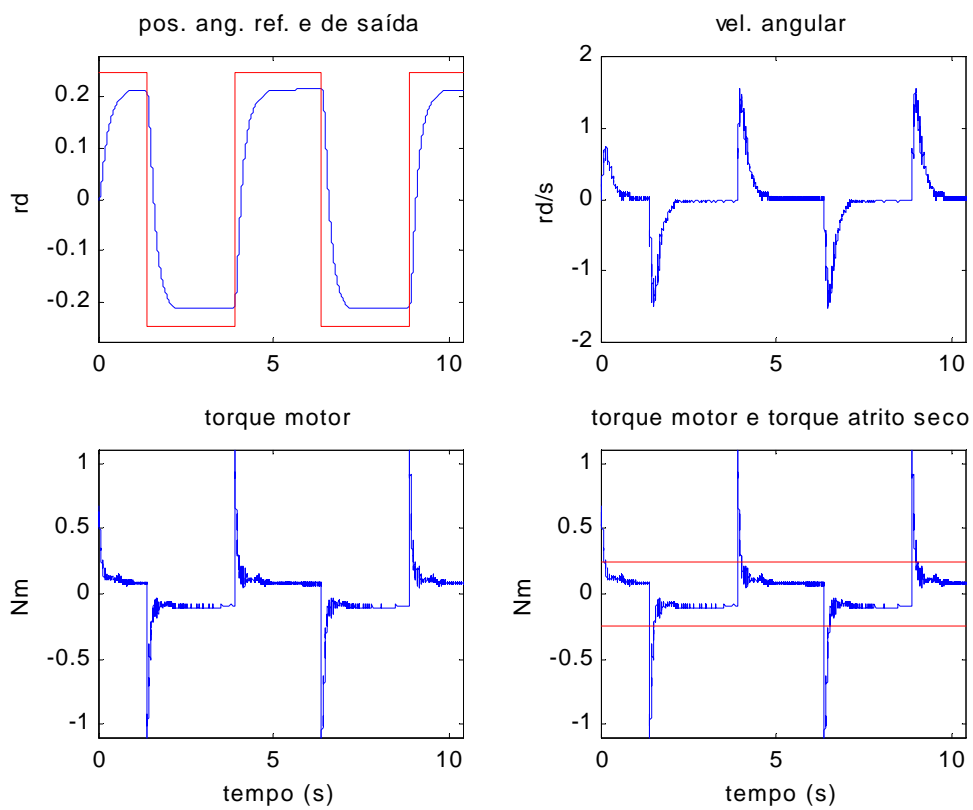


Figura 6. Controle PD aplicado ao motor 1.

5. CONCLUSÕES

No presente artigo investigou-se sobre a existência de efeitos dinâmicos diretamente associados com os atuadores, efeitos estes que são perturbações para o comportamento dinâmico global do robô-manipulador. Todos os resultados originados neste trabalho foram derivados de experimentos, obtidos com um robô do tipo SCARA, construído especificamente para permitir a realização de pesquisas. Utilizou-se moto-redutores do tipo *harmonic-drive* como atuadores, os quais são conhecidos por possuírem um excelente desempenho, com a principal característica de jogo angular zero em razão de uma grande quantidade de dentes permanentemente em contatos. Apesar da tecnologia envolvida na concepção do *harmonic-drive*, verificou-se a existência de uma zona morta em torque, de aproximadamente 15% do torque máximo de cada atuador, sendo este o pior dos problemas, dificultando em muito o desempenho de leis de controle. Desenvolveu-se um *hardware* de controle em tempo real com a possibilidade de se trabalhar com um passo de discretização pequeno, da ordem de 0.0005 segundos. Este fato permitiu discernir sobre o que a princípio, havia-se pensado ser ruído do sensor em velocidade, mas que na realidade revelou-se uma fonte de perturbação devida a uma parte do atrito ser função da posição angular do rotor. Esta perturbação gera uma flutuação na velocidade com o dobro da frequência média de rotação do rotor. Em um trabalho futuro, tentar-se-á identificar uma amplitude e um ângulo de fase de uma senoide que seria o modelo do atrito em função da posição, tentando posteriormente rejeitar esta fonte de perturbação, em um esquema de compensação em malha aberta.

6. REFERÊNCIAS

- Armstrong, B. S. R., 1988. Dynamics for robot control: friction modeling and ensuring excitation during parameter identification. PhD thesis, Stanford University.
- Craig, J. J., 1986, Introduction to robotics, mechanics and control. Addison Wesley.
- Ercegovac, M., Lang, T. and Moreno, J., 1999. Introduction to digital system. John Willey & Sons, Inc. New York.
- Ferretti, G.; Magnani, G.; Rocco, P., 1998. Compensation of motor torque disturbances in industrial robots. In IEEE Robotics and Automation Conference, pg. 2995-3001.
- Gomes, S. C. P. and Chrétien, J. P., 1992, Dynamic modeling and friction compensated control of a robot manipulator joint. In IEEE Robotics and Automation Conference, pg. 1450-55.
- Gomes, S. C. P., 1995, Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores. In XIII COBEM, CD-ROM, Belo Horizonte.
- Groover, M. P.; Weiss, M.; Nagel, R. N. and Odrey, N. G., 1989, Robótica, tecnologia e programação. McGraw-Hill.
- Max+PLUS II, 1995. MAX+PLUS II Programmable Logic Development System: AHDL, Altera Corporation.
- Park, J.; Chung, W. and Youm, Y., 1998. Analytic nonlinear H_∞ optimal control for robotic manipulators. In IEEE Robotics and Automation Conference, pg. 2709-15.
- Salcic, Z. and Smailagic, A., 1997. Digital systems design and prototyping using field programmable logic. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- Spong, M. W. and Vidyasagar, M., 1989, Robot dynamic and control. John Wiley and Sons.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

An Experimental Study About the SCARA Robot Manipulator Dynamics

Alexandre Irigon Gervini

Leonardo Alves De Paula e Silva

Vagner Santos da Rosa

Sebastião Cícero Pinheiro Gomes

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Km 8, 96201-900, Rio Grande, RS

ec4xande@super.furg.br; ec4lapys@super.furg.br; ec5vsr@super.furg.br; dmtscpg@super.furg.br

***Abstract.** The present work brings a study about the influence of the actuators on the robot-manipulator's global dynamic behavior, based on experimental results obtained with a SCARA (Selective Compliant Arm Robotic Assembly) manipulator. This manipulator was build to allow the accomplishment of researches relative to the dynamic modeling and control law synthesis. This robot (SCARA-FURG) has two harmonic-drive as actuators, which principal characteristic is to assure a null backlash in reason of the great amount of gear's teeth permanently in contact. Experimental results put in evidence stick-slip non-linear friction effects, which decrease the control law performance. It was still verified that one part of the friction torque is dependent of the rotor angular position and this effect provokes a flotation in the resultant transmitted torque through the actuators. This dynamic effect provokes flotation in the measured rotor angular velocity. Finally, we present general conclusions based on the analysis of the experimental results.*

***Keywords.** Robot, manipulator, dynamic modeling, friction, control.*