

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CONTROLADOR A ESTRUTURA VARIÁVEL E COMPENSAÇÃO DE ATRITO APLICADOS EM UM ROBÔ INDUSTRIAL

Alejandro Rafael Garcia Ramirez

Francisco Javier Triveño Vargas

Edson Roberto de Pieri

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Controle e Microinformática, Depto. de Engenharia Elétrica, P.O. Box 476, 88045-900 Florianópolis, SC, BRASIL.
E-mails: ramirez@lcmi.ufsc.br, vargas@lcmi.ufsc.br, edson@lcmi.ufsc.br

Resumo

Neste trabalho é realizado um estudo experimental sobre o controle a estrutura variável por modos deslizantes e compensação de atrito aplicado em um robô industrial tipo SCARA. Resultados experimentais que gerencia e controla os módulos de operação Os resultados experimentais alcançados são a principal contribuição deste trabalho.

Palavras chave: Robot control, sliding mode dynamics, sliding control, variable structure controllers, joint friction.

1 Introdução

Existe uma exigência natural visando aprimorar a tecnologia de construção e controle de robôs manipuladores, de forma que eles possam desempenhar tarefas mais complexas. Assim, o estudo das leis de controle de robôs manipuladores constitui uma área ainda aberta à pesquisa. Uma técnica que tem se mostrado eficiente é o Controle a Estrutura Variável (Utkin, 1977). Esta técnica garante robustez ante perturbações e incertezas nos parâmetros do modelo do robô. Os primeiros trabalhos surgiram na antiga União Soviética e as primeiras aplicações no ocidente aconteceram na década de 70. Diversos pesquisadores realizaram o estudo e aplicação desta técnica em diversas áreas, incluindo a robótica, ver por exemplo, (Bailey and Arapostathis, 1987; De Carlo et al., 1988; Guenther and Hsu, 1993; Amaral et al., 1998).

Um problema a ressaltar nos sistemas de controle de robôs manipuladores, é que eles seriam mais simples se os atuadores fossem lineares. Na realidade, os atritos presentes nos redutores de velocidade fazem com que o torque aplicado no rotor não seja transmitido à estrutura de forma linear. O conhecimento do modelo do atrito é então essencial para o desenvolvimento das leis de controle (Gomes, 1995; Kircanski and Goldenberg, 1997).

Neste trabalho é realizado um estudo experimental sobre o controle de posição a estrutura variável de robôs manipuladores baseado na metodologia desenvolvida em (Bailey and Arapostathis, 1987). Experimentos são realizados em um robô manipulador industrial tipo SCARA, produzido pelo ETH-Suíça. Através dos resultados demonstra-se a importância da compensação do atrito, a qual constitui um aporte à lei de controle apresentada.

2 Controle a Estrutura Variável

O controle por modos deslizantes utiliza uma lei de controle chaveada a alta velocidade cujo objetivo é dirigir a trajetória de estados do sistema a uma superfície especificada durante a fase do projeto, chamada de superfície de deslizamento. Uma vez que a trajetória dos estados do sistema alcança esta superfície, mantém-se nela para todos os tempos subsequentes, deslizando sobre ela até o equilíbrio (Utkin, 1977).

O controle aplicado faz com que os vetores tangentes à trajetória do sistema apontem à superfície de deslizamento, conduzindo e confinando os estados sobre a superfície. Se diz que os estados deslizam nesta superfície (Utkin, 1977).

Um sistema não-linear de ordem n expresso na sua forma regular, pode ser controlado por uma lei de controle a estrutura variável de ordem m . Isto é representado através da seguinte equação (Utkin, 1977):

$$\dot{x} = f(x, t, u), \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad u \in \mathcal{R}^m \quad (1)$$

e a lei de controle chaveada é dada por:

$$u_i(x, t) = \begin{cases} u_i^+, & s_i(x, t) < 0 \\ u_i^-, & s_i(x, t) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$i = 1 \dots m$$

onde $s_i(x, t)$ é uma função escalar do vetor de estado, sendo que o conjunto de funções $s_i(x, t) = 0$ definem uma hipersuperfície no espaço de estados para onde a trajetória do sistema deve ser conduzida (Utkin, 1977).

2.1 Camada Limite e Chaveamento

Devido ao chaveamento extremamente rápido da lei de controle, é comum a ocorrência de um fenômeno denominado *chattering*. No caso ideal, uma vez que a trajetória de estados atinja a superfície $S(x, t) = 0$ em um instante t_i ela permanece deslizando nesta superfície para todos os tempos subsequentes (Utkin, 1977).

Entretanto, nos casos reais, a limitação física da velocidade de resposta dos atuadores, tais como atraso, zona morta etc., implicam que a condição ideal para o modo deslizante não é alcançada. Ocorre então uma oscilação da trajetória de estados em torno da superfície de deslizamento. com *chattering* (De Carlo et al., 1988).

Para reduzir o efeito do *chattering* tem-se adotado o conceito de *camada limite*. Tal conceito considera não somente o deslizamento ocorrendo na superfície, mas ao longo de uma vizinhança em torno da superfície de deslizamento (Utkin, 1977).

O que deseja-se obter através da aplicação da camada limite é um chaveamento *mais suave*, em relação ao chaveamento extremamente rápido da lei de controle. Assim, a equação (2) é alterada para adotar a seguinte forma (De Carlo et al., 1988):

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\epsilon}\right) = \begin{cases} \text{sign}(s), & \text{se } |s| \geq \epsilon \\ \frac{s}{\epsilon}, & \text{se } |s| < \epsilon \end{cases} \quad (3)$$

3 Modelo do Robô

As equações que descrevem o comportamento dinâmico de um robô manipulador aparecem descritas em diversos trabalhos, ver por exemplo, (Asada and Slotine, 1986; Yoshikawa,

1990).

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = u \quad (4)$$

onde θ é o vetor das posições angulares de dimensão $n \times 1$; $\dot{\theta}$ é o vetor das velocidades angulares de dimensão $n \times 1$; $M(\theta)$, $C(\theta, \dot{\theta})$ e $G(\theta)$ são as matrizes de inércia, força centrípeta e de coriolis, e a força gravitacional, respectivamente. Sendo u o vetor de forças generalizadas aplicadas em cada uma das juntas.

O robô usado nos experimentos (ver figura 1) tem 4 graus de liberdade, do tipo SCARA. Foi construído pelo ETH de Suíça para fins de pesquisa em controle de força-posição.



Figure 1: Robô SCARA

Neste trabalho estamos interessados apenas nas duas primeiras juntas do robô, as quais têm uma dinâmica similar a de um robô planar.

A tabela 1 mostra os valores nominais dos parâmetros do robô:

Table 1: Parâmetros do robô

Parâmetros	<i>Elo 0</i>	<i>Elo 1</i>
Inércia (kgm^2)	0.23	0.16
Massa (kg)	15	12
Longitude (m)	0.25	0.25
Centro de massa (m)	0.10	0.18

4 Projeto do Controlador

A seguir são definidas as etapas para a implementação do controlador a estrutura variável. Os passos do projeto estão baseados na metodologia apresentada em (Bailey and Arapostathis, 1987).

4.1 Projeto da superfície de deslizamento

A superfície de deslizamento é uma função linear dos estados do sistema:

$$s_i(x, t) = s_i(\theta, \dot{\theta}, t) = c_i[\theta_i - \theta_{d_i}] + [\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{d_i}] \quad (5)$$

tal que $c_i > 0$ são constantes; e θ_i , $\dot{\theta}_i$, θ_{d_i} , $\dot{\theta}_{d_i}$ são as posições obtidas e desejadas em cada uma das juntas. Os erros de posição e velocidade são definidos como:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_i &= \theta_i(t) - \theta_{d_i}(t) \\ \tilde{\dot{\theta}}_i &= \dot{\theta}_i(t) - \dot{\theta}_{d_i}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

4.2 Projeto da lei de controle

Os ganhos do controlador são dados pela seguinte expressão:

$$K_i = \sum_{j=1}^2 [\bar{M}_{ij} | \ddot{\theta}_{d_j} - c_j \tilde{\dot{\theta}} | + \bar{C}_{ij} | \dot{\theta}_j - s_j |] + \xi_i \quad (7)$$

onde ξ_i é um vetor de projeto, \bar{M}_{ij} e \bar{C}_{ij} são as componentes das matrizes de inércia e coriolis, obtidas a partir do modelo dinâmico do robô (Bailey and Arapostathis, 1987):

$$\bar{M}_{ij} = \max M_{ij}(\theta) \quad | \quad \bar{C}_{ij} = \max \bar{C}_{ij}(\theta, \dot{\theta}) \quad (8)$$

4.2.1 Lei de controle

A lei de controle é:

$$u_i = -K_i \text{sign}(s_i) \quad (9)$$

onde u_i são os torques de controle aplicados em cada uma das juntas do robô.

4.2.2 Lei de controle com camada limite

Para a redução do *chattering* a lei de controle é modificada pela seguinte função saturação:

$$u_i = -K_i \text{sat}\left(\frac{s_i}{\epsilon}\right) \quad (10)$$

tal que K_i são os ganhos definidos na equação (7); e s_i é definida como em (5).

A equação (10) é modificada para incluir um termo para a compensação do atrito nas juntas do robô:

$$u_i = -K_i \text{sat}\left(\frac{s_i}{\epsilon}\right) + F_i(x) \quad (11)$$

tal que $F_i(x)$ representa o torque devido ao atrito.

5 Modelagem do atrito

A função $F_i(x)$ da equação (11) usualmente tem duas componentes, sendo que uma representa o atrito estático, e a outra, o atrito viscoso.

$$F(x) = B \dot{\theta} + C \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (12)$$

onde B e C são os coeficientes de atrito viscoso e estático respectivamente.

Em particular, neste trabalho a expressão (13) permite determinar os torques para a compensação do atrito. Cabe ressaltar que a função F e os coeficientes a , b , c são diferentes para cada tipo de robô e, em geral, são conhecidos no módulo de controle do robô.

$$F = offset + sign(\dot{\theta}) (a + b abs(\dot{\theta}))(1 - e^{-c abs(\dot{\theta})}) \quad (13)$$

A tabela 2 mostra os valores dos coeficientes utilizados na compensação de atrito. Os coeficientes a e b acompanham a parcela viscosa do atrito, e o c , a estática. Também são mostrados os valores de c_i (ganhos da superfície) e de ϵ_i para a redução do chattering.

Table 2: Coeficientes da lei de controle

Coeficientes	<i>Junta0</i>	<i>Junta1</i>
Offset	0.3	-0.5
a	12	5.9
b	6	2.3
c	10	10
c_i	10	10
ϵ_i	0.3	0.5

Cabe ressaltar que na literatura são descritas outras formas de modelagem de atrito, ver por exemplo (Gomes, 1995). Isto será objeto de estudo em trabalhos futuros.

6 Resultados experimentais

A figura 2 mostra de forma simplificada a instalação experimental utilizada.

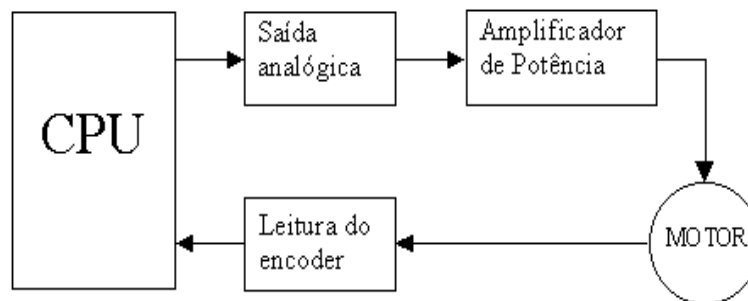


Figure 2: Estrutura de controle

O controle é implementado na forma de algoritmo no bloco CPU (Unidade Central de Processamento, neste caso o PC), sendo que a linguagem de programação do robô é XOberon¹ (Reiser, 1991). Existem diversos módulos que acompanham o robô e que permitem a geração de trajetórias, leituras das posições e velocidades nas juntas,

¹XOberon é uma extensão da linguagem Oberon. Permite uma programação em estilo orientado a objeto com característica de tempo real.

compensação do atrito, transformações de coordenadas, leituras a partir de um sensor de força, entre outras funções. Estes módulos são abertos e podem ser reprogramados (Weihmann, 1999).

Basicamente, o algoritmo de controle gera um torque para cada junta com o objetivo de compensar os erros de posição e velocidade na trajetória desejada. Estes torques são então convertidos em tensão e aplicados nos motores do robô. A leitura das posições das juntas é realizada através de codificadores angulares (*encoders*), os quais entregam o valor lido ao algoritmo de controle, onde é determinado o torque que vai ser aplicado para reduzir o erro de seguimento, repetindo-se o processo.

O período de amostragem é de $1ms$, que é suficientemente pequeno em relação às velocidades de operação projetadas, e em relação aos ganhos do controlador e da superfície. Estes ganhos foram ajustados experimentalmente. O valor da camada limite foi obtido considerando as limitações físicas dos atuadores, como mostra a tabela 3.

Table 3: Constantes de tempo dos motores

Constantes	<i>Junta0</i>	<i>Juntas1, 2, 3</i>
Elétrica (ms)	1.1	2.1
Mecânica (ms)	1.4	1.7

Na figura 3 mostra-se a aplicação da lei de controle (10) (Bailey and Arapostathis, 1987) para uma trajetória *spline* de quinta ordem projetada para a junta 0 do robô, enquanto a junta 1 permanece parada. Observa-se a presença de erros de seguimento, pois o robô não acompanha a trajetória desejada.

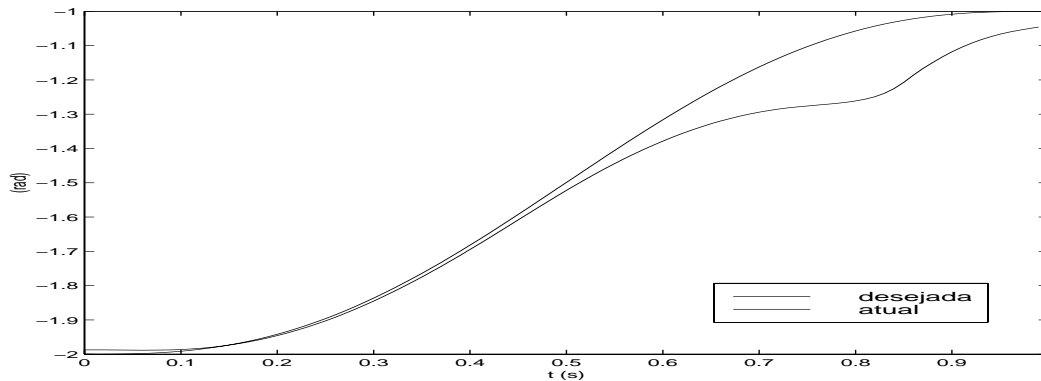


Figure 3: Trajetória de posição e posição desejada

Na figura 4 mostra-se a aplicação da lei de controle (10) (Bailey and Arapostathis, 1987) para uma trajetória *spline* de quinta ordem projetada agora para a junta 1 do robô, enquanto a junta 0 permanece parada. Observa-se a presença de erros de seguimento consideráveis.

Nas figuras 5 e 6 mostra-se o resultado da aplicação da lei de controle (11), nas mesmas trajetórias projetadas para cada junta de maneira independente. Neste caso foi

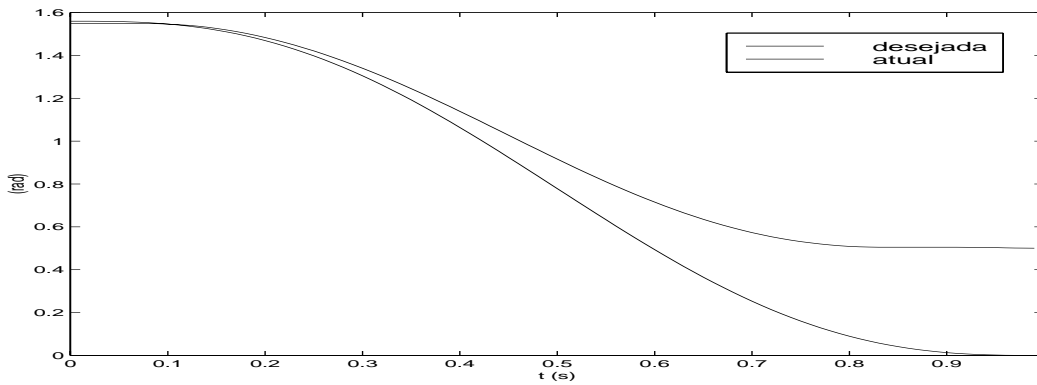


Figure 4: Trajetória de posição e posição desejada

modificada a lei de controle proposta em (Bailey and Arapostathis, 1987) para incluir o termo da compensação de atrito considerando a equação (13). Observa-se a diminuição significativa dos erros de seguimento em ambas as juntas, pois o robô acompanha as trajetórias desejadas.

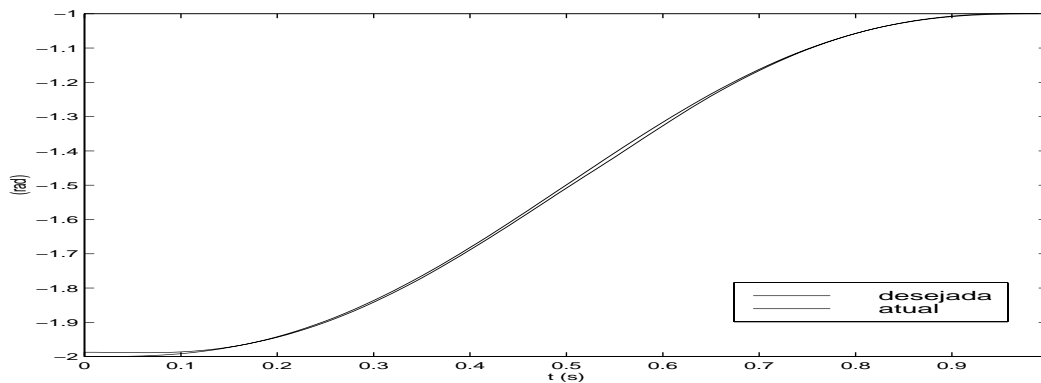


Figure 5: Trajetória de posição e posição desejada

Nas figuras 7 e 8 mostra-se a aplicação da lei de controle (10) considerando as mesmas trajetórias dos testes anteriores, só que agora projetadas simultaneamente nas juntas do robô. Observa-se, novamente, a presença de erros de seguimento quando não é compensado o atrito presente nas juntas.

Nas figuras 9 e 10 mostra-se a aplicação da lei de controle (11) considerando as mesmas trajetórias das figuras 7 e 8, projetadas simultaneamente nas juntas 0 e 1 do robô.

Observa-se a redução sinificativa dos erros de seguimento quando é compensado o atrito presente nas juntas

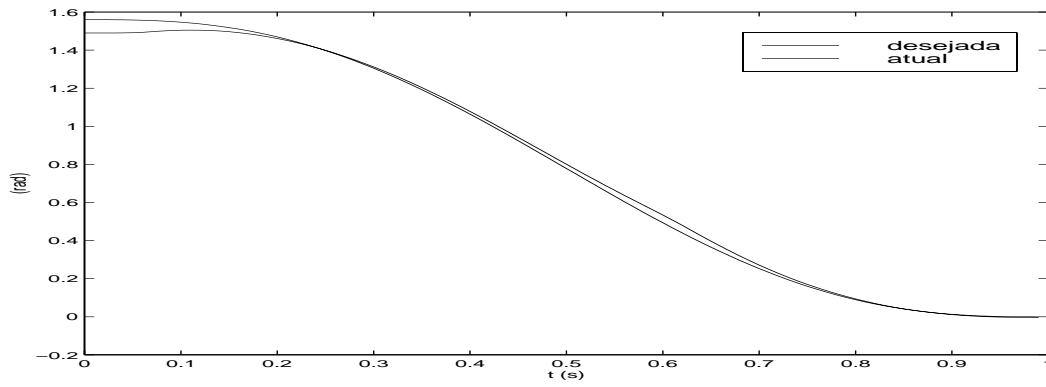


Figure 6: Trajetória de posição e posição desejada

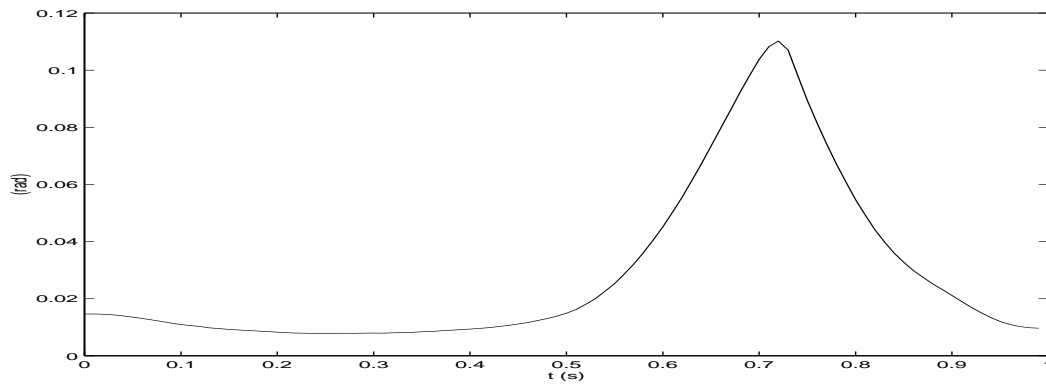


Figure 7: Erros de posição na junta 0

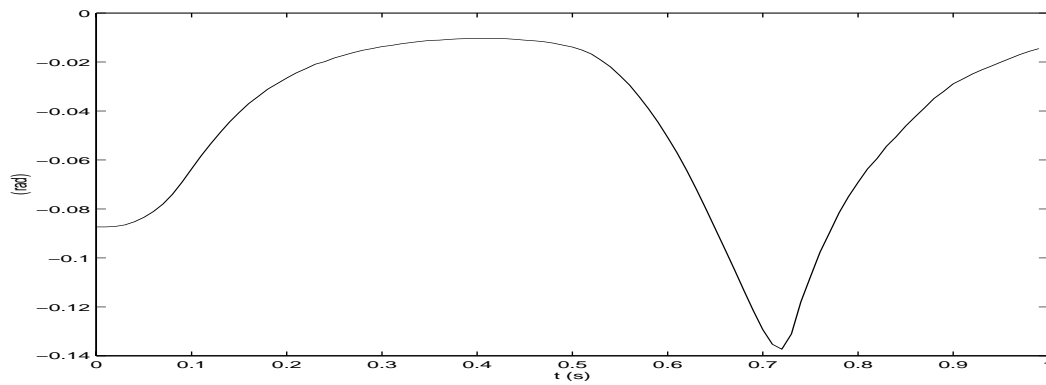


Figure 8: Erros de posição na junta 1

7 Conclusões

Foi avaliada experimentalmente a estratégia de controle descrita em (Bailey and Arapostathis, 1987) nas duas primeiras juntas de um robô industrial tipo SCARA. Considerando os erros de posição que surgiram na realização dos testes, foi aperfeiçoada esta metodologia incluindo o termo para compensação de atrito (estático e dinâmico), o qual implicou numa considerável melhoria no desempenho do robô. Este trabalho mostrou a importância desta dinâmica, a qual usualmente não é considerada no modelo do robô nem nas leis de controle, mas que pode afetar a qualidade do controle e o desempenho do robô industrial. Trabalhos futuros estão dirigidos ao estudo e implementação de outras formas de modelagem de atrito, incluindo a extensão destes resultados em robôs com transmissões flexíveis.

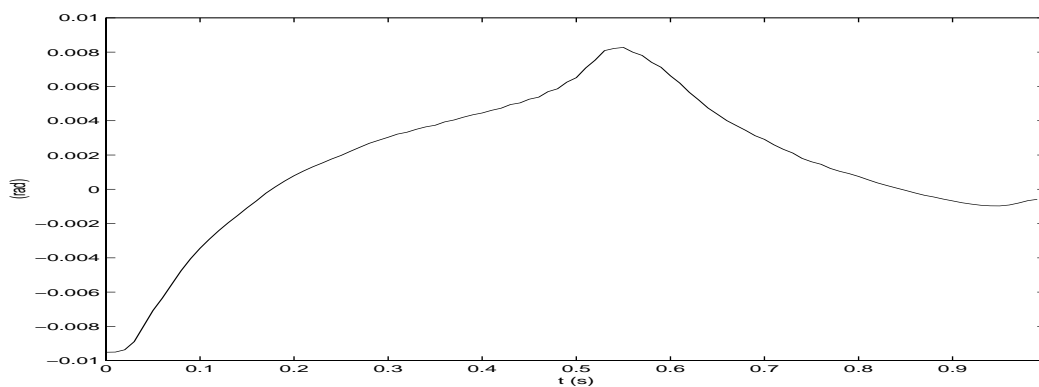


Figure 9: Erros de posição na junta 0

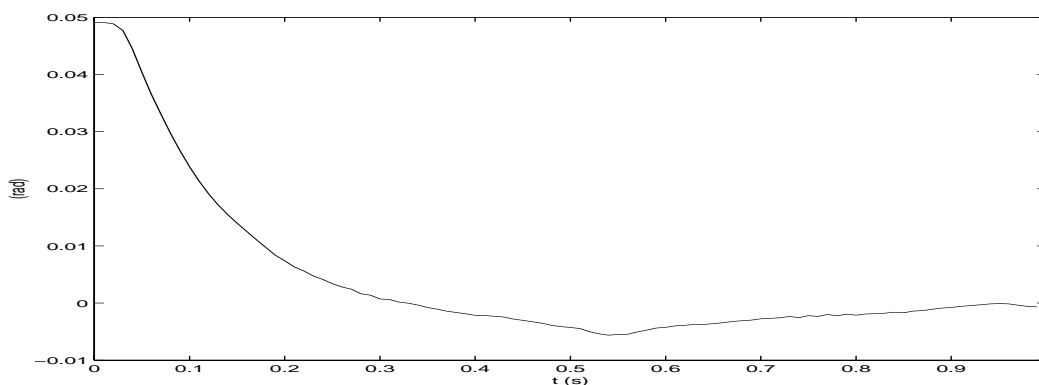


Figure 10: Erros de posição na junta 1

8 Agradecimentos

Agradecemos à CAPES pelo suporte material e financeiro, o qual possibilitou a realização deste trabalho.

References

- Amaral, S. D., De Pieri, E. R. and Guenther, R. (1998). Controle a estrutura variável de um robô manipulador em ambiente cinemático, *Congreso Brasileiro de Automática* **3**(1): 1113–1118.
- Asada, H. and Slotine, J. E. (1986). *Robot Analysis and Control*, Jonh Willey and Sons, New York.
- Bailey, E. and Arapostathis, A. (1987). Simple sliding mode control scheme applied to robot manipulators, *International Journal of Control* **45**(4): 1197–1209.
- De Carlo, R. A., Stanislaw, H. Z. and Mathews, G. P. (1988). Variable structure control of nonlinear multivariable systems a tutorial, *IEEE Proceedings* **76**(4): 212–232.
- Gomes, S. C. P. (1995). An experimental study of nonlinear stiffness, hysteresis, and friction effects in robot joints with harmonic drives and torque sensors, *Congreso Brasileiro de Engenharia Mecânica* pp. 1–10.
- Guenther, R. and Hsu, L. (1993). Variable struture adaptative cascade control of rigid-link electrically driven robot manipulators, *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*.
- Kircanski, N. M. and Goldenberg, A. A. (1997). Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores, *The International Journal of Robotics Research* **16**(2): 214–239.
- Reiser, M. (1991). *The Oberon System: User Guide and Programer's Manual*, ACC Press, Inc., New York.
- Utkin, V. I. (1977). Variable structure with sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic Control* **1**(1): 212–222.
- Weihmann, L. (1999). *Módulos de operação do Robô Inter e linguagem de programação XOberon*, Disertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Yoshikawa, T. (1990). *Foundations of Robotics Analysis and Control*, The MIT Press, EUA.