CONTROLE BASEADO EM ESTRUTURA VARIÁVEL APLICADO A ATUADORES ROBÓTICOS

SAMUEL DA SILVA GOMES[1], TIAGO GUIMARÃES MORAES[2], SEBASTIÃO CÍCERO DE PINHEIRO GOMES[3]

Resumo – Atuadores possuem não linearidades que dificultam o controle. A principal delas é o atrito não linear que provoca zona morta em torque e comportamento do tipo adere-desliza ("*stick-slip*"). Todos esses problemas dificultam o projeto de leis de controle. O controle a estrutura variável é adequado a sistemas com dinâmicas não modeladas. O presente trabalho compara três implementações de controles diferentes, PID, Sliding Mode com superfície simples e com superfície integral. As simulações demonstraram, que tanto o controle PID quanto o controle com superfície integral apresentaram um ótimo desempenho no seguimento de trajetórias, considerando-se atritos não lineares na dinâmica do atuador. Porém, o controle a estrutura variável com superfície simples não apresentou o mesmo desempenho.

Palavras-chaves: Atuador robótico, atrito, leis de controle, controle a estrutura variável e dinâmica não linear.

SLIDING MODE CONTROL APPLIED TO ROBOTIC ACTUATORS

[1] Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – FURG, samgomesfurg@bol.com.br
[2] Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – UFRGS, tiagopinta@yahoo.com.br
[3] Professor Dr. em Automação, Instituto de Matemática, Estatística e Física – FURG, sebastiaogomes@furg.br

Abstract – Actuators have nonlinearities that add difficulties to the control performance. The main one is the nonlinear friction that causes the dead zone in torque and stick-slip behavior. All these problems hamper the design of control laws. The variable structure control (sliding mode control) is suitable for systems with non-modeled or unknown dynamics. This paper compares three different implementations of control, PID, Sliding Mode with simple surface and Sliding Mode with integral surface. The simulations showed that both the PID control as the control with integral surface showed a great performance in trajectory tracking, considering non-linear friction in the dynamics of the actuator. However, the variable structure control with simple surface did not show the same performance.

Key words: Robotic actuators, friction, control laws, sliding mode control and nonlinear dynamics.

INTRODUÇÃO

A modelagem de atuadores robóticos constitui um desafio permanente devido às dificuldades apresentadas no projeto de um controle, pois esse é baseado na modelagem (nem sempre próxima o suficiente do real) de uma dinâmica da natureza. Existem incertezas nos modelos dinâmicos, como por exemplo, a presença de não linearidades devidas ao atrito às quais dificultam muito o projeto de controle para atuadores robóticos e, por isso, este assunto tem sido o objeto de vários trabalhos de pesquisa. Em [1] é apresentada uma modelagem mais realista para atuadores robóticos, ao considerar não linearidades no atrito. Em [2] existe um estudo relatando como a dinâmica dos atuadores robóticos influência a dinâmica de estruturas flexíveis.

Modelagens mais realistas dos problemas recaem invariavelmente em modelos não-lineares e assim, muitos trabalhos têm utilizado o controle que utiliza estrutura variável (modos deslizantes (*sliding-mode*)), controle esse que foi desenvolvido na

União Soviética na década de 60 [3] e representa uma boa alternativa para as não linearidades e incertezas paramétricas dos modelos. Em [4] foi utilizado o *sliding-mode* para o controle do veículo subaquático não tripulado NEROV, apresentando bons resultados de simulações. Em [5] essa técnica foi utilizada para o controle do freio ABS de carros, tendo sido também obtidos bons resultados.

Este artigo apresenta o controle de atuadores robóticos do tipo moto-redutor, através de três estratégias diferentes, para fins comparativos, utilizando-se o modelo dinâmico proposto em [6], com o atrito não-linear. A seção II apresenta uma rápida discussão acerca do atuador robótico, sua utilidade e modelagem. As seções III e IV tratam do controle PID (proporcional integral e derivativo) e dos controles a estrutura variável (*sliding mode*) aplicados para o modelo dinâmico do atuador. Por fim, na seção V, apresentam-se os resultados das simulações realizadas no Matlab, estando as conclusões na seção VI. O controle baseado em estrutura variável é conhecido por apresentar bom comportamento no transitório, capacidade de rejeitar dinâmicas não-modeladas, insensibilidade a não linearidades da planta ou variação de parâmetros e grande robustez [11], sendo por estas razões que se investigou, no presente artigo, a aplicação deste tipo de controle na dinâmica não linear de um atuador robótico.

O ATUADOR ROBÓTICO

Os atuadores elétricos do tipo moto-redutor *harmonic-drive* têm grande utilização na robótica. Eles estão presentes, por exemplo, nas juntas rotacionais de manipuladores robóticos. Essa utilização se justifica em razão do seu jogo angular praticamente nulo e ainda, da sua grande capacidade de ampliação do torque [6]. Porém, este tipo de atuador possui uma relevante zona morta em torque, ou seja, qualquer torque inferior ao atrito estático não passa para a estrutura a ser controlada. O atuador que serviu de base para a determinação do modelo dinâmico para o estudo apresentado neste artigo possui zona morta em torque equivalente a aproximadamente 10,8% do seu torque máximo.

A Fig. 1 mostra a foto de um atuador do tipo *harmonic-drive*. Nela vê-se o encoder incremental, o motor DC e o redutor *harmonic-drive*.



Fig. 1. Foto do atuador do tipo moto-redutor *harmonic-drive.*

a) Modelo do atuador

O modelo dinâmico do atuador é baseado no modelo proposto por [6]. A tabela 1 mostra a constante de inércia e o torque máximo do atuador modelado.

Parâmetro	**Valor**
Inércia do rotor (*I*)	0.0133 *kg.m²*
Torque máximo	1.74 *N.m*

Tabela 1. Parâmetros do atuador

A fig. 2 mostra um desenho simplificado do atuador, com uma aproximação rígida de 1 dof (*degree of freedom*). O modelo é descrito a partir da seguinte equação:

$$I\ddot{\theta} + f_v^*(\dot{\theta}, T_m)\dot{\theta} = T_m \quad (1)$$

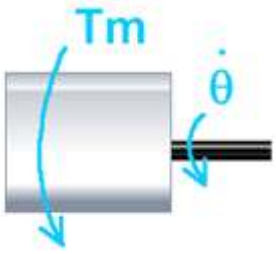


Fig. 2. Esquema do atuador, com aproximação rígida.

onde *I* é a inércia do rotor, f_v^* é o coeficiente de atrito viscoso variável, função não linear da velocidade $\dot{\theta}$ e do torque motor T_m, conforme definido em [6].

b) Modelo do atrito

O modelo de atrito utilizado, ao contrário de todos os outros modelos de atrito encontrados na literatura, considera o atrito como um esforço interno à dinâmica

própria do sistema e não como um esforço externo. Em [1] há um algoritmo que determina o coeficiente de atrito viscoso variável, conhecendo-se a velocidade angular do rotor e o torque motor aplicado. Na forma de estado, a dinâmica com atrito não linear assume a forma:

$$\begin{pmatrix}\dot{\theta}\\ \ddot{\theta}\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & \frac{-f_v^*(\dot{\theta},T_m)}{I}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\theta\\ \dot{\theta}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\ \frac{1}{I}\end{pmatrix}T_m = \dot{\vec{x}} = A(\vec{x})\vec{x} + BT_m \quad (2)$$

Com a equação (2) percebe-se que toda a não linearidade está descrita na matriz da dinâmica própria do sistema, ou seja, o atrito não é externo (motor), como na maioria dos modelos tradicionais de atrito.

CONTROLE PID

Neste tipo de ação de controle combinam-se as ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle. O objetivo é aproveitar as características de cada ação para melhorar o comportamento transitório do sistema. O sinal de controle gerado possui a forma:

$$T_m(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} + k_i \int_0^t e(t)\,dt \quad (3)$$

onde:

k_p é o ganho proporcional, k_d é o ganho derivativo, k_i é o ganho integral e $e(t)$ é o erro em posição, definido como sendo a posição de referência menos a de saída do atuador.

Portanto, neste tipo de ação de controle, o efeito desestabilizador do controle PI é diminuído pela ação derivativa que tende a ampliar a estabilidade do sistema tornando-o mais amortecido [7].

SLIDING MODE

Esta sessão traz o desenvolvimento do controle não linear a modos deslizantes (Sliding mode, [8]).

Inicialmente considera-se o sistema na forma de estado. Assim, a idéia principal é projetar o controle de modo que todas as trajetórias do sistema convirjam para a superfície de controle e nela permaneçam indefinidamente. Na superfície definida, as trajetórias descritas pelo vetor de estado deslizam assintoticamente para os valore desejados (*set points* ou valores de referência), justificando assim o nome

de modo de deslizamento. A Fig. 3 traz uma ilustração gráfica da atuação do controle, na tentativa de conduzir o estado para a referência ou estado desejado.

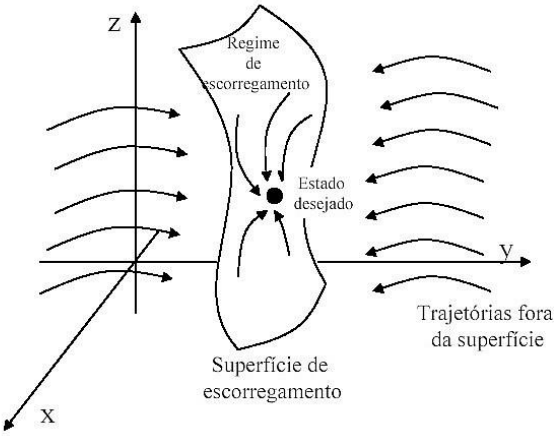


Fig. 3. Trajetórias convergindo para superfície de deslizamento.

Considerando-se uma única entrada, o sistema pode ser posto na seguinte forma de estado:

$$x^n = f(X) + b(X)u \quad (4)$$

onde o vetor X é o vetor de estados do sistema $X = [x\ \dot{x} \ldots x^{n-1}]^T$, x é a saída de interesse, u é a entrada de controle e as funções genéricas $f(X)$, $b(X)$ são conhecidas, mas com uma faixa de incertezas em relação aos seus parâmetros.

Sendo X_d a referência desejada para os estados, o erro na trajetória é dado por

$$\tilde{X} = X_d - X \quad (5)$$

Portanto o projeto deve ser feito para que os estados *X* sigam X_d.

a) Superfície simples:

Definindo-se $\tilde{x} = x_d - x$ (erro em posição), a superfície de deslizamento simples $s(X,t)$ no espaço R^n é definida a partir da seguinte equação:

$$s(X,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{x} \quad (6)$$

Para $n = 2$, por exemplo:

$$s = \dot{\tilde{x}} + \lambda\tilde{x} \quad (7)$$

sendo λ uma constante positiva. Derivando-se (7) apenas uma vez aparece o termo x^n, o qual é substituindo em (4), possibilitando determinar a entrada *u* (sinal de controle).

Considera-se um sistema de segunda ordem dado por:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}, t) + u(t) \tag{8}$$

A superfície é definida por *s*(*X*,*t*)=0, obtida em (6) com n=2. Derivando-se (7) em relação ao tempo e após substituindo-se em (8) tem-se:

$$\dot{s} = \ddot{x}_d - \ddot{x} + \lambda\dot{\tilde{x}} = -f - u + \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} = 0 \tag{9}$$

Na ausência de erros de modelagem e de perturbações o controle teria a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d + \lambda\dot{\tilde{x}} \tag{10}$$

onde $\hat{f}$ e $\hat{u}$ são estimativas de f e *u* respectivamente. Para se lidar com essas incertezas do modelo, acrescenta-se um termo descontínuo, que é função do sinal da superfície s:

$$u = \hat{u} + k(x, \dot{x}, t)sinal(s) \tag{11}$$

onde k representa o ganho do termo chaveado:

$$sinal(s) = \begin{cases} 1, \text{se } s > 0; \\ 0, \text{se } s > 0; \\ -1, \text{se } s < 0. \end{cases} \tag{12}$$

Define-se uma "camada limite" de largura ϕ da superfície s, para suavizar a função sinal (12) e evitar assim o fenômeno de *chattering*, o qual corresponde a oscilações ou transições do sinal do controle em torno do valor zero. Assim, utiliza-se:

$$u = \hat{u} + k(x, \dot{x}, t)sat\left(\frac{s}{\phi}\right) \tag{13}$$

onde:

$$sat(s/\phi) \begin{cases} sinal(s), se \left|\frac{s}{\phi}\right| > 1; \\ \frac{s}{\phi}, se \left|\frac{s}{\phi}\right| \leq 1; \end{cases} \tag{14}$$

Aplicando-se o modelo do atuador (1) em (9) e (10) e adotando-se :

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{\tilde{\theta}},\ \ddot{x} = \ddot{\theta},\ \ddot{x}_d = \ddot{\theta}_d,\ u = T_m \tag{15}$$

$$\hat{u} = \hat{T}_m \ e \ f = -c\dot{\theta} \tag{16}$$

obtém-se duas equações, para $\dot{s}$ e $\hat{T}_m$, respectivamente:

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d + \frac{c}{I}\dot{\theta} - \left(\frac{1}{I}\right)T_m + \lambda\dot{\tilde{\theta}} \tag{17}$$

$$\hat{T}_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + I\lambda\dot{\tilde{\theta}} \tag{18}$$

b) Superfície Integral:

Para a superfície integral, o raciocínio é o mesmo, mas a superfície $s(t)$ assume a seguinte forma:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \left(\int_0^t \tilde{x} dr\right) \quad (19)$$

Para n=3, por exemplo:

$$s = \dot{\tilde{x}} + 2\lambda\tilde{x} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{x} dr \quad (20)$$

Derivando-se (19) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\dot{s} = \ddot{\tilde{x}} + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (21)$$

sendo que, neste caso, a função do controle estimado assume a forma:

$$\hat{u} = -\hat{f} + \ddot{x}_d + 2\lambda\dot{\tilde{x}} + \lambda^2\tilde{x} \quad (22)$$

Por fim, aplica-se (1) nas equações (21) e (22), usam-se as relações (15) e (16) e obtém-se o controle estimado e a superfície integral do modelo:

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d + \frac{c}{I}\dot{\theta} - \left(\frac{1}{I}\right) T_m + 2\lambda\dot{\tilde{\theta}} T_m + \lambda^2\tilde{\theta} \quad (23)$$

$$\hat{T}_m = I\ddot{\theta}_d + c\dot{\theta} + 2I\lambda\dot{\tilde{\theta}} + I\lambda^2\tilde{\theta} \quad (24)$$

SIMULAÇÕES

A seguir, são apresentadas simulações que ilustram o comportamento do atuador robótico do tipo harmonic-drive com a aproximação rígida de 1 dof, considerando a dinâmica não linear do modelo. Os controles aplicados no modelo foram, EVS-NL (estrutura variável com superfície simples e atrito não-linear), EVI-NL (estrutura variável com superfície integral e atrito não linear) e PID-NL (proporcional, integral e derivativo com atrito não linear). A trajetória a ser seguida foi gerada adotando-se um perfil de velocidade trapezoidal, com posição inicial de 0 rd, posição final igual a pi/2 rd e passo de discretização de 0.005s. O objetivo da trajetória era chegar até a posição final em 3 segundos e lá manter-se por mais um segundo. Nos gráficos tem-se a referida trajetória de referência em vermelho, enquanto que a posição angular de saída está em azul. Das janelas gráficas a seguir (figuras 4-6), o gráfico superior esquerdo mostra a posição angular, o superior direito a velocidade

angular, o inferior esquerdo o erro em posição e o inferior direito o torque motor de controle. É importante ressaltar que os projetos de controle foram realizados considerando-se o modelo nominal igual à planta física, ou seja, considerou-se a dinâmica com o atrito linear (proporcional à velocidade). Simulações com as leis de controle sobre o modelo nominal não mostraram diferenças significativas entre elas, ou seja, as leis de controle têm desempenhos aproximadamente iguais quando se considera o modelo nominal linear e, por esta razão, foram omitidas no presente artigo. As simulações mostradas a seguir foram realizadas considerando-se o atrito não linear do atuador e, portanto, procuram ressaltar qual lei de controle consegue manter o bom desempenho, mesmo em presença de dinâmicas não modeladas (não consideradas no modelo nominal).

a) Simulação 1:

Observa-se que no sistema de controle EVS-NL, Fig. 4, houve uma perda razoável de desempenho no seguimento da trajetória de referência, gerando um erro de estado estacionário bem significativo. O torque motor de controle teve um aumento aproximado de 72% (com relação à simulação com o modelo nominal linear) em razão da lei de controle tentar superar as não linearidades do modelo. Ressalta-se que em nenhum momento houve saturação do controle. Observa-se ainda que o erro de estado estacionário presente deve-se especificamente às não linearidades da dinâmica, devidas ao atrito interno do atuador.

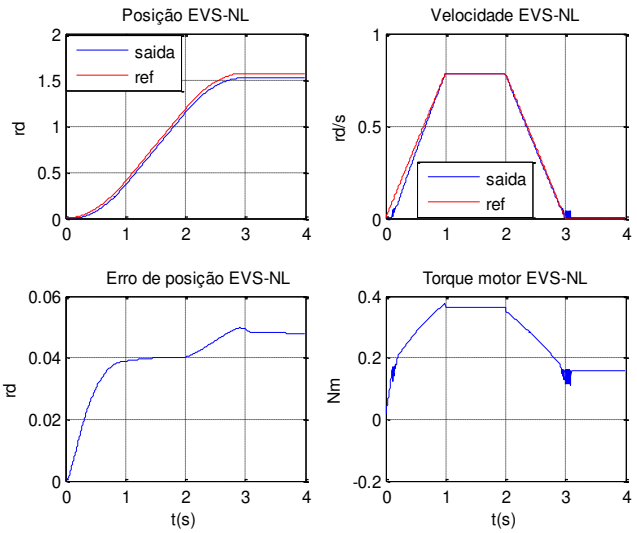


Fig. 4. Simulação do controle a estrutura variável com superfície simples e atrito não-linear.

b) *Simulação 2*

A simulação do controle com EVI-NL é mostrada na Fig. 5. Esse controle obteve resultado muito bom no seguimento da trajetória de referência, evidenciando um desempenho muito próximo do obtido com a simulação sobre a dinâmica linear. Houve também um acréscimo do torque motor de controle (com relação ao caso linear), mas este não chegou ao limite da saturação.

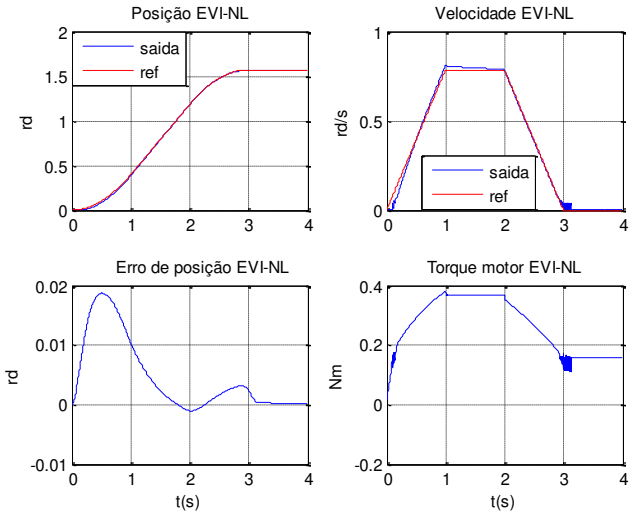


Fig. 5. Simulação do controle a estrutura variável com superfície integral e atrito não-linear.

c) Simulação 3

Percebe-se, na simulação com o sistema de controle (PID-NL) mostrado na Fig. 6, também um ótimo desempenho, bastante semelhante ao caso anterior.

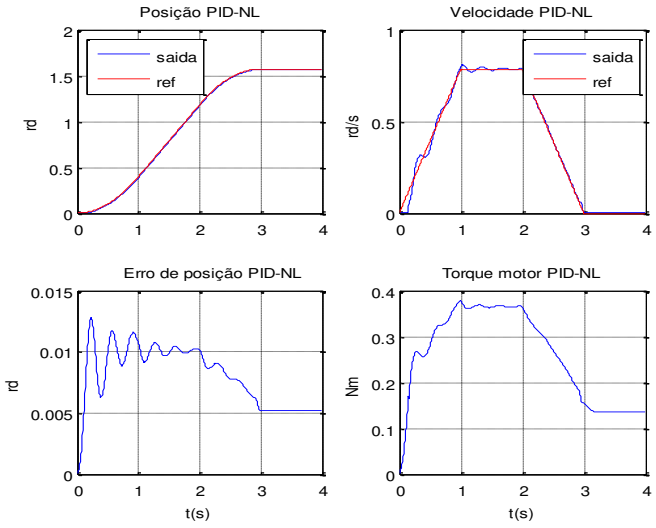


Fig. 6. Simulação do controle PID com atrito não-linear.

CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o problema do controle de atuadores robóticos do tipo *harmonic–drive*, considerando o atrito não-linear e avaliando o desempenho de controladores a estrutura variável (modos deslizantes) em comparação ao controle clássico PID.

Foram desenvolvidos dois tipos de controle que utilizam modos deslizantes: um com superfície simples e outro com superfície integral. Em ambos os casos o objetivo foi o de efetuar o controle em posição do atuador robótico.

Os resultados das simulações desenvolvidas na seção cinco mostraram que tanto o controle com superfície integral quanto o controle proporcional, integral e derivativo tiveram resultados muito próximos e ambos se mostraram robustos às diferenças entre modelo nominal e planta. Verificou-se ainda que o controle com superfície simples obteve resultados inferiores aos obtidos com os demais sistemas de controle.

Na realidade, fazer comparações entre diferentes técnicas de controle empregadas na solução de um problema é sempre uma tarefa difícil, principalmente em razão da forte dependência dos resultados com relação ao projeto dos ganhos destas diferentes leis de controle. Entretanto, foram feitos diversos projetos de ganhos a fim de se aumentar o desempenho sem a perda de estabilidade, chegando-se finalmente aos projetos testados no presente artigo. Constatou-se uma maior facilidade com o PID, ou seja, pode-se mais facilmente determinar um conjunto de ganhos que amplie o desempenho mantendo respostas estáveis.

Trabalhos futuros incluem a simulação com variação paramétrica e a implementação da janela de esquecimento [9] no mesmo modelo e também a validação experimental da estratégia de controle a estrutura variável, a fim de se avaliar o desempenho e a estabilidade deste tipo de controle.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. C. P. Gomes, V. S. Rosa e B. C. Albertini, “Active control to flexible manipulators”, *IEEE/ASME Trans. On Mechatronics,*vol.11, pp. 75-83, 2006.

[2] R. L. Corrêa, S. C. P. Gomes e V. I. Gervini, “Um estudo sobre o acoplamento dinâmico entre atuadores e estruturas flexíveis” .

[3] S. V. Emelyanov, “Variable structure control systems”, Moscow, Nauka, 1967.

[4] R. E. Sens, S. C. P. Gomes, A. M. Tavares, “Controle de um veículo subaquático utilizando estrutura variável”, 2006.

[5] J. J. B. Lima, “Sistema antibloqueio (ABS) para freios eletromecânicos utilizando controle por modos deslizantes”, Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, agosto de 2005.

[6] S. C. P. Gomes, V. S. Rosa, “A new approach to compensate friction in robotic actuators”. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2003)*, Taipei, Taiwan, 2003.

[7] G. E. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini. Feedback control of dynamic systems. Addison-Wesley, 1994.

[8] J. Slotine, W. Li, “Applied Nonlinear Control”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991, 461 p.

[9] S. C. P. Gomes; C. C. Bier, “Estudo sobre trajetórias de controle para robôs manipuladores.” *In: XII Congresso Brasileiro de Automática*, 1998, Uberlânida, MG.

[10] K. Ogata. Engenharia de Controle Moderno, Prentice-Hall do Brasil, 1990.

[11] V.I. Utkin. Sliding Modes and their Application to Variable Systems. MIR Publishers, Moscow, 1978.