

# Robustez de um controlador adaptativo proposto à perturbações limitadas

Nardênio Almeida Martins\* e Maycol de Alencar

Departamento de Informática, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.

\*Autor para correspondência. e-mail: namartin@din.uem.br

**RESUMO.** Este artigo apresenta o projeto de um controlador adaptativo e robusto de robôs manipuladores no espaço de juntas. Uma nova lei de controle adaptativo composta, contendo um termo adicional robusto e que usa o erro de predição e os erros de seguimento para direcionar a estimação de parâmetros é baseada na passividade e no método direto de *Lyapunov*. A convergência e a estabilidade global são mostradas para o algoritmo de controle adaptativo e robusto. Simulações numéricas são fornecidas para demonstrar o desempenho e a robustez do algoritmo proposto.

**Palavras-chave:** controle adaptativo e robusto, espaço de juntas, robô manipulador.

**ABSTRACT. Robustness of a proposed adaptive controller to limited disturbances.** This article presents a robust and adaptive control design for robot manipulators in joint space coordinates. A new composite adaptive control law, which contains a robust additional term and which uses the prediction error and the tracking errors to drive parameter estimation, is based on passivity and on *Lyapunov* direct method. It is shown that global stability and convergence can be achieved for the robust and adaptive control algorithm. Numerical simulations are provided to demonstrate the performance and the robustness of the proposed algorithm.

**Key words:** robust and adaptive control, joint space, robot manipulator.

## Introdução

Robôs manipuladores são basicamente dispositivos de posicionamento com muitos graus de liberdade. O robô, como uma planta a ser controlada, é um sistema mecatrônico multivariável, não-linear e fortemente acoplado (Canudasde Wit *et al.*, 1996). O principal desafio no problema de controle de movimento está na complexidade da dinâmica e nas incertezas paramétricas e dinâmicas. As incertezas paramétricas surgem do conhecimento impreciso dos parâmetros cinemáticos e dos parâmetros de inércia. As incertezas dinâmicas surgem dos elos e juntas flexíveis, da dinâmica dos atuadores, dos atritos, dos ruídos, da dinâmica de ambiente desconhecido e de perturbações (Spong, 1996).

Com o intuito de resolver problema de controle de movimento sob incertezas, o uso de controladores adaptativos e robustos tornou-se relevante. Esses controladores exploram importantes propriedades estruturais da dinâmica do robô. Entretanto, a implementação prática desses controladores requerem a consideração de várias

fontes de incertezas, tais como erros de modelagem, erros de cálculo, cargas desconhecidas, ruídos e perturbações externas (Sciavicco e Siciliano, 1996).

Neste trabalho, é proposto um algoritmo de controle adaptativo e robusto no espaço de juntas, o qual utiliza o erro de predição e o erro de seguimento para realizar a estimação de parâmetros e um termo adicional robusto para compensação de perturbações limitadas, considerando-se dois elos do robô manipulador PUMA 560.

Este artigo é organizado como segue. Na seção 2 é apresentado o algoritmo de controle adaptativo com influência de perturbações limitadas. A seção 3 descreve a compensação adaptativa dessas perturbações. O ambiente de simulação é descrito na seção 4. Os resultados de simulações numéricas são apresentados na seção 5. Finalmente, na seção 6, são feitas as conclusões.

## Controlador Adaptativo Proposto (CAP) com existência de perturbações limitadas

A maioria das técnicas de controle adaptativo assegura o seguimento assintótico de uma trajetória de referência desejada para a dinâmica do robô

manipulador (Lewis *et al.*, 1993; Martins, 2001). Entretanto, na realidade, sabe-se que sempre existirão perturbações em qualquer sistema eletromecânico. A forma mais simples de quantificar algum tipo de efeito de perturbação é adicionar um termo de perturbação limitada à equação dinâmica do robô manipulador. Com esse termo aditivo de perturbação, a dinâmica do robô manipulador torna-se:

$$\tau = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_p \quad (2.1)$$

sendo que:

$\tau_p$  é um vetor que representa uma perturbação aditiva.

Considere a dinâmica do robô manipulador, (eq. 2.1), e seja a seguinte lei de controle:

$$\tau = \tau_0 + \hat{\tau} + \tau_c \quad (2.2)$$

com

$$\tau_0 = H_0(q)\ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q})\dot{q}_r + G_0(q) + (K_v + K_a \|\ddot{q}\|^2)r + K_p \tilde{q} \quad (2.3)$$

$$\hat{\tau} = \hat{H}(q)\dot{q}_r + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q}_r + \hat{G}(q) \quad (2.4)$$

e o termo de compensação da perturbação

$$\tau_c = 0 \quad (2.5)$$

sendo:

as matrizes  $K_v$ ,  $K_a$  e  $K_p$  simétricas, diagonais, positivas definidas ( $K_v = K_v^T > 0$ ,  $K_a = K_a^T > 0$  e  $K_p = K_p^T > 0$ ) e o termo  $\|\tilde{q}\|^2$  definido como:

$$\|\tilde{q}\|^2 = \sum_{i=1}^n \tilde{q}_i^2 \quad (2.6)$$

no qual:

$n$  corresponde ao grau de liberdade ou número de juntas de um robô manipulador.

Os sinais  $\tilde{q}$ ,  $\dot{\tilde{q}}$ ,  $\ddot{q}_r$ ,  $\dot{q}_r$ ,  $r$  e  $\dot{r}$  são definidos respectivamente como a seguir:

$$\tilde{q} = q_d - q \quad (2.7)$$

$$\dot{\tilde{q}} = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (2.8)$$

$$\ddot{q}_r = \ddot{q}_d + \Lambda \dot{\tilde{q}} \quad (2.9)$$

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d + \Lambda \tilde{q} \quad (2.10)$$

$$r = \dot{q}_r - \dot{q} = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q} \quad (2.11)$$

$$\dot{r} = \ddot{q}_r - \ddot{q} = \ddot{\tilde{q}} + \Lambda \dot{\tilde{q}} \quad (2.12)$$

Fazendo a parametrização linear das eq. 2.3, 2.4 e 2.5, o controlador proposto (eq. 2.2) fica:

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r, r) [\theta_0 + \Delta \hat{\theta}] + (K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2)r + K_p \tilde{q} \quad (2.13)$$

em que:

$\theta_0$  é o vetor de parâmetros no qual nem todos os parâmetros do sistema são desconhecidos ou desejados de modo a estimar somente um subconjunto desses parâmetros; e

$\Delta \hat{\theta}$  é o vetor de parâmetros estimados ou parâmetros variantes no tempo.

A dinâmica de erro do sistema em malha fechada é obtida da substituição da lei de controle (eq. 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5), na dinâmica do robô manipulador (eq. 2.1). Das eq. 2.11 e 2.12, pode-se definir que  $\dot{q} = \dot{q}_r - r$  e  $\ddot{q} = \ddot{q}_r - \dot{r}$ , de modo que a dinâmica de erro fica:

$$H(q)\dot{r} + [C(q, \dot{q})r + (K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2)]r + K_p \tilde{q} = \tilde{H}(q)\ddot{q}_r + \tilde{C}(q, \dot{q})\dot{q}_r + \tilde{F}(\dot{q}) + \tilde{G}(q) + \tau_p \quad (2.14)$$

na qual:

$$\tilde{H}(q) = H(q) - [H_0(q) + \hat{H}(q)] ,$$

$$\tilde{C}(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) - [C_0(q, \dot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})] ,$$

$$\tilde{F}(\dot{q}) = F(\dot{q}) - [F_0(\dot{q}) + \hat{F}(\dot{q})] \quad e$$

$$\tilde{G}(q) = G(q) - [G_0(q) + \hat{G}(q)] .$$

Realizando as seguintes parametrizações lineares, a dinâmica do erro resulta em:

$$H(q)\dot{r} + [C(q, \dot{q})r + (K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2)]r + K_p \tilde{q} = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r, r) \Delta \tilde{\theta} + \tau_p \quad (2.15)$$

com  $\Delta \tilde{\theta} = \theta - [\theta_0 + \Delta \hat{\theta}]$ , sendo o vetor de erro nos parâmetros.

A estabilidade é mostrada a partir da seguinte função candidata de Lyapunov:

$$V(t) = \frac{1}{2} r^T H(q) r + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} + \frac{1}{2} \Delta \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \Delta \tilde{\theta} \quad (2.16)$$

em que a matriz  $\Gamma$  é simétrica, diagonal e positiva definida ( $\Gamma = \Gamma^T > 0$ ).

Diferenciando essa função  $V(t)$  ao longo das trajetórias da dinâmica de erro do sistema em malha fechada (eq. 2.15), tem-se:

$$\dot{V}(t) = -r^T [K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2]r - \tilde{q}^T K_p \Lambda \tilde{q} + r^T Y(\cdot) \Delta \tilde{\theta} + r^T \tau_p + \Delta \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\Delta \tilde{\theta}} \quad (2.17)$$

com  $K_p = K_p^T > 0$  e  $Y(\cdot) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r, r)$ .

Escolhendo a lei de adaptação de parâmetros como:

$$\dot{\Delta \tilde{\theta}} = -\Delta \dot{\tilde{\theta}} = -[\Gamma Y(\cdot)^T r + \beta \Gamma Y(\cdot)^T \varepsilon] \quad (2.18)$$

com a matriz  $\beta$  sendo simétrica, diagonal, positiva definida ( $\beta = \beta^T > 0$ ) e  $\varepsilon$  sendo o erro de predição dos torques de controle definido da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \tau - (\tau_0 + \hat{\tau}) = Y(\cdot) \theta + \tau_p - Y(\cdot) [\theta_0 + \Delta \hat{\theta}] = Y(\cdot) [\theta - (\theta_0 + \Delta \hat{\theta})] + \tau_p \\ &= Y(\cdot) \Delta \tilde{\theta} + \tau_p \end{aligned} \quad (2.19)$$

Como  $\Delta\dot{\theta} = -\Delta\hat{\theta}$ , pode-se usar a lei de adaptação de parâmetros (eq. 2.18), de modo que:

$$\dot{V}(t) = -r^T [K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2] r - \tilde{q}^T K_p \Lambda \tilde{q} - \beta (\varepsilon^T - \tau_p^T) \varepsilon + r^T \tau_p \quad (2.20)$$

Aplicando o teorema de Rayleigh-Ritz (Lewis et al., 1993), pode-se escrever a eq. (2.20) como:

$$\dot{V}(t) \leq -[\lambda_{\min}(K_v) + \lambda_{\min}(K_a) \|\tilde{q}\|^2] \|r\|^2 + \|\tau_p\| \|r\| - [\lambda_{\min}(K_p) \Lambda] \|\tilde{q}\|^2 - \beta \|\varepsilon\| - \|\tau_p\| \|\varepsilon\| \quad (2.21)$$

Da eq. 2.21 pode ser obtida uma condição suficiente para que  $\dot{V}$  seja negativa ( $\dot{V} < 0$ ). Isto é,  $\dot{V}$  é negativa se:

$$\|r\| > \frac{\|\tau_p\| \pm \sqrt{\|\tau_p\|^2 - 4\Phi[\lambda_{\min}(K_p) \Lambda] \|\tilde{q}\|^2 + \beta \|\varepsilon\| - \|\tau_p\| \|\varepsilon\|}}{2\Phi} \quad (2.22)$$

com  $\Phi = \lambda_{\min}(K_v) + \lambda_{\min}(K_a) \|\tilde{q}\|^2$ .

Se a eq. 2.22 é satisfeita,  $\dot{V}$  é negativa e  $V$  decrescerá. Se  $V$  decresce, então pela definição da função de Lyapunov (eq. 2.16),  $r$  decresce. Isto ocorre até que:

$$\|r\| \leq \frac{\|\tau_p\| \pm \sqrt{\|\tau_p\|^2 - 4\Phi[\lambda_{\min}(K_p) \Lambda] \|\tilde{q}\|^2 + \beta \|\varepsilon\| - \|\tau_p\| \|\varepsilon\|}}{2\Phi} \quad (2.23)$$

de modo que  $\dot{V}$  torna-se positiva definida ( $\dot{V} > 0$ ), o que significa que  $V$  começará a crescer.

Diante do exposto, conclui-se que  $\|r\|$  permanece limitada e que da definição de  $r$  (eq. 2.11) os erros de seguimento  $\tilde{q}$  e  $\dot{\tilde{q}}$  permanecem limitados. Assim, a existência de incertezas na estimação de parâmetros faz com que existam erros de seguimento quando  $t \rightarrow \infty$ .

**Compensação adaptativa das perturbações limitadas**

Considere a lei de controle proposta (2.2, 2.3 e 2.4) com a seguinte modificação no termo de compensação de perturbação (eq. 2.5):

$$\tau_c = \hat{\tau}_p \quad (3.1)$$

no qual  $\hat{\tau}_p$  é uma estimação de  $\tau_p$ .

Substituindo a lei de controle proposta (eq. 2.2, 2.3, 2.4 e 3.1) no modelo dinâmico (eq. 2.1), obtém-se a seguinte dinâmica do erro:

$$H(q)\ddot{r} + [C(q,\dot{q})r + (K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2)]r + K_p \tilde{q} = Y(q,\dot{q},\ddot{q},\tilde{q})\Delta\tilde{\theta} + \tilde{\tau}_p \quad (3.2)$$

em que  $\tilde{\tau}_p = \tau_p - \hat{\tau}_p$ .

A estabilidade é mostrada a partir da seguinte função candidata de Lyapunov:

$$V(t) = \frac{1}{2} r^T H(q) r + \frac{1}{2} \tilde{q}^T K_p \tilde{q} + \frac{1}{2} \Delta\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \Delta\tilde{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{\tau}_p^T K_i^{-1} \tilde{\tau}_p \quad (3.3)$$

na qual a matriz  $K_i$  é simétrica, diagonal e positiva definida ( $K_i = K_i^T > 0$ ).

Diferenciando essa função  $V(t)$  ao longo das trajetórias da dinâmica de erro do sistema em malha fechada (eq. 3.2), tem-se:

$$\dot{V}(t) = -r^T [K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2] r - \tilde{q}^T K_p \Lambda \tilde{q} + r^T Y(\cdot) \Delta\tilde{\theta} + r^T \tilde{\tau}_p + \Delta\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \Delta\dot{\tilde{\theta}} + \tilde{\tau}_p^T K_i^{-1} \dot{\tilde{\tau}}_p \quad (3.4)$$

Utilizando a lei de adaptação de parâmetros, eq. 2.17, e escolhendo a lei de adaptação para rejeição da perturbação limitada como:

$$\dot{\tilde{\tau}}_p = -\hat{\tau}_p = -K_i r \quad (3.5)$$

Como  $\dot{\tilde{\tau}}_p = -\hat{\tau}_p$ , pode-se usar a lei de adaptação para rejeição da perturbação limitada (eq. 3.5), de modo que:

$$\dot{V}(t) = -r^T [K_v + K_a \|\tilde{q}\|^2] r - \tilde{q}^T K_p \Lambda \tilde{q} - \beta [\varepsilon^T - \tilde{\tau}_p^T] \varepsilon \leq 0 \quad (3.6)$$

em que:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \tau - (\tau_0 + \hat{\tau}) = Y(\cdot)\theta + \tau_p - [Y(\cdot)(\theta_0 + \Delta\hat{\theta}) + \hat{\tau}_p] \\ &= Y(\cdot)(\theta - (\theta_0 + \Delta\hat{\theta})) + [\tau_p - \hat{\tau}_p] \\ &= Y(\cdot)\Delta\tilde{\theta} + \tilde{\tau}_p \end{aligned} \quad (3.7)$$

Sabe-se que  $\dot{V}$  (eq. 3.6) é negativa semi-definida ( $\dot{V} \leq 0$ ). Assim, conclui-se que  $V$  (eq. 3.3) é superiormente limitada, já que  $V$  é positiva definida ( $V > 0$ ). Usando essa conclusão e a propriedade 1, segundo a qual a matriz  $H(q)$  é simétrica, positiva definida e a sua inversa existe e é limitada, afirma-se que  $r$ ,  $\varepsilon$  e  $\Delta\tilde{\theta}$  são limitados. Da definição de  $r$  (eq. 2.11), afirma-se, também, que  $\tilde{q}$  e  $\dot{\tilde{q}}$  (e portanto  $q$  e  $\dot{q}$ ) são limitados. Visto que  $\tilde{q}$ ,  $\dot{\tilde{q}}$ ,  $r$  e  $\Delta\tilde{\theta}$  são limitados, pode-se usar a equação da dinâmica de erro do sistema em malha fechada (eq. 3.2) para mostrar que  $\dot{r}$  (e, portanto  $\ddot{V}$ , obtida por diferenciação de  $\dot{V}$ ) é limitado. Como a matriz  $H(q)$  é inferiormente limitada, pode-se dizer que  $V$  é inferiormente limitada, lembrando que  $\dot{V}$  é negativa semi-definida e  $\ddot{V}$  é limitada, pode-se

aplicar o lema de Barbalat (Lewis *et al.*, 1993) de modo que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0 \quad (3.8)$$

que significa, pelo teorema de Rayleigh-Ritz:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_{\min}\{K_v\} \|r\|^2 = 0 \quad \text{ou} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} r = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_{\min}\{K_a\} \|\tilde{q}\|^2 \|r\|^2 = 0 \quad \text{ou} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} r = 0 \quad \text{e} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q} = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_{\min}\{K_p A\} \|\tilde{q}\|^2 = 0 \quad \text{ou} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q} = 0$$

Observando que a eq. 2.11 resulta em uma equação diferencial de 1ª. ordem estável direcionada pela entrada  $r$ , portanto, da eq. 3.9, pode-se escrever que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q} = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\tilde{q}} = 0 \quad (3.10)$$

Esse resultado informa que  $r \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ , implicando que ambos  $\tilde{q} \rightarrow 0$  e  $\dot{\tilde{q}} \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow \infty$ . Nada se pode concluir em relação à convergência do vetor de erro nos parâmetros  $\Delta \tilde{\theta}$  e do erro de predição  $\mathcal{E}$  a zero. No entanto, estes permanecem limitados, pois os parâmetros estimados não convergem para os parâmetros verdadeiros. Logo, a análise de estabilidade está comprovada.

### Ambiente de simulação

As simulações são realizadas pelo software SIMNON (Elmqvist *et al.*, 93) - um programa de computador que serve para a simulação de expressões e relações matemáticas não-lineares entre os sinais de entrada e de saída em um sistema, bem como serve para a conexão de vários subsistemas que constituem em um único sistema - através da conexão de blocos correspondendo aos subsistemas que representam os métodos de controle abordados.

A descrição sucinta de cada subsistema, em forma de bloco (Figura 1), é fornecida a seguir.

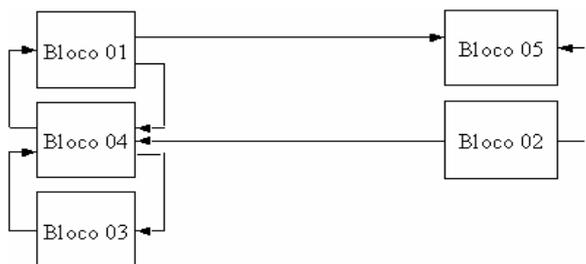


Figura 1. Esquema dos blocos para simulação no SIMNON.

Bloco 1: representa o modelo dinâmico do robô manipulador. Os torques de controle  $\tau$  constituem suas entradas, gerando como saídas as posições, velocidades e acelerações no espaço de juntas ( $q$ ,  $\dot{q}$  e  $\ddot{q}$ ).

Bloco 2: constitui o gerador de trajetórias. Como o próprio nome diz, este gera as saídas - posições, velocidades e acelerações desejadas no espaço de juntas ( $q_d$ ,  $\dot{q}_d$  e  $\ddot{q}_d$ ) - e não necessita de entradas.

Bloco 3: representa a lei de controle. As saídas desse bloco são constituídas pelos torques de controle  $\tau$  e as entradas são definidas de acordo com a lei de controle aplicada no espaço de juntas.

Bloco 4: representa a conexão dos blocos 1, 2 e 3, formando um único sistema.

Bloco 5: representa a macro de execução que contém todos os comandos necessários para realização das simulações incluindo as inicializações das variáveis de estado ( $q$  e  $\dot{q}$ ).

Cabe ressaltar que cada bloco é implementado como um sistema contínuo.

### Resultados das simulações

O objetivo dessas simulações é avaliar e validar o algoritmo de controle adaptativo proposto quanto ao desempenho do sistema em malha fechada e robustez às perturbações limitadas, considerando os elos 2 e 3 do robô manipulador PUMA 560 (Erlie e Lu, 1993).

As simulações, foram realizadas considerando que o robô manipulador deve rastrear uma trajetória retilínea. A posição final é atingida em 3 segundos, a partir do que o robô manipulador deve permanecer em regulação.

Nas simulações, considerou-se que a incerteza na inércia foi ocasionada apenas pela massa do punho e pela massa da carga acopladas ao final do elo 3 do robô manipulador PUMA 560. Da parametrização linear (eq. 2.13), pode-se verificar que essa incerteza na inércia considera os termos  $a_{o_i}, i=1, \dots, 8$  conhecidos e o termo  $a_{o_9}$  desconhecido. Logo, o valor atribuído ao termo  $a_{o_9}$  foi tomado como um valor nulo.

As matrizes de ganhos foram obtidas mediante simulações, nas quais buscou-se encontrar valores de erros de seguimento aceitáveis. Assim, os valores de ganhos são:  $K_v = 17$ ,  $A = 4.25$ ,  $K_p = 50$ ,  $K_a = 20$ ,  $\beta = 0.1$ ,  $\Gamma_{99} = 30$ ,  $K_i = 0.1$  (para perturbação limitada constante -  $\tau_p = 5$  - Figuras 2, 3 e 4) e  $K_i = 500$  (para perturbação limitada variante no tempo -  $\tau_p = 5 \cos(0.1t)$  - (Figuras 5, 6 e 7).

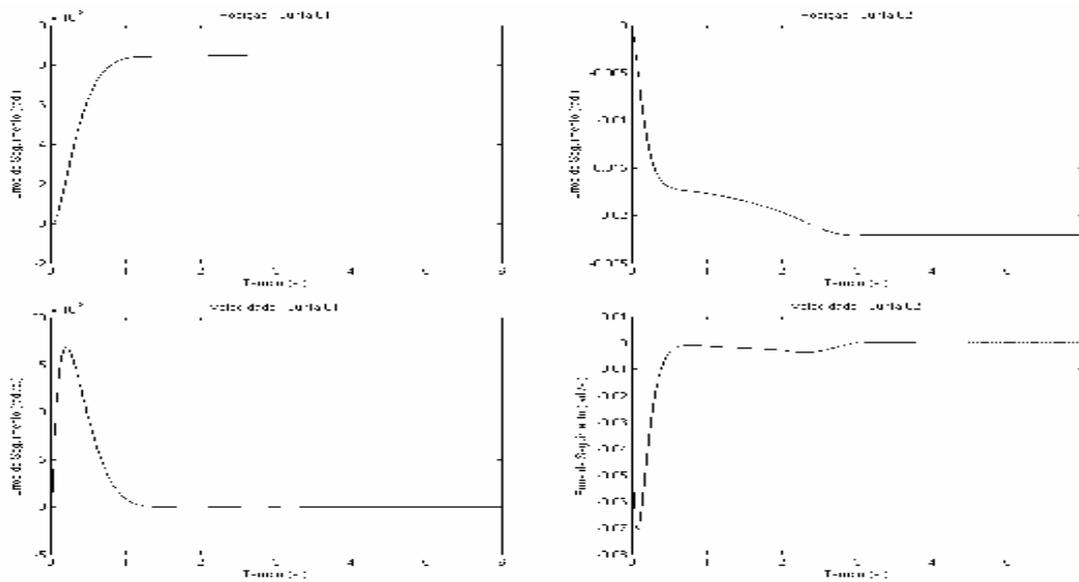


Figura 2. CAP com perturbação limitada constante ( $\tau_p = 5$ ) e sem compensação ( $K_i = 0$ ).

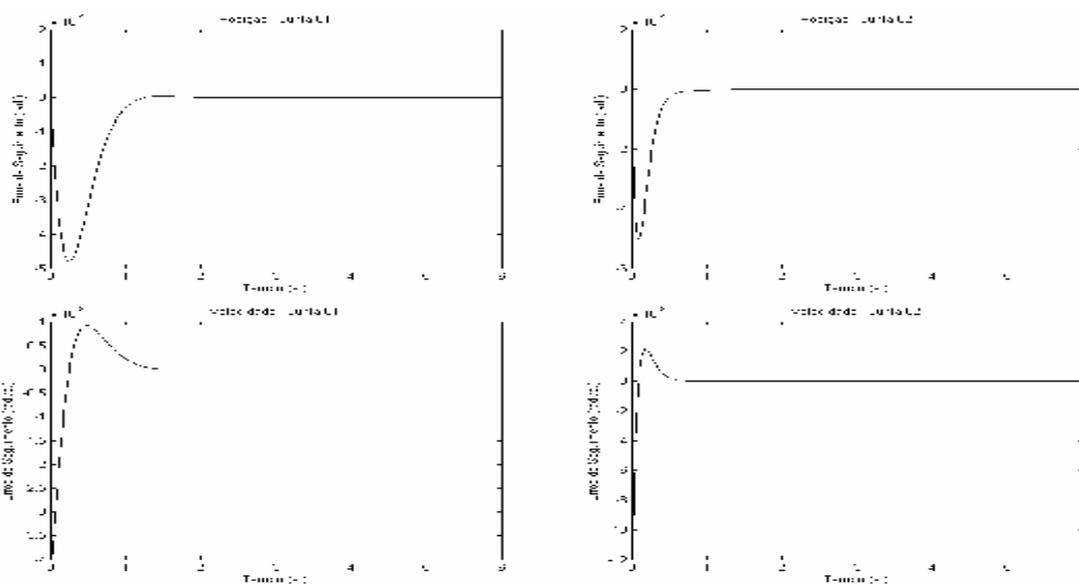


Figura 3. CAP com perturbação limitada constante ( $\tau_p = 5$ ) e com compensação ( $K_i = 0.1$ ).

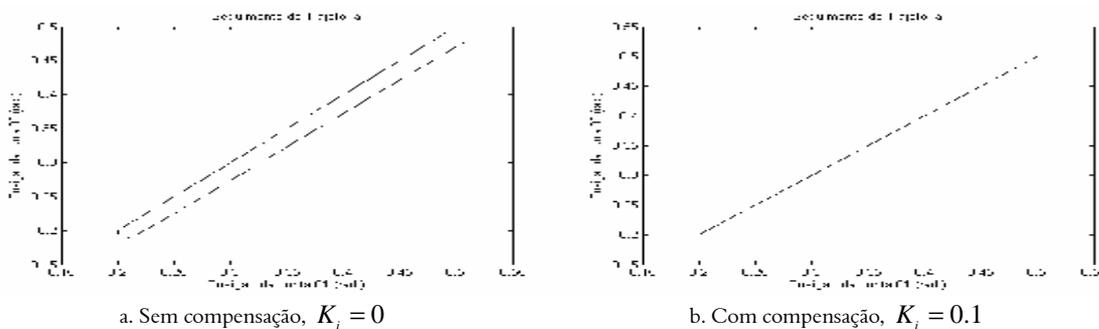


Figura 4. CAP com perturbação limitada constante  $\tau_p = 5$  – Seguimento de Trajetória.

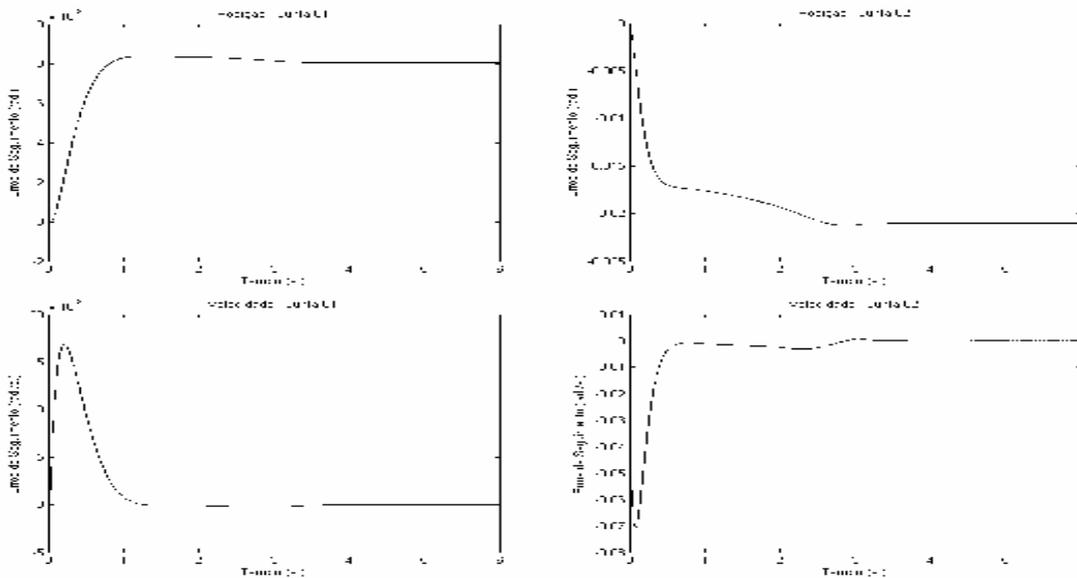


Figura 5. CAP com perturbação limitada variante ( $\tau_p = 5 \cos(0.1t)$ ) e sem compensação ( $K_i = 0$ ).

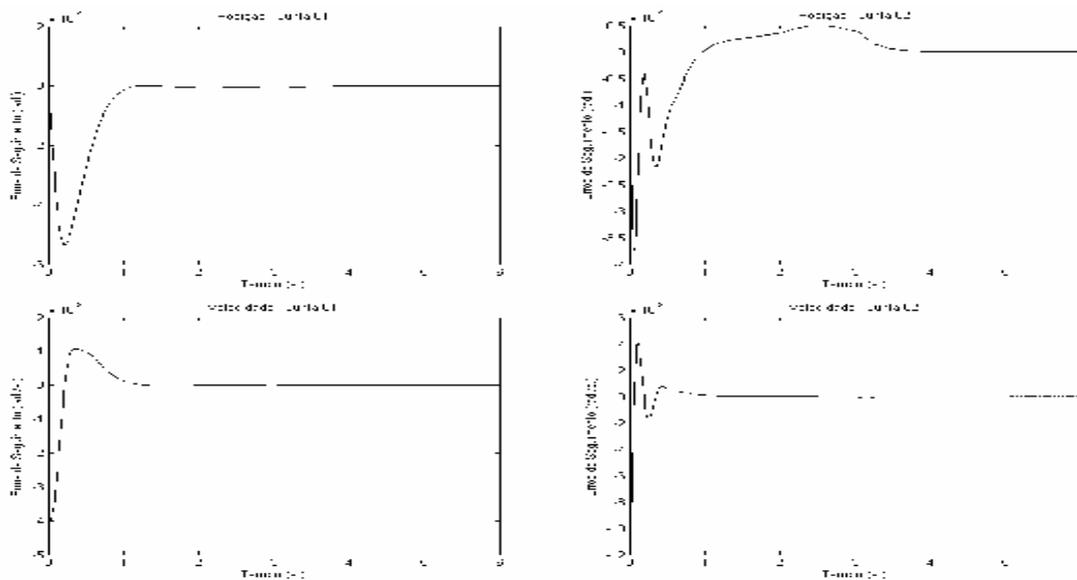
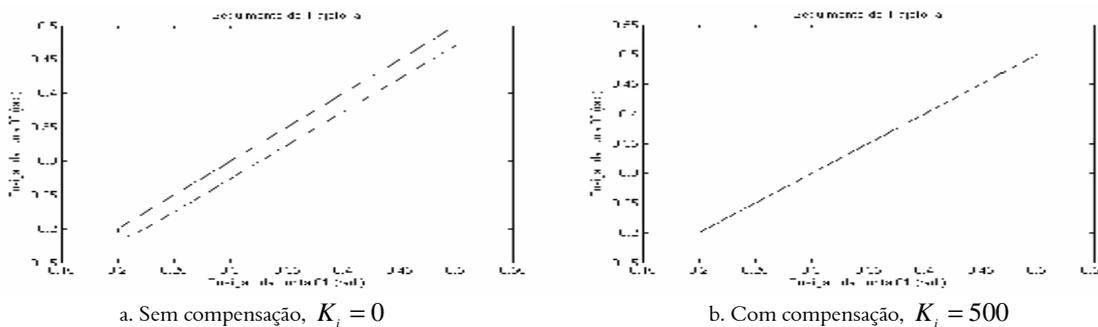


Figura 6. CAP com perturbação limitada variante ( $\tau_p = 5 \cos(0.1t)$ ) e com compensação ( $K_i = 500$ ).



a. Sem compensação,  $K_i = 0$

b. Com compensação,  $K_i = 500$

Figura 7. CAP com perturbação limitada variante  $\tau_p = 5 \cos(0.1t)$  – Seguimento de Trajetória.

Os resultados das simulações mostram que, para o caso adaptativo sem robustez, os erros de seguimento (de posição e de velocidade) obtidos, no espaço de juntas, foram significativos (Figuras 2 e 5 - principalmente na junta 02) e a trajetória desejada não foi seguida pelo robô manipulador (Figuras 4 e 7), enquanto que o caso adaptativo com robustez apresentou desempenho satisfatório no seguimento da trajetória desejada, no espaço de juntas (Figuras 4 e 7), e erros de seguimento (de posição e de velocidade) dentro de faixas aceitáveis (Figuras 3 e 6).

Quanto aos torques de controle resultantes do uso do controlador adaptativo (com ou sem robustez) proposto, é admissível dizer que estes mantiveram comportamentos suaves e parecidos, com valores de magnitudes aceitáveis.

### Conclusão

O algoritmo de controle adaptativo proposto apresenta-se como uma alternativa para o problema de seguimento de trajetória (ou controle de seguimento), em que um alto grau de desempenho e de precisão são exigidos.

Com os resultados das simulações realizadas, pode-se concluir que o algoritmo de controle adaptativo proposto é aplicável a robôs manipuladores. Essa justificativa é reforçada e

constatada com a avaliação e validação do algoritmo de controle adaptativo proposto quanto ao desempenho do sistema em malha fechada e robustez às perturbações limitadas.

### Referências

- CANUDAS DE WIT, C. *et al. Theory of Robot Control*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- ELMQVIST, H. *et al. SIMNON for Windows – Versão 1.02*, Goteborg, Sweden: SSPA Systems, October 1993.
- ERLIC, M.; LU, W.S. A Reduced-Order Adaptive Velocity Observer for Manipulator Control. *Proceedings IEEE Conf. Robot. Autom.*, Georgia, v. 2, p. 328-332, 1993.
- LEWIS, F.L. *et al. Control of Robot Manipulators*. New York: Macmillan Publishing Company, 1993.
- MARTINS, N.A. Projeto de um Controlador Adaptativo para Robôs Manipuladores no espaço de Juntas. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1481-1494, 2001.
- SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. *Modeling and Control of Robot Manipulators*. Chicago: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996. (McGraw-Hill Electrical and Computer Engineering Series).
- SPONG, M.W. *The Control Handbook*. New York: CRC Press, Inc., 1996.

*Received on August 11, 2004.*

*Accepted on June 05, 2005.*