

1. Publicação nº <i>INPE-2755-PRE/331</i>	2. Versão <i>2ª*</i>	3. Data <i>Maio, 1983</i>	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem <i>DMC/DGC</i>	Programa <i>TEREAL</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CONTROLE EM TEMPO REAL SATÉLITES ARTIFICIAIS</i> <i>SISTEMAS DE RASTREAMENTO SISTEMAS NÃO-LINEARES</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.086:681.513.5</i>			
8. Título <i>ALGORITMO PARA CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS COM NÃO-LINEARIDADE SEPARADA APLICADO AO CONTROLE DE APONTAMENTO DE SISTEMAS DE RASTREAMENTO DE SATÉLITES ARTIFICIAIS</i>		10. Páginas: <i>12</i>	
		11. Última página: <i>11</i>	
9. Autoria <i>Valcir Orlando</i> <i>Octávio Maizze Neto</i>		12. Revisada por <i>Roberto V.F. Lopes</i>	
Assinatura responsável <i>Valcir Orlando</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo numérico para controle de apontamento em tempo real de sistemas de rastreamento de satélites artificiais. A função de não-linearidade é tratada como a variável de controle do sistema. Os valores da variável de controle verdadeira são obtidos por inversão dessa função. O algoritmo é testado na simulação do rastreamento de um satélite artificial de baixa altitude por dois sistemas de rastreamento corrente</i> <i>mente em uso.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho será apresentado no VII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 83 - Uberlândia, MG, de 13 a 16 de</i> <i>zembro de 1983.</i> <i>*Revisado em Setembro de 1983.</i>			



COBEM 83

VII CONGRESSO BRASILEIRO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

UBERLÂNDIA, 13 - 16 de dezembro de 1983



TRABALHO
PAPER

Nº

P.P.

UFU

ALGORITMO PARA O CONTROLE EM TEMPO REAL DE SISTEMAS COM NÃO-LINEA

(TITLE OF PAPER)

RIDADE SEPARADA APLICADO AO CONTROLE DE APONTAMENTO DE

SISTEMAS DE RASTREAMENTO DE SATÉLITES ARTIFICIAIS

NAME(S) OF AUTHOR(S) AND AFFILIATION

VALCIR ORLANDO

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientí
fico e Tecnológico - CNPq

OCTÁVIO MAIZZA NETO

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Escola Politécnica da Universidade de São Pau
lo - EPUSP

SUMÁRIO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo numérico para controle de apontamento em tempo real de sistemas de rastreamento de satélites artificiais. A função de não-linearidade é tratada como a variável de controle do sistema. Os valores da variável de controle verdadeira são obtidos por inversão dessa função. O algoritmo é testado na simulação do rastreamento de um satélite artificial de baixa altitude por dois sistemas de rastreamento correntemente em uso.

SUMMARY

A numerical algorithm is developed for optimal position alignment real time control of satellite tracking systems. The nonlinearity function is used as the system control variable. The true control variable values to be applied in the consecutive steps were then calculated by inversion of the nonlinearity function. To test the procedure a numerical simulation is made for tracking a low altitude satellite by two currently used tracking systems.

1. Introdução

Diversos sistemas não-lineares podem ser modelados matematicamente por uma planta linear associada a uma não-linearidade separada, como esquematizado na Figura 1.

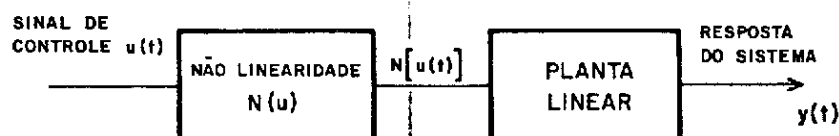


Fig. 1. Diagrama de blocos de uma classe de sistemas não-lineares.

As equações diferenciais dessa classe de sistemas podem ser colocadas na forma:

$$\dot{x}(t) = G(t)x(t) + H(t)F[u(t)] , \quad (1)$$

onde $x(t)$ é o vetor, n dimensional, de estado do sistema; $G(t)$ é uma matriz $n \times n$; $H(t)$ é um vetor n dimensional; e $F[u(t)]$ é a função de não-linearidade do sistema:

Na Seção 2 é apresentado o processo de otimização a partir do qual o algoritmo de controle é obtido. O processo de otimização, aplicável a sistemas pertencentes à classe citada acima, é efetuado a partir das equações de estado discretizadas do sistema. Na discretização do Sistema de Equações (1) consideram-se $G(t)$ e $H(t)$ constantes, como é o caso de sistemas de controle para o apontamento de antenas de rastreamento de satélites artificiais correntemente em uso [1]. A discretização do Sistema de Equações (1) fornece [2]:

$$x(t_{i+1}) = A(T)x(t_i) + B(T)F[u(t)], \quad (2)$$

onde:

$$A(T) = e^{GT} ;$$

$$B(T) = \int_{iT}^{(i+1)T} e^{G[i+1)T - \tau]} \cdot H \cdot d\tau ;$$

T é o período de discretização.

Na Seção 3 os vários passos de que se compõe o algoritmo são descritos. A seguir, na Seção 4, apresentam-se os resultados obtidos na aplicação simulada do algoritmo relativa ao apontamento automático de uma antena de 30 pés, com dois canais de controle, no rastreamento de um satélite de baixa altitude cuja órbita é simulada [3], [4]. O modelo matemático para cada canal foi desenvolvido pela NASA e é apresentado nessa seção. Comparações dos resultados obtidos na citada aplicação do algoritmo com dois outros algoritmos apresentados nas referências [5] e [6] confirmam a validade em termos de precisão, além de reforçar a característica de aplicação em tempo real, uma vez que, com exceção do instante inicial, em todos os instantes sucessivos o controle é calculado com a antecipação de um passo de discretização. Também são brevemente citados nessa seção os resultados obtidos em simulação da aplicação do algoritmo a um telescópio de 48 polegadas [7]. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais.

2. Resolução do Problema de Controle

Considere-se o problema de minimização do seguinte índice de desempenho:

$$J_1 = q_1[x_1(i+2) - r_1(i+2)]^2 + q_2[x_2(i+2) - r_2(i+2)]^2 + \\ + \dots + q_n[x_n(i+2) - r_n(i+2)]^2 + pF^2[u(i+1)] \quad (3)$$

onde: x_k representa a k-ésima componente do vetor de estado; r_k representa a k-ésima componente do vetor de referências, conhecido a priori; $F[u(i+1)]$ representa a função de não-linearidade no instante $i+1$; q_k é um peso escalar relativo à componente k do vetor de estado do sistema; e p é um peso escalar aplicado à função de não-linearidade do sistema:

Com auxílio da Equação 2 obtém-se facilmente:

$$x(i+2) = A^2x(i) + ABF[u(i)] + BF[u(i+1)]. \quad (4)$$

Substituindo esse resultado na Equação (3) e aplicando a condição necessária para mínimo, $\partial J_1/\partial u(i+1) = 0$, chega-se facilmente a:

$$\begin{aligned} F[u(i+1)] = & \{q_1b_1r_1(i+2) + q_2b_2r_2(i+2) + \dots + q_nb_nr_n(i+2) - \\ & - \{q_1b_1[A^2]_1 + q_2b_2[A^2]_2 + \dots + q_nb_n[A^2]_n\}x(i) - [q_1b_1A_1 + \\ & + q_2b_2A_2 + \dots + q_nb_nA_n]B \cdot F[u(i)]\}/(q_1b_1^2 + \\ & + q_2b_2^2 + \dots + q_nb_n^2 + p), \end{aligned} \quad (5)$$

onde: $[A^2]_k$ representa a k-ésima linha da matriz A^2 ; A_k representa a k-ésima linha da matriz A ; b_k representa a k-ésima componente do vetor B .

O valor da função $F[u(i+1)]$ calculado pela Equação (5) é o valor que deve ter a função $F(u(t))$, no intervalo $[t(i+1), t(i+2)]$ para que o índice de desempenho seja mínimo. Se essa função for biunívoca pode-se calcular o valor do controle u , a ser aplicado no instante t_{i+1} antecipadamente, desde que se conheça o valor do controle correspondente ao instante t_i , bem como o estado nesse instante. Porém, mesmo em casos em que essa função não é biunívoca, existindo regiões nas quais sua inversão é indeterminada, essa indeterminação pode ser resolvida com base em considerações de carácter prático. No algoritmo a ser apresentado será utilizada uma função apenas localmente inversível para modelar uma não-linearidade tipo saturação com zona morta em torno da origem. A determinação do controle $u(t)$ nas regiões em que a inversão de $F[u(t)]$ é indeterminada será feita com base em considerações referentes ao consumo de energia. Deve ainda ser salientado que os valores calculados para a função $F[u(i+1)]$ pela Equação (5) são valores que essa função deveria ter para que o funcional da Equação (3) seja minimizado. Podem então ser obtidos valores que a função não pode assumir. Por exemplo, se $F[u(t)]$ representa uma não-linearidade tipo saturação, existe, em módulo, um valor máximo que ela pode assumir, porém valores ob

tidos através da Equação (5) podem ser maiores em módulo que esse valor máximo, pois são os valores ótimos caso não houvesse saturação. Quando isso ocorrer, a solução ótima para o problema, dado o vínculo imposto pela saturação, é então o valor máximo permissível e não o valor ideal anteriormente calculado. Permanece ainda uma indeterminação quanto ao valor do controle u a ser aplicado que fornece o valor máximo de $F[u(t)]$, visto que a partir de um certo valor do controle, $u_{\min}$, o sistema satura e, para qualquer valor maior que $u_{\min}$ tem-se $F[u(t)]$ igual ao valor saturado. É então natural que em uma aplicação prática se opte pela solução que implique em menor consumo de energia para resolver essa indeterminação, ou seja, se aplique ao sistema o valor $u_{\min}$. No caso da zona morta, a indeterminação só ocorrerá quando a aplicação da Equação (5) fornecer $F[u(i+1)]$ nulo, visto que a aplicação de qualquer valor de u dentro da região em torno da origem em que existe a zona morta fornecerá $F[u(t)] = 0$. Nesse caso, obviamente, pelas mesmas razões expressas acima deve-se optar pelo menor valor do controle em módulo, dentro dessa região que forneça $F[u(t)]$ igual a zero, ou seja, $u(t)$ igual a zero.

A fim de obter uma equação que permita o cálculo do valor inicial do controle, considere-se o problema de minimização do seguinte funcional:

$$J_2 = q_1'[x_1(i+1) - r_1(i+1)]^2 + q_2'[x_2(i+1) - r_2(i+1)]^2 + \dots + q_n'[x_n(i+1) - r_n(i+1)]^2 + p'F^2[u(i)]. \quad (6)$$

Aplicando a condição necessária para mínimo, $\partial J_2 / \partial u(i) = 0$, e resolvendo a equação resultante para $F[u(i)]$ obtém-se:

$$F[u(i)] = [q_1'b_1r_1(i+1) + q_2'b_2r_2(i+1) + \dots + q_n'b_nr_n(i+1) - (q_1'b_1A_1 + q_2'b_2A_2 + \dots + q_n'b_nA_n)x(i)] / (q_1'b_1^2 + q_2'b_2^2 + \dots + q_n'b_n^2 + p'). \quad (7)$$

Como (7) é função apenas de $x(i)$, o valor inicial do controle pode ser obtido fazendo $i = 0$ e substituindo o valor inicial do estado em (7).

3. Descrição do Algoritmo de Controle

O objetivo do algoritmo desenvolvido é o controle de apontamento em tempo real de sistemas de rastreamento de satélites artificiais. Esses sistemas, como já foi dito na introdução, podem ser, geralmente, modelados matematicamente pelos Sistemas de Equações Diferenciais (1). Supõe-se a não-linearidade presente no sistema como sendo do tipo saturação com zona morta em torno da origem e modelada por:

$$F(u) = U_{\max} \cdot \operatorname{tgh} \frac{u - d}{c} \quad \text{para } u > d,$$

$$F(u) = U_{\max} \cdot \operatorname{tgh} \frac{u + d}{c} \quad \text{para } u < -d, \quad (8)$$

$$F(u) = 0 \quad \text{para } |u| < d,$$

onde $U_{\max}$, c e d são constantes escalares reais positivas.

O algoritmo, desenvolvido a partir da solução do problema de controle descrito na seção anterior, está ilustrado em diagrama de blocos na Figura 2 e consta dos seguintes passos:

- a) Valores estimados do vetor de referência nos instantes de interesse ($t_0, t_1, t_2, \dots$) são armazenados na memória do computador. Esses valores são obtidos através de valores estimados do estado do satélite durante o período em que este é visível pela estação de rastreamento cuja antena irá ser controlada com auxílio do algoritmo.
- b) A partir de medidas da saída do sistema de rastreamento estima-se o vetor de estado no instante t_i , $x(t_i)$. Se $i = 0$ passa-se ao próximo passo do algoritmo. Caso contrário passa-se ao item d.
- c) Com auxílio da Equação (7) calcula-se o valor que a função de não-linearidade deveria ter em t_0 . Segue-se ao item e. Nesta primeira passagem onde se en

contrar t_{i+1} leia-se t_0 .

- d) Com auxílio da Equação (5) calcula-se o valor que a função de não-linearidade $F[u(t_{i+1})]$ deveria ter em t_{i+1} passando-se em seguida ao próximo item.
- e) O valor encontrado como ótimo para $F[u(t_{i+1})]$ conforme o item d, é comparado com o valor máximo que essa função pode assumir por representar uma saturação, $U_{\max}$, e:
 - e.1) Se esse valor, em módulo for menor que $U_{\max}$ e maior que zero, o valor da variável de controle a ser aplicado nesse instante deve ser calculado por inversão da função $U_{\max} \cdot \tanh(u \pm d)/c$. segue-se ao item f.
 - e.2) Se esse valor for em módulo, maior ou igual a $U_{\max}$, então toma-se um valor da variável de controle, u , previamente estabelecido de modo a fornecer $|U_{\max} \cdot \tanh(u \pm d)/c| \approx U_{\max}$, dentro de uma precisão previamente estabelecida. Ou seja, um valor de u tal que: $U_{\max} - |U_{\max} \cdot \tanh(u \pm d)/c| = \epsilon$ sendo $\epsilon \ll U_{\max}$ um número real positivo escolhido a priori. Segue-se ao próximo item.
 - e.3) Se esse valor for igual a zero, então deve ser aplicado $u(t_{i+1}) = 0$ e passar-se ao próximo item.
- f) Se $i = 0$, o valor encontrado para o controle, $u(t_0)$, deve ser aplicado tão logo obtido. Pode-se então iniciar, imediatamente, o cálculo antecipado do controle a ser aplicado no próximo instante de discretização, t_1 . Uma vez calculado $u(t_1)$, só se poderá iniciar o cálculo de $u(t_2)$ após o instante t_1 pois, para esse cálculo, necessita-se de estimativas do estado do sistema nesse instante. O mesmo ocorre com relação ao cálculo do controle a ser aplicado no instante t_3 que, pelo mesmo motivo, só pode ser iniciado após o instante t_2 e assim sucessivamente.

Desse modo, se $i > 0$, aguarda-se o instante t_{i+1} e retorna-se ao item b do algoritmo incrementado i de uma unidade, para o início do cálculo antecipado do controle a ser aplicado no próximo instante.

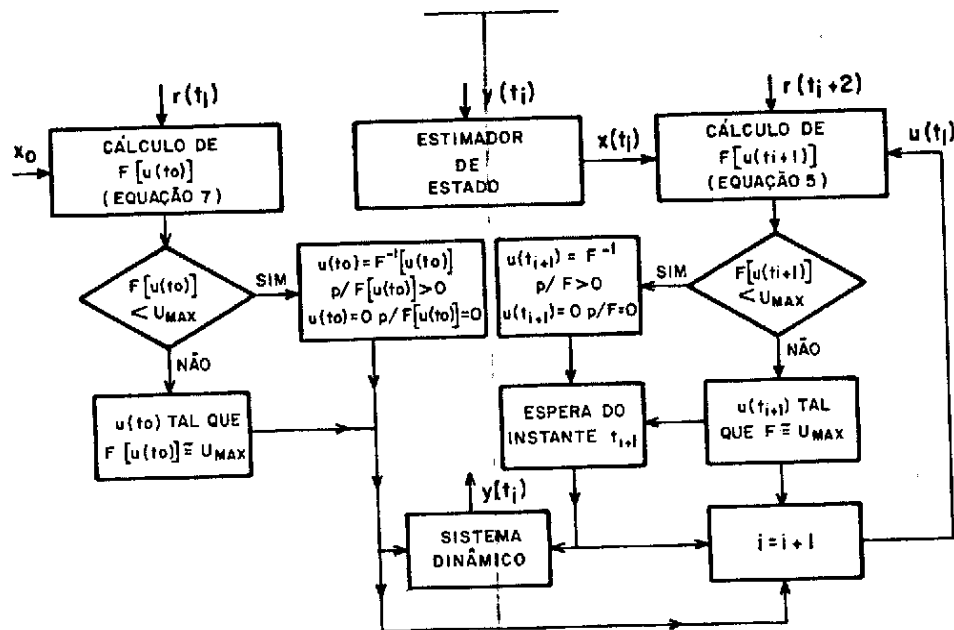


Fig. 2. Diagrama de blocos do algoritmo.

4. Resultados Obtidos

O algoritmo foi testado em uma simulação numérica. Nessa simulação utilizou-se o modelo matemático, desenvolvido pela NASA, do sistema de controle de apontamento de uma antena de rastreamento de 30 pés. Esse sistema possui dois canais de controle, cada canal modelado por:

$$\dot{x}(t) = Gx(t) + HF(u) \quad (9)$$

com:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -85.239 & -5 & 13.874 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -325.8 & -13.3 & 1020. & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -156.10^4 & -125. \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1560], \quad (11)$$

onde: $x^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]$ em que: x_1 é um ângulo de orientação de antenas; x_2 é a variação temporal desse ângulo;

x_3 é a pressão na servo bomba; e x_4 , x_5 e x_6 são, respectivamente, posição, velocidade e aceleração da servo bomba.

A antena é orientada em cada canal de acordo com os ângulos X_{30} e Y_{30} , os quais são ilustrados na Figura 3. Devido ao fato de o controle ser análogo para ambos os canais, a simulação foi efetuada para um canal apenas, correspondente ao ângulo X_{30} .

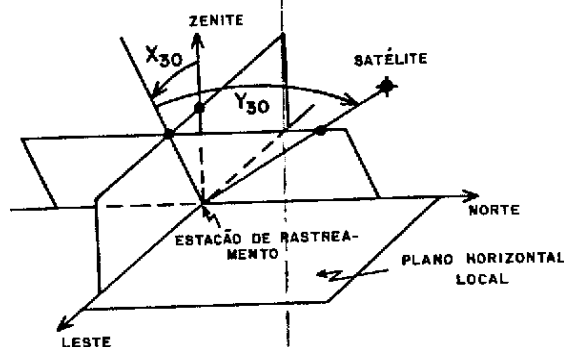


Fig. 3. Ângulos de orientação da antena.

O vetor de referência utilizado possui, em cada instante, apenas as duas primeiras componentes não-nulas, as quais consistem do ângulo X_{30} e respectiva variação temporal. Os valores dessas componentes, nos consecutivos instantes de discretização, são calculados a partir da simulação da órbita de um satélite de baixa altitude. A função de não-linearidade foi modelada pela Equação (8) com

$$c = 10.0 \quad \text{e} \quad d = 0.001.$$

A Figura 4 apresenta resultados da aplicação do algoritmo, a título de comparação, considerando-se um valor $U_{\max}$ grande, a fim de que o controle não entre na região saturada. Note-se que em aproximadamente 0,7 seg o erro atinge seu valor de regime que é de aproximadamente $4,2 \times 10^{-04}$ graus.

Para analisar o comportamento do sistema quando operando dentro da região saturada, foram efetuadas diversas simulações, com $U_{\max} = 3$; $U_{\max} = 5$ e $U_{\max} = 10$. Como os resultados são semelhantes para todos os casos, apenas a simulação para

$U_{\max} = 3$ é apresentada. Para esse valor a função $N(u)$ atinge o valor de saturação durante instantes iniciais, quando o erro é grande, saindo definitivamente da saturação quando o erro torna-se menor. Isso pode ser observado pela Figura 5.

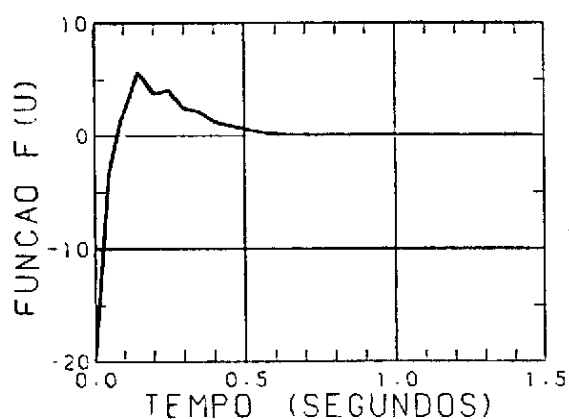


Fig. 4a.

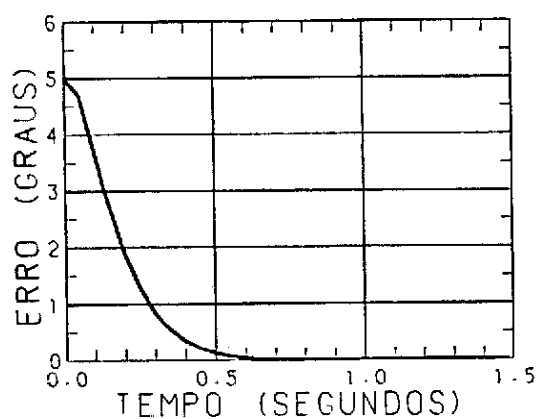


Fig. 4b.

Fig. 4. Resultados da simulação da antena de 30 pés, sem saturação.

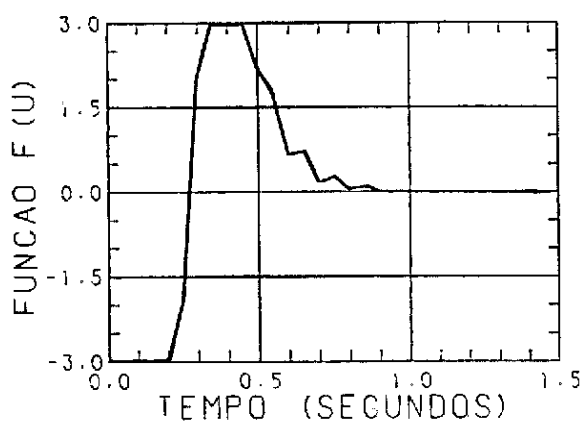


Fig. 5a.

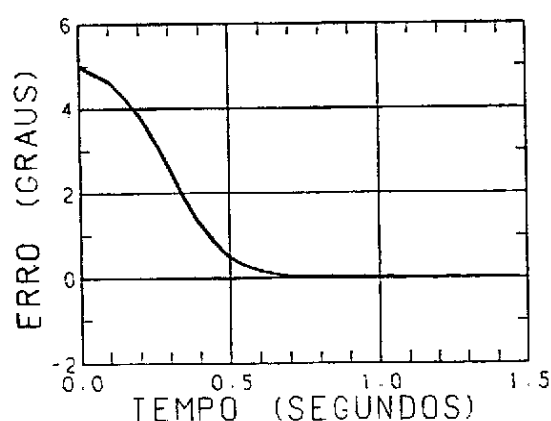


Fig. 5b.

Fig. 5. Resultados da simulação da antena de 30 pés, com saturação.

5. Conclusões

O algoritmo mostrado, além de apresentar cálculos rápi

dos e simples e inexistência da necessidade de inversões de matrizes, apresenta a característica de permitir o cálculo antecipado dos valores do controle a serem aplicados nos consecutivos instantes de discretização, a exceção do instante inicial. Este fato reforça as características de aplicação do algoritmo em tempo real. Comparações com dois outros algoritmos cujas referências foram citadas na introdução mostram resultados equivalentes em termos de precisão e tempo necessário para que o erro atinja seu valor de regime. Os cálculos obtidos em simulação numérica para vários valores de $U_{\max}$ mostraram que tanto o tempo de convergência como a precisão não são significativamente afetados quando o valor máximo imposto ao controle pela saturação, $U_{\max}$, varia significativamente de valor.

REFERÊNCIAS

- [1] Dressler, R.M. and Tabak, D., "Satellite tracking by combined estimation and control techniques", IEEE Transaction on Automatic Control, vol. AC-16, pp. 833-841 (1971).
- [2] Bryson, A.E.J. and Ho, Y., "Applied optimal control", edited by Blaisdell Publishing Co. (1969).
- [3] Kuga, H.K., "Estimação adaptativa de órbitas aplicada a satélites a baixa altitude", tese de Mestrado em Ciência Espacial, INPE, São José dos Campos, SP, INPE-2316-TDL/079 (1982).
- [4] Negreiros de Paiva, R., "Simulação de órbita e de observações de um satélite artificial ao redor da Terra", INPE, São José dos Campos, SP, INPE-1955-RPE/269 (1980).
- [5] Tabak, D., "An algorithm for real-time computer control of a tracking system with a nonlinearity", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-15, pp. 679-682 (1970).
- [6] Orlando, V., "Development of an algorithm for real-time control of a satellite tracking systems", INPE, São José dos Campos, SP, INPE-2421-PRE/128 (1982).
- [7] Volz, R.A. and Kazda, L.F., "Design of a digital controller for a tracking telescope", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. AC-12, pp. 359-368 (1967).