

1. Publicação nº <i>INPE-3181-PRE/546</i>	2. Versão	3. Data <i>Julho, 1984</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC/DGC</i>		Programa <i>CONTAT</i>	
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CONTROLE ADAPTATIVO                      MODELO DE REFERÊNCIA</i> <i>CONTROLE DE ATITUDE                    SATÉLITES COM APÊNDICES FLEXÍVEIS</i> <i>COMPENSAÇÃO DE ERRO</i>			
7. C.D.U.: <i>681.513.6:629.7.062.2</i>			
8. Título  <i>TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO UTILIZANDO UM ESQUEMA DE CONTROLE ATIVO PARA ANULAR O EFEITO ACUMULADO DO DESVIO DA MODELAGEM</i>		10. Páginas: <i>07</i>	
		11. Última página: <i>06</i>	
		12. Revisada por  <i>R.V.F. Lopes</i>  Roberto V. F. Lopes	
9. Autoria <i>Décio Castilho Ceballos</i> <i>Atair Rios Neto</i>		13. Autorizada por  <i>Parada</i>  Nelson de Jesus Parada Diretor Geral	
Assinatura responsável <i>Atair</i>			
14. Resumo/Notas  <i>Apresenta-se um procedimento de compensação de erro que atua globalmente no filtro e no controlador no sentido de compensar infidelidade de modelagem. A idéia básica do procedimento é anular o efeito acumulado de desvio de modelagem através do controle, de modo a induzir o sistema físico a se comportar como o modelo de trabalho utilizado na síntese e implementação do controle. O efeito acumulado de desvio de modelagem é estimado utilizando o conceito de divergência de filtro de estimação de estado. Aplicou-se o procedimento para controle em um eixo da atitude de um satélite com apêndices flexíveis, em que o sistema físico foi modelado para um sistema linear dinâmico, invariante no tempo, de décima quarta ordem. Utilizou-se, para síntese dos estimadores e controladores, um modelo de ordem dois que corresponde apenas ao movimento de corpo rígido. Os resultados obtidos são excelentes de forma absoluta e quando comparados com outros procedimentos.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho será apresentado no 1º Congresso Latino-Americano de Automática/5º Congresso Brasileiro de Automática - 1º CLA/5º CBA - Campina Grande, PB, de 3 a 6 de setembro de 1984.</i>			

## TÉCNICAS DE COMPENSAÇÃO UTILIZANDO UM ESQUEMA DE CONTROLE ATIVO PARA ANULAR O EFEITO ACUMULADO DO DESVIO DA MODELAGEM

Décio Castilho Ceballos  
Atair Rios Neto

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq  
C.P. 515 - São José dos Campos - 12.200 - São Paulo - Brasil

### Resumo

Apresenta-se um procedimento de compensação de erro que atua globalmente no filtro e no controlador no sentido de compensar infidelidade de modelagem. A idéia básica do procedimento é anular o efeito acumulado de desvio de modelagem através do controle, de modo a induzir o sistema físico a se comportar como o modelo de trabalho utilizado na síntese e implementação do controle. O efeito acumulado de desvio de modelagem é estimado utilizando o conceito de divergência de filtro de estimação de estado. Aplicou-se o procedimento para controle em um eixo da atitude de um satélite com apêndices flexíveis, em que o sistema físico foi modelado para um sistema linear dinâmico, invariante no tempo, de décima quarta ordem. Utilizou-se, para síntese dos estimadores e controladores, um modelo de ordem dois que corresponde apenas ao movimento de corpo rígido. Os resultados obtidos são excelentes de forma absoluta e quando comparados com outros procedimentos.

Compensating technique using one active control scheme to nullify the accumulated effect of modelling deviation

### Abstract

A procedure which acts globally in the filter and controller in a way to compensate the restricted fidelity in modelling is presented. The basic idea of this procedure is to nullify the accumulated effect of the deviation in the modelling by using a correction in the control, such as to induce the physical system to have a behaviour close to the model of work used in the synthesis and implementation of the control. This effect is estimated using the concept of divergence in the filter of the state estimator. The procedure was applied to the attitude control of one of the axes of a satellite with flexible appendages whose physical model was approximated by a 14th order time invariant linear dynamic system. For the filter and controller synthesis a working model of order two was used corresponding to the rigid body motion. The results obtained were excellent both in absolute sense and in comparison with other procedures.

### 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas que resistam a infidelidade de modelagem é um dos problemas mais importantes da teoria de controle de sistemas por realimentação. As restrições na fidelidade da modelagem estão sempre presentes por um ou mais dos seguintes motivos: desconhecimento da física do problema; excessiva complexidade para o desenvolvimento de um esquema de controle; restrições nos recursos computacionais; e esquemas que envolvem controle descentralizado. Os controladores adaptativos, particularmente os que envolvem auto-sintonização e modelo de referência, aparecem como alternativa para resolver este problema (Landau, 1979; Astrom, 1980; Isermann, 1982; Narendra and Peterson, 1980; Parks et alii, 1980; Davison and Hughes, 1982).

A técnica de controle adaptativo envolvendo do modelo de referência não apresenta estrutura completamente realimentada; o modelo de referência é posto em um esquema não-realimentado por observações de estado. Este aspecto limita o bom desempenho da técnica a situações onde perturbações intermediárias possam ser consideradas desprezíveis, o que não é o caso dos problemas de regulação.

A teoria dos reguladores auto-sintonizados é pouco desenvolvida, e estudos de estabilidade foram realizados para problemas simples com hipóteses muito fortes para aplicações práticas. Uma destas hipóteses é a de fixação de um limite superior para a ordem do sistema que, para algumas aplicações como por exemplo satélites com grandes apêndices flexíveis, é muito restrita (Davison and Hughes, 1982).

Este trabalho desenvolve uma técnica de compensação de erro de modelagem atuando globalmente sobre o filtro e o controlador para melhorar o desempenho de sistemas de controle que envolvem reguladores e modelagem im perfeita. A idéia básica é avaliar o efeito dos desvios de modelagem e atuar uma correção através do controle, de modo que o sistema real tenda a evoluir segundo o modelo de trabalho. A avaliação do efeitos dos desvios de modelagem é feita através de dois filtros: um com características de acompanhamento do modelo de trabalho ou divergente em relação ao sistema real; outro que pode ser um filtro propriamente dito ou algum outro esquema de observação com características favoráveis ao acompanhamento do sistema real. O esquema é implementado através de procedimentos usuais de controle ótimo estocástico de sistemas lineares.

O procedimento foi aplicado ao controle em um eixo de um satélite com painéis flexíveis. Os efeitos da flexibilidade em sistemas no espaço, sob o ponto de vista de controle, são muito importantes. Isto porque o projeto do sistema de controle imporá restrições às características de flexibilidade, já que praticamente não existem restrições estruturais aos painéis pelos pequenos torques ambientais existentes. Por outro lado, o aumento da demanda de energia elétrica, devido à sofisticação e potência crescentes dos equipamentos a bordo, impõe a utilização de painéis cada vez maiores.

Na Seção 2 descreve-se o procedimento; na Seção 3 discute-se o problema do controle do efeito de desvio da modelagem para sistemas lineares com ordem reduzida; na Seção 4 apresenta-se a aplicação numérica e na Seção 5 as conclusões.

## 2. ESQUEMA DE CONTROLE

O esquema apresentado (Figura 2.1) utiliza uma abordagem estocástica que usa como referência a saída de um filtro com características especiais de fidelidade para a modelagem segundo a qual foi projetado. Este filtro, denominado na Figura 2.1 filtro básico, é associado a um controlador básico projetado para satisfazer os objetivos de engenharia do sistema de controle. A partir do sistema básico o esquema é completado através de um filtro que avalie o estado da forma mais realista possível e de um controle de compensação que anule o desvio entre um filtro e outro.

A avaliação dinâmica do desvio de modelagem é feita diretamente através de dois processos de filtragem de estado. A avaliação numérica deste efeito acumulado pode ser feita através de dois filtros, um com maior tendência para divergência e outro com menor tendência ou não-divergente. Este desvio avaliado é utilizado para alimentar o controlador de compensação.

Considere-se o sistema de equações dinâmicas que representam um modelo de avaliação, com dinâmica:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{w}, t), \quad (2.1)$$

e o vetor de observações:

$$\bar{y} = \bar{h}(\bar{x}, \bar{u}, \bar{v}, t). \quad (2.2)$$

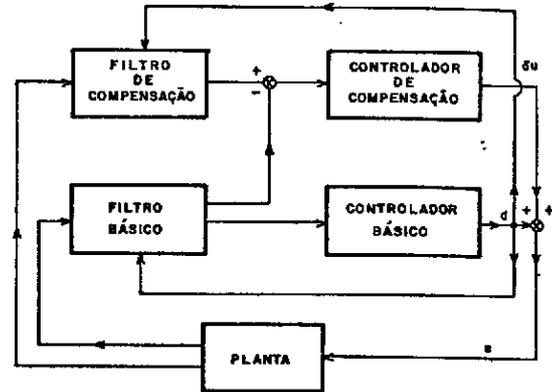


Fig. 2.1: Esquema adaptativo proposto.

Suponha-se que por meio de alguma abordagem estocástica é possível, através do modelo de trabalho:

$$\dot{x} = f(x, u, w, t), \quad (2.3)$$

$$y = h(x, u, v, t), \quad (2.4)$$

determinar as variáveis estimadas  $\hat{x}$  e  $\hat{z}$ , onde  $\hat{x}$  é a estimativa da correspondente partição do estado real e  $\hat{z}$  é uma estimativa da mesma partição, mas através de um filtro com alta fidelidade ao modelo de trabalho correspondente às Equações 2.3 e 2.4.

O efeito do desvio da modelagem é representado por:

$$\delta\bar{x} = \bar{x} - \hat{z}, \quad (2.5)$$

e o controle é dado por:

$$u(\bar{x}, \delta\bar{x}) = u(\hat{z}) + u(\delta\bar{x}), \quad (2.6)$$

onde  $u(\delta\bar{x})$  é calculado a partir de alguma abordagem estocástica utilizando o modelo:

$$\begin{aligned} \delta\dot{x} = & f(x, u(\hat{z}, \delta\bar{x}), w, t) - \\ & - f(\hat{z}, u(\hat{z}), w, t). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Uma questão fundamental, quando o controle é calculado segundo o esquema proposto, é a análise da estabilidade do sistema de avaliação (Equações 2.1 e 2.2). Uma abordagem teórica do problema poderia ser realizada em duas fases. Numa primeira seria a análise da viabilidade de anulação de  $\delta x$  quando o tempo tende a infinito. Em uma segunda fase seria a análise do efeito da anulação de  $\delta x$  sobre a estabilidade global do sistema. Uma vantagem a ser explorada é o projeto de controle em dois níveis. Num primeiro, o controle básico é projetado exclusivamente para satisfazer os requisitos de engenharia. Num segundo, um controle de compensação de erro é projetado

do exclusivamente para eliminar, da melhor forma, os efeitos de desvio da modelagem.

### 3. CONTROLE DO DESVIO DE MODELAGEM

Considere-se o sistema representado pelas equações:

$$\dot{\bar{x}} = F\bar{x} + G\bar{u} + L\bar{w}, \quad (3.1)$$

$$y = H\bar{x} + v. \quad (3.2)$$

Suponha-se que as matrizes  $F$ ,  $G$ ,  $L$ ,  $H$  possam ser particionadas em:

$$F = \begin{bmatrix} F_d & F_{dc} \\ F_{cd} & F_c \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$H = [H_d \quad H_{dc}], \quad (3.4)$$

$$G^T = [G_d^T \quad G_{cd}^T], \quad (3.5)$$

$$L^T = [L_d^T \quad L_{cd}^T], \quad (3.6)$$

onde  $F_d(n_d \times n_d)$ ,  $F_c(n_c \times n_c)$ ,  $H_d(m \times n_d)$ ,  $H_{dc}(m \times n_c)$ ,  $G_d(n_d \times r)$ ,  $G_{cd}(n_c \times r)$ ,  $L_d(n_d \times k_w)$ ,  $L_c(n_c \times k_w)$ ,  $F_{dc}(n_d \times n_c)$  e  $F_{cd}(n_c \times n_d)$  são partições das matrizes originais.

Os termos  $F_d$ ,  $G_d$ ,  $H_d$  e  $L_d$  correspondem à partição do sistema que de alguma forma é importante para os objetivos de engenharia, além de os critérios matemáticos serem considerados para a redução do modelo (Ceballos, 1983). Utilizar-se-á a nomenclatura dominante para o sistema "d" e complementar para o sistema "c". Os termos com subscritos duplos são de acoplamento.

A partir do modelo de avaliação (Equações 3.1 a 3.6) considere-se o modelo de trabalho:

$$\dot{\bar{x}}_d = F_d \bar{x}_d + G_d \bar{u}_d + L_d \bar{w}, \quad (3.7)$$

$$y = H_d \bar{x}_d + v_d. \quad (3.8)$$

As equações envolvidas para modelamento global da dinâmica e esquema de controle da Figura 2.1 são:

$$\dot{\bar{x}}_d = F_d \bar{x}_d + F_{dc} \bar{x}_c + G_d \bar{u}_d + L_d \bar{w}, \quad (3.9)$$

$$\dot{\bar{x}}_c = F_{cd} \bar{x}_d + F_c \bar{x}_c + G_{cd} \bar{u}_d + L_c \bar{w}, \quad (3.10)$$

$$\dot{\bar{z}}_d = F_d \bar{z}_d + G_d \bar{u}_d + L_d \bar{w}, \quad (3.11)$$

$$\dot{\bar{x}}_d = F_d \bar{x}_d + G_d \bar{u}_d + k_x (y - H_d \bar{x}_d), \quad (3.12)$$

$$\dot{\bar{z}}_d = F_d \bar{z}_d + G_d \bar{u}_d + k_z (y - H_d \bar{z}_d), \quad (3.13)$$

$$\bar{u}_d = c_d \bar{z}_d, \quad (3.14)$$

$$u = u_d + c_e (\bar{x}_d - \bar{z}_d), \quad (3.15)$$

$$y = H_d \bar{x}_d + H_{dc} \bar{x}_c + v. \quad (3.16)$$

Os ganhos  $c_d$ ,  $c_e$ ,  $k_x$ ,  $k_z$  devem ser projetados para:

- associar  $z_d$  aos objetivos de engenharia;
- anular ou pelo menos minimizar, segundo alguma norma, a diferença entre  $\bar{z}_d$  e  $\bar{x}_d$ ; isto equivale a anular ou pelo menos minimizar os efeitos dos acoplamentos  $F_{dc}$  e  $H_{dc}$ ;
- realizar estimativas não-tendenciosas de  $x_d$  através de  $\bar{x}_d$ ; neste caso, pressupõem-se observações em quantidade e precisão compatíveis a pouca confiabilidade da modelagem de trabalho;
- realizar estimativas de  $z_d$  através de  $\bar{z}_d$  com um mínimo de tendenciosidade;
- permitir a  $\bar{z}_d$  suficiente capacidade de acomodação a erros de estimativas iniciais e às perturbações aleatórias  $\bar{w}$ .

O cálculo de  $c_d$ ,  $c_e$ ,  $k_x$ ,  $k_z$ , considerando globalmente as Equações 3.9 a 3.16, seria muito difícil e parece ser desnecessário. A seguir é apresentado heurísticamente um procedimento para o cálculo destes ganhos, com bom resultado, para o problema apresentado na Seção 4. A característica principal do procedimento é definir objetivos específicos para cada um desses ganhos, de modo que possam ser calculados independentemente.

Os ganhos  $c_d$  e  $c_e$  são projetados em dois níveis. Um primeiro que, através de  $c_d$ , o sistema básico satisfaça os requisitos de engenharia (condição a), e um segundo que, através de  $c_e$ , o sistema de compensação anule o desvio de modelagem acumulado (condição b). Os ganhos  $k_x$  e  $k_z$  são projetados para satisfazerem a condição (c) e condições (d,e), respectivamente.

Definidos esses objetivos específicos os ganhos  $k_x$ ,  $k_z$ ,  $c_d$  e  $c_e$  podem ser calculados facilmente como a solução de um problema do tipo regulador ótimo de sistemas lineares com índice quadrático (LQC), utilizando técnicas usuais dentro da teoria de controle moderno. O cálculo de ganho  $c_d$  é feito utilizando as matrizes que definem a dinâmica para  $z_d$ , ( $F_d$ ,  $G_d$ ). Utilizando como realimentação do controle o ganho  $c_d$ , o projeto de  $k_x$  e  $k_z$  pode ser feito usando as matrizes ( $F_d$ ,  $G_d$ ,  $L_d$ ,  $H_d$ ) que definem o problema de observação de um sistema linear. A anulação do desvio de modelagem corresponde a um problema de rastreamento do estado  $\bar{z}_d$  pelo estado  $\bar{x}_d$  (condição b), ou para o problema determinístico de rastreamento do estado  $z_d$  pelo estado  $x_d$ . Neste caso e considerando o problema determinístico as Equações 3.9 a 3.16 podem ser substituídas para efeito de projeto de  $c_e$  em:

$$\delta \dot{\bar{x}}_d = F_d \delta \bar{x}_d + F_{dc} \bar{x}_c + G_d \delta \bar{u}_d, \quad (3.17)$$

$$\dot{x}_c = F_{cd}x_d + F_c x_c + G_{cd}(u_d + \delta u), \quad (3.18)$$

$$\delta u = c_e \delta x_d; \quad \delta x_d \triangleq x_d - \bar{z}_d. \quad (3.19)$$

O cálculo de  $c_e$  utilizando as Equações 3.17 a 3.19 é um problema de controle de sistema linear com o controle alimentado por um estado reduzido. Uma forma de encontrar o ganho  $c_e$  seria otimizar alguma norma que envolva  $x_d$  e  $x_c$  globalmente; técnica semelhante foi utilizada em Ceromel e Bernussou (1982) para aplicação em controle descentralizado. Outra forma é simplesmente resolver um problema de regulagem de um sistema ( $F_d, G_d$ ) envolvendo uma função de custo,

$$J = \int_0^{\infty} \delta x_d^T A \delta x_d + \delta u^T B \delta u dt, \quad (3.20)$$

onde as funções de custo A e B são escolhidas com a ajuda de simulações de forma que a estabilização de estado global  $x_d$  e  $x_c$  seja satisfatória.

A hipótese de que  $z_d$  varia lentamente em relação a  $x_d$  simplificou o cálculo de  $c_e$ . Não considerando esta hipótese o cálculo de  $c_e$  envolveria simultaneamente as Equações 3.9 a 3.16. Outro aspecto a ser considerado é que para os problemas em que essa hipótese não for razoável, a satisfação da condição b pode ser crítica. No entanto, em sistemas dinâmicos normalmente as variáveis associadas a frequência de curtos períodos são truncadas em favor das variáveis de longo período, como é o caso do exemplo numérico da Seção 4 tornando importante a classe dos problemas em que esta hipótese é verdadeira.

A anulação dos efeitos dos acoplamentos  $F_{dc}$  e  $H_{dc}$  (condição b) torna os sistemas (d) e (c) desacoplados. Foi mostrado em Ceballos (1983) que se  $F_c$  e ( $F_c, G_{cd}c_d$ ) forem estáveis o sistema global ( $F, G_{cd}$ ) é estável se a condição b for satisfeita.

#### 4. APLICAÇÃO NUMÉRICA

A espaçonave solar-elétrica é projetada para utilizar propulsão solar-elétrica em suas manobras no espaço. Por este motivo ela é projetada para utilizar enormes painéis flexíveis, o que torna a dinâmica do sistema particularmente complexa.

A seguir, é apresentada, com base em Skelton e Likins (1978) e Larson e Likins (1977), a modelagem correspondente ao movimento de rotação em um eixo. A modelagem e os valores numéricos apresentados correspondem ao eixo que possui maiores influências dos efeitos de flexibilidade dos painéis.

Os valores numéricos utilizam os seis modos de vibração com maiores influências sobre a modelagem do corpo rígido. O modelo de avaliação gerado é de ordem quatorze:

$$\dot{x} = Fx + Gu + Lw, \quad y = Hx + v, \quad (4.1)$$

onde  $x(n \times 1)$  é o vetor de estado decomposto

em ângulo de apontamento ( $\theta x$ ), variáveis nodais ( $s$ ) e respectivas velocidades;  $y(m \times 1)$  é o vetor de observações; e

$$F = \begin{bmatrix} 0 & I \\ J^{-1}V_1 & J^{-1}V_2 \end{bmatrix}; \quad (4.2)$$

$$G = L = \begin{bmatrix} 0 \\ J^{-1}b \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}; \quad (4.3)$$

$$q = \begin{bmatrix} \theta \\ x \\ s \end{bmatrix}; \quad J = \begin{bmatrix} J_{xx} & -g^T \\ -g & I \end{bmatrix}; \quad (4.4)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -2C_a f \end{bmatrix}; \quad V_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -f^2 \end{bmatrix}; \quad (4.5)$$

$$f = \text{diag}(f_1, f_2, \dots, f_r); \quad H = [H_s \ 0]; \quad (4.6)$$

$$b_r = \begin{bmatrix} -b \\ 0 \end{bmatrix}; \quad s^T = [s_1, s_2, \dots, s_r]; \quad (4.7)$$

$$g^T = [g_1, g_2, \dots, g_r]; \quad Q = E(w \cdot w^T); \quad (4.8)$$

$$R = E(v \cdot v^T). \quad (4.9)$$

As frequências e parâmetros de acoplamento dos modos de vibração mais significativos (Larson and Likins, 1977) são apresentados na Tabela 4.1. Os demais parâmetros são o coeficiente de amortecimento,  $c_a = .005$ ; o empuxo nominal,  $b = 1.12$ ; a escala de sensor,  $H_{sx} = 300$ ; o momento de inércia,  $J_{xx} = 33353$ . e a covariância do ruído do estado,  $Q = 1.E-04$ .

TABELA 4.1 Frequência e parâmetros de acoplamentos

MODO NÚMERO $i$	FREQUÊNCIA (HERTZ) $f_i$	ESCALAR DE ACOPLAMENTO (g)
1	0.07	172.16
7	0.106	+ 4.95
9	0.156	-41.33
15	0.228	2.48
17	0.236	- 1.63
19	0.239	12.22

O modelo de trabalho adotado é o modelo de ordem dois, ou seja, o modelo de corpo rígido. O intuito disto é reduzir ao máximo a ordem do sistema de controle, o que salienta as diferenças em relação ao modelo de avaliação

CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE AUTOMATIZAÇÃO  
E CONTROLE DO BRASIL (1977) DE SÃO PAULO

ção. Para este modelo as equações correspondentes e valores numéricos são obtidos através das Equações 4.2 a 4.9 com  $n = 2$ , o que resulta em  $F_{11} = 0.$ ;  $F_{12} = 1.$ ;  $F_{21} = 0.$ ;  $F_{22} = 0.$ ;  $L_{11} = G_{11} = 0.$ ;  $L_{21} = G_{21} = -3.358E-05$ ;  $H_{11} = 300.$ ;  $H_{21} = 0.$ ;  $R_{11} = 2.1058E-08$ ; e  $Q_{11} = 1.E-04$ . É interessante observar que esta forma de obtenção do modelo de trabalho corresponde ao truncamento no sistema de variáveis híbridas (Larson and Likins, 1977; Likins et alii, 1976).

Os ganhos dos controladores foram obtidos resolvendo a equação de Riccati estacionária pelo método de matriz sinal (Barraud, 1980). Os valores das matrizes de peso A e B (Equação 3.20) foram obtidos conforme o sugerido na Seção 3. A Tabela 4.2 apresenta estes valores e o ganho correspondente; os valores 1 correspondem a um projeto para  $c_d$  e os valores 2 a um projeto para o ganho  $c_d$ .

TABELA 4.2 Valores de ganhos de controladores

VALORES	1	2
A <sub>11</sub>	.100E+05	.100E+07
A <sub>22</sub>	.100E+05	.100E+07
C <sub>1</sub>	.1000E+03	.1000E+04
C <sub>2</sub>	.2442E+04	.7782E+04

Os filtros necessitam de um ganho para acrescentar as inovações e das matrizes de transição (M) e de convolução do controle ( $I_u$ ) para propagação do estado (Equação 4.10). Estes valores são funções da taxa de amostragem que foi adotada ( $T_k = .1$ ). As matrizes M e  $I_u$  foram obtidas através de uma expansão de primeira ordem no tempo e resultaram em:  $M_{11} = 1.$ ;  $M_{12} = .1$ ;  $M_{21} = 0.$ ;  $M_{22} = 1.$ ;  $I_{u11} = -1.679E-07$ ; e  $I_{u21} = -3.358E-06$ . Os ganhos foram obtidos para satisfazer os requisitos da Seção 3 utilizando a técnica do filtro de covariância constante (Jazwinski, 1970). Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados. Os valores 1 são projetados para satisfazer a condição c (Seção 3) e os valores 2 as condições d e e:

$$x(k+1) = M(k+1,k)x(k) + I_u(k+1,k)u(k) \quad (4.10)$$

TABELA 4.3 Valores de ganhos de filtros

VALORES	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
1	.1159E-02	.1796E-02
2	.1339E-03	.2712E-04

Os testes realizados através de simulação digital buscam qualificar o esquema proposto e comparar os resultados obtidos em relação a um esquema normal envolvendo um filtro e um

controlador. O tempo físico para o término da integração numérica foi de 200 seg. e os erros numéricos absolutos e relativos adotados no algoritmo de integração foram de  $1.E-06$ . O desvio angular inicial suposto foi de 5. miliradianos (mrad) e a velocidade angular 0. mrad/seg. Os valores das estimativas iniciais foram adotados .45 mrad e 0. mrad/seg., para o sistema normal; e 0. mrad e 0. mrad/seg., na simulação do sistema com compensação para simular um desvio angular brusco.

A Figura 4.1 apresenta no gráfico superior o desvio angular para um controlador normal, filtro e controlador, com ganhos (1) para o filtro e ganhos (1) para o controlador. A Figura 4.1 apresenta no gráfico intermediário o mesmo resultado, com ganhos (2) para o controlador e ganho (1) para o filtro. Deve-se observar que utilizando os ganhos (1) para o controlador o sistema não sofre grande influência dos painéis, mas a resposta e precisão de apontamento podem ser insuficientes para requisitos mais exigentes de engenharia. Utilizando os ganhos (2) as influências dos painéis da dinâmica do sistema tornam os resultados não-satisfatórios. A utilização de ganhos (2) para o filtro e o controlador, sem utilização do esquema de compensação resultou em comportamento instável.

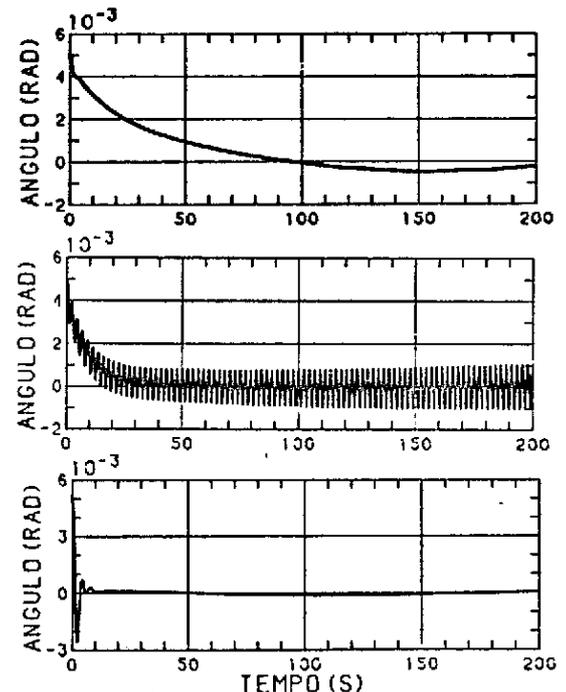


Fig. 4.1: Desvios angulares verdadeiros.

A Figura 4.1 apresenta no gráfico inferior o desvio angular utilizando o esquema adaptativo proposto. Deve-se observar que os resultados são significativamente melhores, a dinâmica não foi influenciada pelos painéis, mesmo para um projeto do sistema básico com condições de resposta exigentes.

## 6. CONCLUSÕES

A expectativa de melhoria do desempenho do sistema de controle, provocada pela utilização do compensador proposto, será especialmente fundamentada no desacoplamento previsto entre os subsistemas dominante "d" e complementar "c", somente através da acomodação da parte dominante "d" do sistema à saída de um filtro com especiais características de fidelidade a um modelo básico de projeto. Foi mostrado em Ceballos (1983), supondo garantida a acomodação perfeita, que este desacoplamento é verdadeiro no caso de sistemas lineares. Uma destas hipóteses diz respeito ao esquema de filtros propostos que avalia perfeitamente o desvio de modelagem e a outra que este desvio pode ser anulado completamente através do controle de compensação. A aplicação desenvolvida na Seção 4 mostrou que estas hipóteses foram suficientemente satisfeitas no exemplo numérico analisado, e com o auxílio de simulações a técnica proposta pode ser utilizada e qualificada em cada caso.

O exemplo numérico da Seção 4 foi utilizado em Larson e Likins (1976, 1977) que concluíram que, para requisitos de resposta menos exigentes e ganhos baixos para o controle, um modelo de trabalho de ordem dois é suficiente. Por outro lado, para ganhos elevados, modelos de trabalho a partir de sexta ordem foram necessários.

Os modelos de trabalho de ordem elevada podem apresentar problemas de observabilidade no estimador e é de fundamental importância a precisão destes modelos (Larson and Likins, 1976). Um desvio na frequência da ordem de 20% tornaria o estimador divergente e todo o sistema instabilizar-se-ia. Este problema é especialmente crítico se consideradas as dificuldades de modelagem e a obtenção de valores numéricos para um satélite com enormes painéis. Isto salienta a importância dos resultados obtidos para modelos de trabalho de ordem dois. A modelagem de ordem elevada torna-se menos importante já que é utilizada somente para análise e avaliação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ástrom, K.J. "Design principles for self-tuning regulators". In: Unbehauen, H., ed. Methods and applications in adaptive control; proceedings of a Symposium in Bochum, 1980. Springer Verlag, Berlin, 1980, p. 1-20 (Lectures notes in Control and Information Sciences, 24).
- Barraud, A.Y. "An accelerated process to solve Riccati equation via matrix sign functions". In: IFAC SYMPOSIUM, Zurich, Switzerland, 1979. Computer Aided Design of Control Systems; proceedings, Oxford, Pergamon, p. 9-14, 1980.
- Ceballos, D.C. Controlador com técnica de compensação baseada em um esquema de controle ativo sobre o efeito acumulado do desvio da modelagem. Tese de Doutorado, São José dos Campos, INPE, SP. 1983. (INPE-2987-TDL/152).
- Davison, E.J. & Hughes, P.C. A study to determine control techniques applicable to third-generation spacecraft. Toronto, Canada, Electrical Engineering Consociates Limited, 1982. (Rep. nº EEC-C339).
- Geromel, J.C. & Bernussou, J. "Optimal decentralized control of dynamic systems". Automatica, 18(5):545-557, 1982.
- Iserman, R. "Parameter adaptive control algorithms - a tutorial". Automática, 18(5):513-528, 1982.
- Jazwinski, A.H. Stochastic process and filtering theory. New York, Academic, 1970.
- Larson, V. & Likins, P. "An application of modern control theory of an elastic spacecraft". In: EUROPEAN SPACE AGENCY. Dynamics and Control of Non-Rigid Spacecraft, proceedings of a Symposium held in Frascati, Italy, 24-26, may, 1976, Nereilly, ESA, 1976, 221-226. (ESA SP 117).
- Larson, V. & Likins, P.W. "Optimal estimation and control of elastic spacecraft". In: Leondes, C.T., Ed. Control and Dynamic Systems. New York, Academic, 1977, vol. 13, p. 285-322.
- Landau, I.D. Adaptive control - the model reference approach. New York, Marcel Dekker, 1971.
- Likins, P. & Ohkami, Y. & Wong, C. Appendage modal coordinate truncation criteria in hybrid coordinate dynamic analysis. Journal of Spacecraft, 13(10): 611-617, 1976.
- Narendra, K.S. & Peterson, B.B. "Recent developments in adaptive control". In: Unbehauen, H., ed. Methods and Applications in Adaptive Control, proceedings of a Symposium in Bochum, 1980. Springer Verlag, Berlin, 1980, p. 85-101 (Lectures notes in control and Informations Sciences, 24).
- Parks, P.C. & Schaufelberger & Schmid, C. & Unbehauen, H. "Applications of adaptive control systems". In: Unbehauen, H., ed. Methods and Applications in Adaptive Control, proceedings of a Symposium in Bochum, 1980. Springer-Verlag, Berlin, 1980, p. 161-198. (Lectures notes in Computer and Informations Sciences, 24).
- Skelton, R.E. & Likins, P.W. "Techniques of modelling and model error compensation in linear regulators problems". In: Leondes, C.T., ed. Control and Dynamic Systems. New York, Academic, 1978, vol. 14, p. 1-101.