

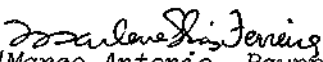


1. Publicação nº <b>INPE-4753-PRE/1425</b>	2. Versão	3. Data <b>Dez. 1988</b>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa
4. Origem <i>DCG</i>		<input type="checkbox"/> Restrita	
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>RODA DE REAÇÃO      CONTROLE POR MODELO DE REFERÊNCIA</i> <i>CONTROLE DIGITAL    TEMPO DE DISCRETIZAÇÃO</i>			
7. C.D.U.: <b>629.7.062.2</b>			
8. Título  <i>PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REAÇÃO USANDO MODELOS DE REFERÊNCIA</i>		10. Páginas: <b>8</b>	11. Última página: <b>7</b>
9. Autoria  <i>GILBERTO DA CUNHA TRIVELATO</i> <i>MARCELO LOPES DE OLIVEIRA E SOUZA</i>		12. Revisada por   <i>Agenor de Toledo Fleury</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por   <i>Marco Antonio Raupp</i> - Diretor Geral -	
14. Resumo/Notas  <i>Este trabalho apresenta o projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação (usadas no controle de atitude de satélites artificiais) usando modelos de referência. Este controlador tem como objetivo a redução dos efeitos dos: i) torques perturbadores na roda e, ii) ruídos nos seus sensores, sobre o torque produzido pela roda. Para isso, resume-se: 1) a estrutura de controle utilizada, 2) os critérios para a escolha do tempo de discretização da roda, do ganho do controlador, do nível de quantização da medida do sensor, e do nível de quantização da corrente do controlador para o atuador, tudo isso considerando as especificações exigidas para o torque de saída da roda. Finalmente apresentam-se: 1) as respostas do sistema simuladas digitalmente para um torque de referência nulo e do tipo degrau e, 2) as correspondentes respostas implementadas em "hardware". Estes testes mostram que: 1) o controlador utilizado reduz sensivelmente aqueles e feitos e atende aquelas especificações, 2) os critérios de projeto de finidos são satisfatórios.</i>			
15. Observações  <i>Este trabalho foi submetido e aceito para ser apresentado no 7º SBA (Congresso Brasileiro de Automática, 15 a 19/AGO, ITA, SJCAMPOS).</i>			



- DISSERTAÇÃO  
 TESE  
 RELATÓRIO  
 OUTROS

TÍTULO

PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REAÇÃO USANDO MODELOS DE REFERÊNCIA

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)  
Gilberto da Cunha Trivelato  
Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

ORIENTADOR

DISS. OU TESE

CO-ORIENTADOR

DIVULGAÇÃO

EXTERNA  INTERNA  RESTRITA

EVENTO/MEIO

CONGRESSO  REVISTA  OUTROS

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGÃO

— / — / —

— / — / —

NOME DO REVISOR

AGENOR DE TOLEDO FUEURY

NOME DO RESPONSÁVEL

DECIO CASTILHO CEBALLOS

APPROVAÇÃO

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

10 / 05 / 88

12 / 05 / 88

*[Assinatura]*

APROVADO

SIM

NÃO

DATA do Departamento

1 / Controle e Guiagem

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR.

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

89

2

03.06.88

Naulis Prado de Carvalho

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

DATILOGRAFIA

PÁG.

DEVOLVIDO

ASSINATURA

19

6 / 6 / 88

Naulis prod. de Carvalho

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILOGRAFA

— / — / —

Nº DA PUBLICAÇÃO: 4753AR6 / 1425 (12) PÁG.:

CÓPIAS:

Nº DISCO:

LOCAL:

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

SIM

NÃO

— / — / —

DIRETOR

OBSERVAÇÕES E NOTAS

PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REAÇÃO USANDO MODELOS DE REFERÊNCIA

Gilberto da Cunha Trivelato  
Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515  
12201 São José dos Campos - SP

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação (usadas no controle de atitude de satélites artificiais) usando modelos de referência. Este controlador tem como objetivo a redução dos efeitos dos: i) torques perturbadores na roda e, ii) ruídos nos seus sensores, sobre o torque produzido pela roda. Para isso, resume-se: 1) a estrutura de controle utilizada, 2) os critérios para a escolha do tempo de discretização da roda, do ganho do controlador, do nível de quantização da medida do sensor, e do nível de quantização da corrente do controlador para o atuador; tudo isso considerando as especificações exigidas para o torque de saída da roda. Finalmente apresentam-se: 1) as respostas do sistema simuladas digitalmente para um torque de referência nulo e do tipo degrau e, 2) as correspondentes respostas implementadas em "hardware". Estes testes mostram que: 1) o controlador utilizado reduz sensivelmente aqueles efeitos e atende aquelas especificações, 2) os critérios de projeto definidos são satisfatórios.

Palavras Chave: Roda de Reação, Controle por Modelo de Referência, Controle Digital, Tempo de Discretização, Nível de Quantização.

DESIGN OF A DIGITAL MODEL FOLLOWING CONTROLLER OF REACTION WHEEL TORQUES

Abstract

This paper presents the design of a digital model following controller of reaction wheel torques (used in attitude control of artificial satellites). This controller intends to reduce the effects of: i) wheel disturbing torques and, ii) wheel sensor noises, on the wheel torque. To do so it summarizes: 1) the controller structure used; 2) the criteria for choosing the wheel sampling time, the controller gain, the sensor quantization level and the current quantization level; all this considering the wheel torque requirements. Finally, it presents: 1) the digitally simulated system response to zero and step reference torques and, 2) the corresponding hardware implemented responses. These tests show that: 1) such controller reduces considerably those effects and satisfies those requirements, and 2) the design criteria used are satisfactory.

Keywords: Reaction Wheel, Model Following Control, Digital Control, Sampling Time, Quantization Level.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação (usadas no controle de atitude de satélites artificiais) usando modelos de referência. Este controlador tem como objetivo a redução dos efeitos dos: i) torques perturbadores na roda e, ii) ruídos nos seus sensores, sobre o torque produzido pela roda. Nele, a referência de torque é aplicada diretamente à roda real (física) e à roda ideal (simulação digital), que têm seus estados comparados. A diferença entre os estados das duas rodas provém daqueles efeitos e é utilizada

para excitar um controlador que força a roda real a seguir a ideal. Além disso, resume-se: 1) a estrutura de controle utilizada; 2) os critérios para a escolha do tempo de discretização da roda ( $T$ ), do ganho do controlador ( $P_w$ ), do nível de quantização da medida do sensor ( $Q_w$ ), e do nível de quantização da corrente do controlador para o atuador ( $Q_i$ ); tudo isso considerando as especificações exigidas para o torque de saída da roda. Finalmente apresentam-se: 1) as respostas do sistema simuladas digitalmente para um torque de referência nulo e do tipo degrau e, 2) as correspondentes respostas implementadas em "hardware".

## 2. CONTROLE POR MODELO DE REFERÊNCIA

A estrutura de controle utilizada é do tipo modelo de referência, utilizando um controlador proporcional e realimentação de velocidade, tal como foi proposto por Trivelato e Souza (1987) e desenvolvido por Trivelato (1988). O diagrama de blocos deste sistema é apresentado na Figura 1.

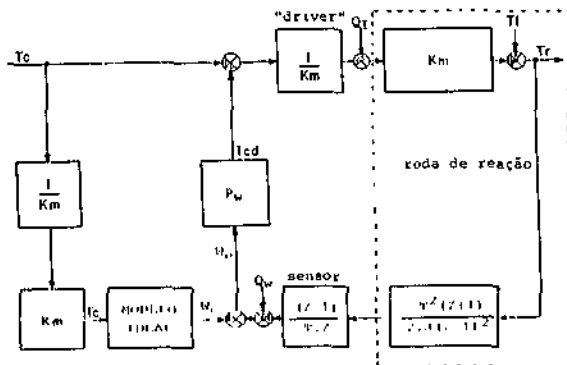


Fig. 1: Sistema de controle por modelo de referência.

A referência de torque ( $T_C$ ) é aplicada diretamente ("feedforward") à roda real (física) e a um modelo de referência ideal (simulado). A diferença ( $\omega_e$ ) entre as velocidades das duas rodas provem: 1) dos distúrbios de torque ( $T_i$ ) na roda, 2) do ruído de quantização na medida do seu sensor de velocidade ( $Q_w$ ) e, 3) do ruído de quantização na corrente ( $Q_i$ ). Esta diferença é utilizada para excitar um controlador que força a roda real a seguir o modelo de referência ideal através do torque de rejeição de distúrbios ( $T_{cd}$ ).

O modelo de referência adotado é uma roda de reação ideal, caracterizada por um volante de inércia sem nenhum atrito seco ou dinâmico, movimentado por um motor ideal sem perdas de qualquer natureza. Seu modelo matemático não apresenta problemas de divergência porque a referência de torque ( $T_C$ ) é constante por partes em períodos múltiplos do tempo de discretização da roda ( $T$ ).

## 3. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

O controlador utilizado será considerado satisfatório se atender às seguintes especificações:

- 1) Reduzir os efeitos dos torques perturbadores na roda ( $T_i$ ) e dos ruídos nos seus sensores ( $Q_w$ ) sobre o torque produzido pela roda ( $T_r$ ).
- 2) Apresentar um algoritmo simples, para permitir o controle em tempo real de mais de uma roda com um mesmo microcomputador.
- 3) Ter um erro de quantização ( $Q_T$ ) do torque de saída  $T_r$  com média ( $\mu$ ) nula e desvio padrão ( $\sigma$ ) da mesma ordem dos torques perturbadores provocados pelos mancais ( $\mu=3E-4$  Nm).

4) Responder, para um degrau de torque comandado ( $T_C$ ), com um tempo de subida ( $t_r$ ) do torque  $T_r$  bem menor que o tempo de discretização do sistema de controle de atitude do satélite ( $T_{sat}$ ), ou seja,  $t_r < 0,2 T_{sat}$ .

5) Apresentar, para a mesma entrada anterior, um tempo de acomodação ( $t_s$ ) de  $T_r$  em torno do seu valor de regime permanente bem menor que  $T_{sat}$ , ou seja,  $t_s < 0,3 T_{sat}$ .

## 4. CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR

Os critérios para seleção do ganho do controlador e do tempo de discretização da roda já foram apresentados por Trivelato e Souza (1987). Já os para seleção dos níveis de quantização do sistema são apresentados por Trivelato (1988). Eles são resumidos a seguir:

4.a - Tempo de Discretização da Roda ( $T$ ): Pelo teorema da amostragem e utilizando um fator de segurança de 10 vezes como sugerido por Franklin e Powell (1980), têm-se:

$$T < \pi / 5.W_d \quad (1)$$

onde:  $W_d$  é a maior frequência natural amortecida da malha de controle da roda.

O tempo de discretização deve superar o tempo de aquisição do sinal ( $t_a$ ), o tempo de processamento e cálculo do controle ( $t_p$ ) e o tempo de saída do controle ( $t_c$ ) para atuação no sistema. Portanto:

$$T > t_a + t_p + t_c \quad (2)$$

Quando o sensor utilizado é digital, o tempo de discretização deve ser superior ao tempo de medida ( $t_m$ ) deste sensor. Logo:

$$T \geq t_m \quad (3)$$

4.b - Ganho do Controlador ( $P_w$ ): A escolha do parâmetro  $P_w$  do controlador proporcional em velocidade deverá satisfazer as especificações da secção 3. A equação característica das funções de transferência relevantes é dada por:

$$P(z) = z^2 + (a - 1).z + a \quad (4)$$

onde:  $a = (P_w.T) / (2.J)$  e  $J$  é o momento de inércia do volante da roda.

Na Tabela 1 estão apresentadas as origens das condições para uma resposta adequada e os correspondentes critérios para seleção de  $P_w$ .

TABELA 1 Critérios para seleção do ganho  $P_w$ .

	ORIGEM	CRITÉRIO
1	Estabilidade	$P_w < 2.J.T$
2	Tipo de Resposta	$P_w > 0,345.J/T$
3	Tipo de Resposta	$P_w < 11,655.J/T$
4	Tempo de Subida	$P_w > \frac{J}{T} \cdot (-b_1 \sqrt{b^2 + 4})$
5	Tempo de Acomodação	$P_w \leq \frac{2.J}{T} \cdot \exp\left(-\frac{3.T}{t_s}\right)$
6	Sobre-elevação	$P_w < \frac{2.J}{T} \cdot \exp(-1,15\phi)$

onde:

$$b = 2 \cdot \cos[2,16.T/t_r]$$

$$\phi = 0,6.W_n.T$$

$W_n$  = frequência natural do sistema.

4.c - Níveis de Quantização do Sistema ( $Q_w$  e  $Q_i$ ): A quantização aparece em três partes principais do sistema: 1) no sensor digital de medida da velocidade da roda, 2) na unidade de processamento, e, 3) na corrente de saída do controlador para o atuador. Cada quantização é caracterizada por uma média e uma variação, comporta-se como uma entrada de um novo ruído, e provoca uma correspondente perturbação na saída do sistema. A perturbação total provocada na saída por essas entradas também pode ser caracterizada por uma média e uma variação.

Os critérios para a escolha destes níveis de quantização são definidos a partir das relações entre suas médias e variações e a média e a variação da correspondente perturbação provocada na saída. Aplicando-se os Teoremas de Parseval (propagação de sinais aleatórios através de funções de transferência discretas) e de Cauchy (cálculo da integral complexa em um contorno fechado), conforme apresentado por Katz (1981), a média ( $\mu_T$ ) e a variação ( $\sigma_T^2$ ) de um ruído na saída de um sistema causado por um ruído de quantização são dadas por:

$$\mu_T = \mu_Q \cdot \lim_{z \rightarrow 1} z \cdot D(z) \quad (5)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_Q^2 \cdot \sum \text{Res } D(z) \cdot D(z^{-1}) \cdot z^{-1} \quad (6)$$

onde:  $D(z)$  é a função de transferência de  $Q$  para  $T_r$ .

Os ruídos de quantização são modelados por um sinal aleatório com distribuição uniforme. O ruído no torque de saída também é admitido aleatório com distribuição uniforme. Para truncamento têm-se:

$$\mu = q/2 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = q^2/12 \quad (8)$$

onde  $q$  é o nível de quantização do sinal em questão.

A função de transferência do nível de quantização do sensor ( $Q_w$ ) para  $T_r$ , conforme pode ser deduzida do diagrama apresentado na Figura 1, é:

$$\frac{T_r(z)}{Q_w(z)} = \frac{P_w \cdot z \cdot (z-1)}{z^2 + (a-1)z + a} \quad (9)$$

Desenvolvendo as relações (5) e (6) com  $D(z)$  dada por (9), a média será nula e a variação dada por:

$$\sigma_T^2 = \frac{\sigma_w^2 \cdot (2J/T)^2 \cdot a^2}{(1-a)} \quad (10)$$

Aplicando (7) e (8) em (10) e admitindo o ruído provocado na saída com uma ordem de grandeza inferior aos ruídos dos mancais ( $Q_t = 1E-4N.m$ ), têm-se um critério para escolha do nível de quantização do sensor de velocidade:

$$Q_w < \frac{\sqrt{1-a} \cdot T \cdot 10^{-4}}{2 \cdot a \cdot J} \quad (11)$$

O efeito dos ruídos de quantização da unidade de processamento de controle são desprezados em relação aos demais porque: 1) a unidade de processamento possui palavras longas em relação à palavra do sensor; 2) aquelas utilizam ponto flutuante.

A função de transferência do nível de quantização da corrente ( $Q_i$ ) para  $T_r$ , conforme pode ser deduzida do diagrama apresentado na Figura 1, é:

$$\frac{T_r(z)}{Q_i(z)} = \frac{K_m \cdot z \cdot (z-1)}{z^2 + (a-1)z + a} \quad (12)$$

onde  $K_m$  é a constante de torque do motor.

Desenvolvendo as relações (5) e (6) com  $D(z)$  dada por (12), a média será nula e a variação será dada por:

$$\sigma_T^2 = \frac{\sigma_i^2 \cdot K_m^2}{(1-a)} \quad (13)$$

Aplicando (7) e (8) em (13) e admitindo a mesma ordem de grandeza anterior para este ruído, têm-se um critério para escolha do nível de quantização da corrente:

$$Q_i < \frac{\sqrt{1-a} \cdot 10^{-4}}{K_m} \quad (14)$$

### 5. ESCOLHA DOS PARÂMETROS

O controlador foi testado para um protótipo desenvolvido por Souza (1986) com parâmetros apresentados na Tabela 2. O tempo de discretização do um sistema de controle de atitude do satélite ( $T_{sat}$ ) é um (01) segundo, conforme sugerido por Ribeiro (1985) e Oterloo (1973).

Admitindo que cada roda tenha uma frequência amortecida de pelo menos 1 Hz ou  $W_d = 6,28 \text{ rad/s}$  e aplicando o critério dado por (1) obtêm-se:

$$T < 100 \text{ ms}$$

Considerando  $t_a$  e  $t_o$  da ordem de 1 ms e estimando  $t_p$  em 10 ms, o critério (2) fornece:

$$T > 12 \text{ ms}$$

O tempo de medida do sensor ( $t_m$ ) utilizado é de 55,55 ms. Portanto, por (3):

$$T \geq 55,55 \text{ ms}$$

O T escolhido é de 55,55 ms correspondente a uma frequência de 18 Hz.

Aplicando os critérios apresentados na Tabela 1, têm-se o seguinte intervalo para escolha de  $P_w$ :

$$0,079 < P_w < 0,131$$

O ganho selecionado é  $P_w = 0,128$  o que favorece a diminuição do tempo de estabilização.

Utilizando os critérios dados por (11) e (14) têm-se:

$$Q_w < 0,02 \text{ rpm}$$

$$Q_i < 1,86 \text{ mA}$$

Os parâmetros utilizados para o controlador proporcional são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 Parâmetros utilizados no controlador proporcional.

PARÂMETRO	VALOR
Momento de Inércia	$J = 9,87E-3 \text{ kg.m}^2$
Constante do Motor	$K_m = 5,01E-2 \text{ N.m/A}$
Tempo de Discretização	$T = 1/18 \text{ Hz}$
Ganho Proporcional	$P_w = 0,128$
Quantização da Velocidade	$Q_w < 0,003 \text{ rpm}$
Quantização de corrente	$Q_i = 1,67 \text{ mA}$

## 6. EXPERIMENTO E RESULTADOS

Para testar o controlador projetado foram efetuados dois testes típicos: 1) rejeição de ruídos em regime permanente e 2) resposta ao degrau de torque comandado, tanto através de simulação em computador digital ("software") como através de implementação física do sistema ("hardware").

6.a - Teste 1 - Rejeição de Ruídos em Regime Permanente: O objetivo deste teste é verificar o nível de ruído em  $T_r$  considerando os distúrbios de torque e os ruídos de quantização.

O sistema foi simulado digitalmente e implementado fisicamente em regime permanente para uma velocidade de 200 rpm (20,94395 rad/s), com uma referência de torque nula ( $T_c = 0 \text{ N.m}$ ). Na Figura 2 são apresentados os resultados gráficos da simulação, na Figura 3 são apresentados os resultados de laboratório e, na Tabela 3, são apresentados os equivalentes resultados numéricos.

Em regime permanente o torque de saída simulado da roda em média é  $1,42190E-6 \text{ N.m}$  com desvio padrão de  $4,08121E-5 \text{ N.m}$ . A velocidade da roda real simulada está estabilizada abaixo da velocidade da roda ideal simulada (modelo de referência) com média  $2,08537E+1 \text{ N.m}$  e desvio padrão

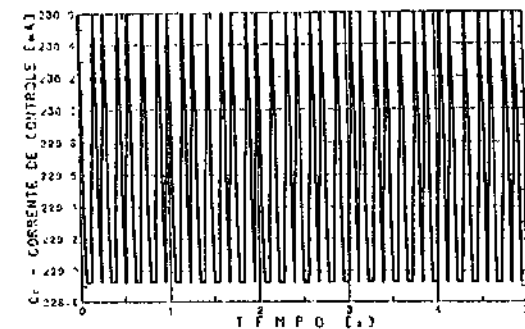
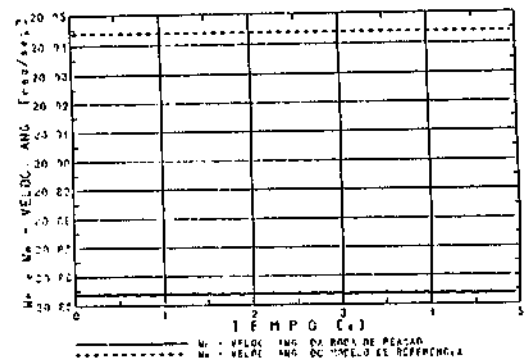
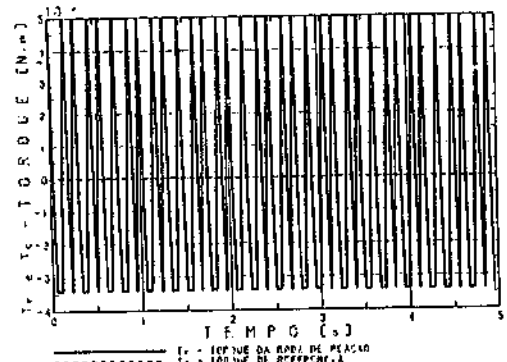


Fig. 2: Resposta do teste de rejeição de distúrbios simulado.

$1,41856E-4 \text{ N.m}$ . Os desvios padrão em  $T_r$  e  $W_r$  simulados são devidos aos efeitos dos ruídos de quantização e podem ser verificados nos gráficos. O controle da roda oscila em um  $Q_i$  de forma assimétrica com média  $2,29576E-1 \text{ A}$ , para manter este ponto de equilíbrio com  $T_r = 0 \text{ N.m}$ .

O torque de saída implementado da roda é estimado pela derivada da velocidade após a aplicação de uma interpolação por mínimos quadrados. Ele é  $2,96935E-5 \text{ N.m}$  com desvio padrão  $2,82673E-3 \text{ N.m}$ . A velocidade da roda real implementada está estabilizada com média  $20,8677 \text{ rad/s}$  e desvio  $2,82673E-3 \text{ rad/s}$ . Os desvios padrão experimentais são superiores aos simulados e são causados principalmente pelos ruídos de quantização e pelos distúrbios de torque nos mancais com frequências superiores à frequência Nyquist do controlador digital. A corrente (controle) tem valor médio de  $302 \text{ mA}$  e é superior à simulada, o que

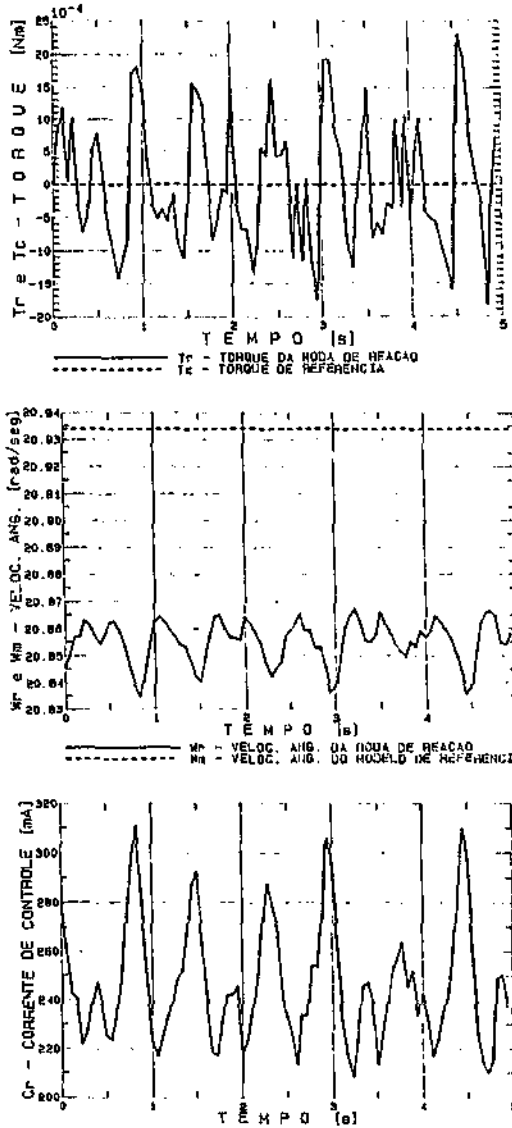


Fig. 3: Resposta do teste de rejeição de distúrbios implementado.

TABELA 3 - Resultados numéricos do teste de rejeição de ruídos.

TESTE: REJEIÇÃO DE RUÍDOS			
UNIDADES (SI)		Intervalo: 0 a 5 s	
		simulado	implementado
Torque da roda	- N	1,42190E-6	2,96935E-5
	- O	4,08121E-5	2,82673E-3
Velocidade angular da roda	- N	2,08537E+1	2,08677E+1
	- O	1,41856E-4	1,63263E-2
Corrente de controle	- N	2,29576E-1	3,02000E-1
	- O	8,16610E-6	5,26785E-2

indica um erro na medida da constante de torque do motor.

6.b - Teste 2 - Resposta ao Degrau de Torque Comandado: O objetivo deste é verificar a resposta do sistema para um degrau de torque comandado  $T_c$  e se a resposta do sistema atende às especificações utilizadas para o projeto do sistema de controle.

O sistema foi simulado digitalmente e implementado fisicamente em regime permanente para uma velocidade de 200 rpm (20,94395 rad/s) e aplicado um  $T_c = 5E-3$  N.m a partir do instante  $T=2$  s. Na Figura 4 são apresentados os resultados da simulação, na Figura 5 são apresentados os resultados de laboratório e, na Tabela 4, são apresentados os equivalentes resultados numéricos para o intervalo 2 a 5s. Os resultados numéricos no intervalo 0 a 2s são semelhantes aos do teste anterior.

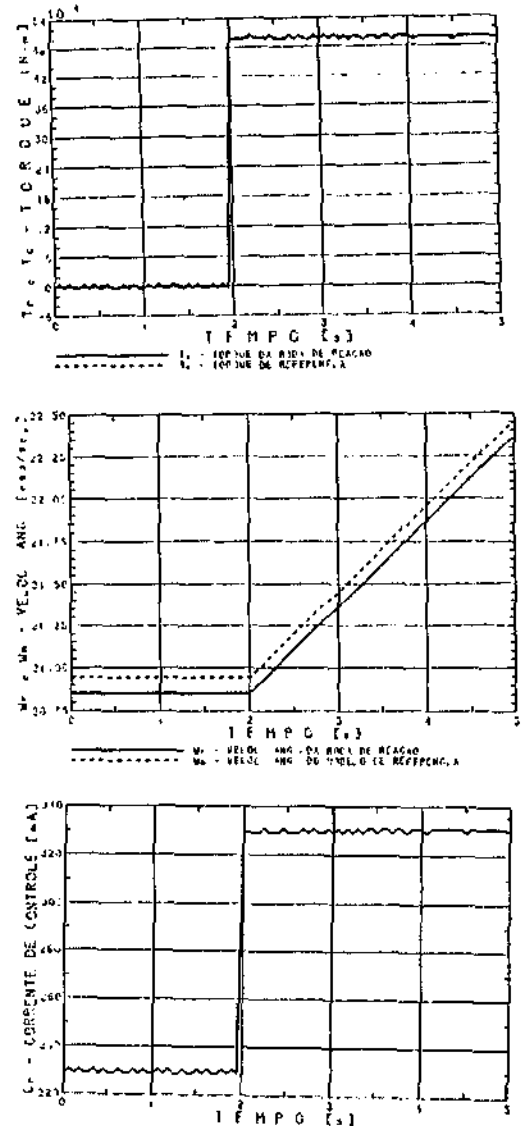


Fig. 4: Resposta simulada ao degrau  $T_c = 5E-3$  N.m.

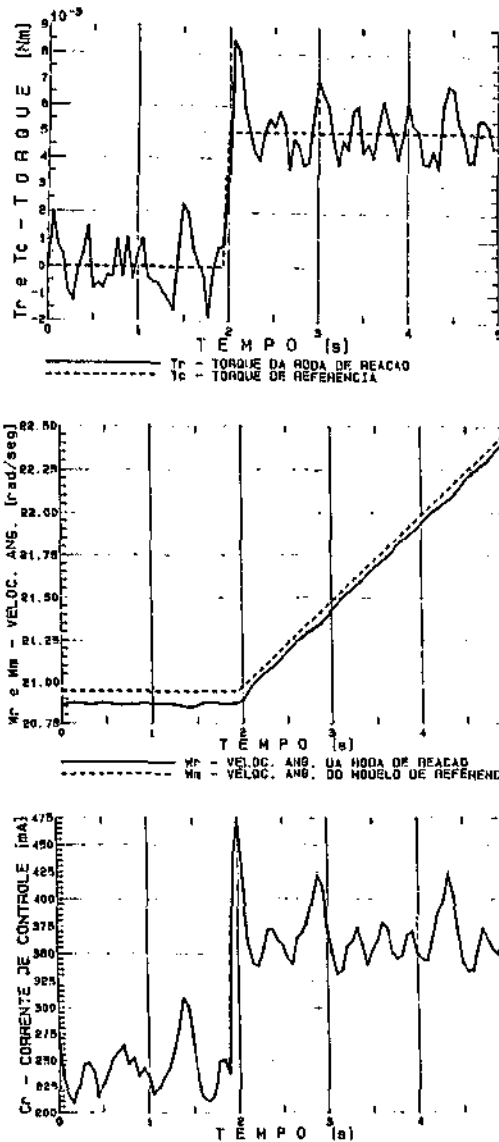


Fig. 5: Resposta implementada ao degrau  $T_c = 5E-3N.m.$

TABELA 4 - Resultados numéricos do teste de resposta ao degrau de torque  $T_c$

TESTE: RESPOSTA AO DEGRAU DE TORQUE $T_c = 5E-3 N.m$			
UNIDADES (SI)		Intervalo: 2 a 5 s	
		simulado	implementado
Torque da roda	- $\mu$	4,9977E-3	5,00634E-3
	- $\sigma$	3,62904E-5	1,36353E-3
Corrente de controle	- $\mu$	3,30746E-1	4,32148E-1
	- $\sigma$	1,08006E-3	2,54146E-2
Subida (tr)		0,055 s	0,055 s
Estabiliz. (ta)		0,055 s	0,167 s

O erro no torque médio simulado é  $2.23E-6$  N.m enquanto o erro de torque médio implementado é  $6.34E-6$  N.m. Seus desvios padrão são respectivamente  $3.62904E-5$  N.m e  $1.36353E-3$  N.m. Os tempos de subida são iguais enquanto o de estabilização é maior no sistema implementado.

### 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O controlador simulado e implementado apresentou resultados satisfatórios frente aos objetivos iniciais. Ele reduziu efeitos dos distúrbios de torque de baixa frequência na roda, eliminando o seu efeito médio e reduzindo o seu desvio padrão.

O controlador proporcional em velocidade utilizado na estrutura de controle por modelo de referência, embora simples, foi suficiente para fazer a roda real acompanhar o modelo de referência e manter o torque de saída da roda aproximadamente igual ao torque comandado. Ele apresenta a vantagem de ser rápido e a desvantagem de produzir uma ação de controle (corrente) em variações bruscas, devido aos ruídos do sistema.

A estrutura de controle por modelo de referência mostrou-se eficiente no presente caso pois o modelo utilizado é simples, exige pouco tempo de processamento e é baseado num parâmetro praticamente imutável durante toda a vida de um satélite: o momento de inércia do volante mais rotor do motor. Além disso não apresenta problema de divergência em integração porque o torque comandado pelo sistema de controle de atitude do satélite é constante por partes e os dois controladores estão sincronizados.

São satisfatórios os critérios definidos para a escolha dos níveis de quantização utilizando: i) o modelo de distribuição uniforme para os ruídos de quantização, ii) o Teorema de Parseval para propagação de ruídos em sistemas discretos e, iii) a hipótese de que o ruído de torques provocado na saída devido às quantizações no sistema tem também uma distribuição uniforme. Isto pode ser constatado nos testes simulados, porém é mascarado por distúrbios (provavelmente dos mancais) que o controlador não consegue rejeitar nos testes implementados.

O critério de resposta no tempo para a escolha do parâmetro do controlador proporcional é satisfatório após definidos os níveis de quantização do sistema. Entretanto, é necessário definir o período de discretização do sistema de controle de atitude do satélite antecipadamente.

Foi possível também concluir que as maiores desvantagens do sistema de controle da roda simulado e implementado são: i) uma eletrônica mais complicada para o sensor; ii) a exigência de processamento com palavras grandes; iii) dificuldades para conciliar os parâmetros tempo de discretização da roda e nível de quantização da medida de velocidade; e iv) não possibilita a rejeição de distúrbios e ruídos com frequências superiores a aproximadamente 1/10 da frequência de amostragem do sistema de controle da roda.

### 8. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seus agradecimentos ao analista de sistemas João



Benedito Diehl pela programação do algoritmo em linguagem de máquina.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D., (1980). Digital Control of Dynamic Systems. Reading, MA, USA, Addison-Wesley Publishing Company.

KATZ, P., (1981). Digital Control Using Microprocessors, Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice-Hall Inc.

OTERLOO, P. Van., (1973). "Attitude Control for the Netherlands Satellite (ANS)". Phillips Tech. Rev. 33(6):162-176, 1973.

RIBEIRO, J. F., (1985). "O Uso de Controle Auto-Sintonizado num Sistema de Controle de Atitude Ativo em três eixos de um Satélite Artificial de Sensoriamento Remoto", INPE - Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, (INPE-3840-TDL/2130).

SOUZA, P. N. S., (1986). "Análise, Projeto, Construção e Testes de um Modelo de Roda de Reação para Aplicações Espaciais", INPE - Dissertação de Mestrado, S. J. dos Campos, SP (INPE-4358-TDL/299).

TRIVELATO, G. C.; SOUZA, M. L. O., (1987). "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 895-898, Florianópolis, SC.

TRIVELATO, G. C., (1988). "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência". INPE - Dissertação de Mestrado (Prelo), São José dos Campos, SP.

MFN= 005850

01 SID/SCD

02 4753

03 INPE-4753-PRE/1425

04 ETES

05 MC

06 am

10 Trivelato, Gilberto da Cunha

10 Souza, Marcelo Lopes de Oliveira e

12 PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REACAO USANDO  
MODELOS DE REFERENCIA

13 Design of a digital model following controller of reaction wheel  
torques

14 595-601

53 SBA Congresso Brasileiro de Automatica, 7

54 15-19 ago. <1988>

56 São José dos Campos

57 BR

58 DMC

59 DINAMICA ORBITAL E CONTROLE

61 <CN>

64 <1988>

68 PRE

83 The design of a digital model following controller of reaction wheel  
torques (used in attitude control of artificial satellites) is  
presented. This controller is intended to reduce the effects of wheel  
disturbing torques, and wheel sensor noises on the wheel torque. The  
controller structure used, the criteria for choosing the wheel  
sampling time, the controller gain, the sensor quantization level,  
and the current quantization level is summarized while considering  
the wheel torque requirements. Finally, the digitally simulated  
system response to zero and step reference torques, and the  
corresponding hardware implemented responses are discussed. These  
tests show that such a controller reduces considerably those effects  
and satisfies those requirements, and the design criteria used are  
satisfactory.

88 ARTIFICIAL SATELLITES

88 ATTITUDE CONTROL

88 CONTROLLERS

88 MODELS

88 REACTION WHEEL

88 TORQUE

88 WHEELS

88 DESIGN ANALYSIS

88 SAMPLING

6.3. Estudo orientado de Astronomia e Astrofísica, seguindo o livro “Fundamentos de Astronomia e Astrofísica” (Kepler de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva, 7.10).

6.4. Trabalho submetido para a XXVII Reunião da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB), elaborado a partir da discussão dos resultados obtidos com os ajustes discutidos na seção 4.5.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bevington, P. R., *Data Reduction and error analysis for the physical sciences*, McGraw-Hill, New York, NY, 1969
- Boas, M. L., *Mathematical Methods in the Physical Sciences*, 2ª edição, John Wiley & Sons, Chicago, IL, 1983
- Charboneau, P., *Genetic Algorithms in Astronomy and Astrophysics*. *Astrophysical Journal Suppl. Series*, 101: 309-334, 1995.
- Davidor, Y. *Genetic Algorithms and Robotics : A Heuristic Strategy for Optimization*. World Scientific, Teaneck, NJ, 1991.
- Ellis, T.M.R.. *Fortran 77 Programming : With an Introduction to the Fortran 90 Standard (International Computer Science Series)*
- Goldberg, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- Mandel, J., *The Statistical Analysis of Experimental Data*, Dover Publications, Inc., New York, 1964.
- Milone, A. C.; et. al., *Introdução à Astronomia e Astrofísica*, Inpe- 7177- PUD/38, São José dos Campos, SP, 1999.
- Mitchell, M., *An Introduction to Genetic Algorithms (Complex Adaptive Systems Series)*, MIT Press, Boston, MA, 1998
- Oliveira, K. S.; Saraiva, M. F. O., *Astronomia e Astrofísica*, Ed. da UFRGS, 2000.
- Press, W. H.; et. al., *Numerical Recipes in Fortran (The art of scientific computing)*, 2ª edição, Cambridge University Press, New York, NY, 1992.

MFN= 005850  
01 SID/SCD  
02 4753  
03 INPE-4753  
04 ETES  
05 MC  
06 am  
10 TRIVELATO,G.C.  
10 SOUZA,N.L.O.  
12 PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REACAO USANDO  
    MODELOS DE REFERENCIA  
14 595-601  
53 CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMATICA, 7  
54 15-19 ago. <1988>  
56 São José dos Campos  
57 BR  
58 DMC  
59 201405  
61 <CN>  
64 <1988>  
68 PRE

PROJETO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE RODAS DE REAÇÃO USANDO MODELOS DE REFERÊNCIA

Gilberto da Cunha Trivelato  
Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515  
12201 São José dos Campos - SP

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação (usadas no controle de atitude de satélites artificiais) usando modelos de referência. Este controlador tem como objetivo a redução dos efeitos dos: i) torques perturbadores na roda e, ii) ruídos nos seus sensores, sobre o torque produzido pela roda. Para isso, resume-se: 1) a estrutura de controle utilizada, 2) os critérios para a escolha do tempo de discretização da roda, do ganho do controlador, do nível de quantização da medida do sensor, e do nível de quantização da corrente do controlador para o atuador; tudo isso considerando as especificações exigidas para o torque de saída da roda. Finalmente apresentam-se: 1) as respostas do sistema simuladas digitalmente para um torque de referência nulo e do tipo degrau e, 2) as correspondentes respostas implementadas em "hardware". Estes testes mostram que: 1) o controlador utilizado reduz sensivelmente aqueles efeitos e atende aquelas especificações, 2) os critérios de projeto definidos são satisfatórios.

Palavras Chave: Roda de Reação, Controle por Modelo de Referência, Controle Digital, Tempo de Discretização, Nível de Quantização.

DESIGN OF A DIGITAL MODEL FOLLOWING CONTROLLER OF REACTION WHEEL TORQUES

Abstract

This paper presents the design of a digital model following controller of reaction wheel torques (used in attitude control of artificial satellites). This controller intends to reduce the effects of: i) wheel disturbing torques and, ii) wheel sensor noises, on the wheel torque. To do so it summarizes: 1) the controller structure used; 2) the criteria for choosing the wheel sampling time, the controller gain, the sensor quantization level and the current quantization level; all this considering the wheel torque requirements. Finally, it presents: 1) the digitally simulated system response to zero and step reference torques and, 2) the corresponding hardware implemented responses. These tests show that: 1) such controller reduces considerably those effects and satisfies those requirements, and 2) the design criteria used are satisfactory.

Keywords: Reaction Wheel, Model Following Control, Digital Control, Sampling Time, Quantization Level.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o projeto de um controlador digital de torque de rodas de reação (usadas no controle de atitude de satélites artificiais) usando modelos de referência. Este controlador tem como objetivo a redução dos efeitos dos: i) torques perturbadores na roda e, ii) ruídos nos seus sensores, sobre o torque produzido pela roda. Nele, a referência de torque é aplicada diretamente à roda real (física) e à roda ideal (simulação digital), que têm seus estados comparados. A diferença entre os estados das duas rodas provém daqueles efeitos e é utilizada

para excitar um controlador que força a roda real a seguir a ideal. Além disso, resume-se: 1) a estrutura de controle utilizada; 2) os critérios para a escolha do tempo de discretização da roda ( $T$ ), do ganho do controlador ( $P_w$ ), do nível de quantização da medida do sensor ( $Q_w$ ), e do nível de quantização da corrente do controlador para o atuador ( $Q_i$ ); tudo isso considerando as especificações exigidas para o torque de saída da roda. Finalmente apresentam-se: 1) as respostas do sistema simuladas digitalmente para um torque de referência nulo e do tipo degrau e, 2) as correspondentes respostas implementadas em "hardware".

2. CONTROLE POR MODELO DE REFERÊNCIA

A estrutura de controle utilizada é do tipo modelo de referência, utilizando um controlador proporcional e realimentação de velocidade, tal como foi proposto por Trivelato e Souza (1987) e desenvolvido por Trivelato (1988). O diagrama de blocos deste sistema é apresentado na Figura 1.

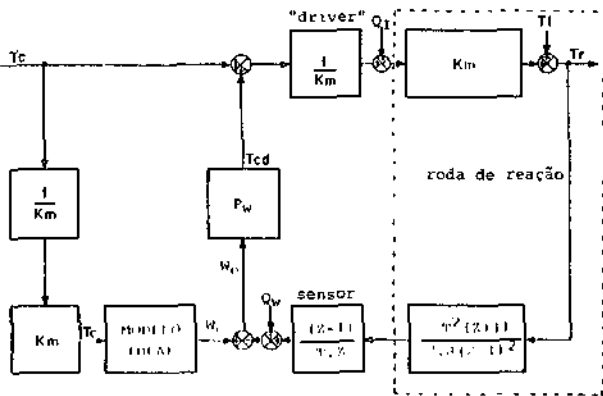


Fig. 1: Sistema de controle por modelo de referência.

A referência de torque ( $T_c$ ) é aplicada diretamente ("feedforward") à roda real (física) e a um modelo de referência ideal (simulado). A diferença ( $\omega_e$ ) entre as velocidades das duas rodas provem: 1) dos distúrbios de torque ( $T_i$ ) na roda, 2) do ruído de quantização na medida do seu sensor de velocidade ( $Q_w$ ) e, 3) do ruído de quantização na corrente ( $Q_i$ ). Esta diferença é utilizada para excitar um controlador que força a roda real a seguir o modelo de referência ideal através do torque de rejeição de distúrbios ( $T_{cd}$ ).

O modelo de referência adotado é uma roda de reação ideal, caracterizada por um volante de inércia sem nenhum atrito seco ou dinâmico, movimentado por um motor ideal sem perdas de qualquer natureza. Seu modelo matemático não apresenta problemas de divergência porque a referência de torque ( $T_c$ ) é constante por partes em períodos múltiplos do tempo de discretização da roda ( $T$ ).

3. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

O controlador utilizado será considerado satisfatório se atender às seguintes especificações:

- 1) Reduzir os efeitos dos torques perturbadores na roda ( $T_i$ ) e dos ruídos nos seus sensores ( $Q_w$ ) sobre o torque produzido pela roda ( $T_r$ ).
- 2) Apresentar um algoritmo simples, para permitir o controle em tempo real de mais de uma roda com um mesmo microcomputador.
- 3) Ter um erro de quantização ( $Q_T$ ) do torque de saída  $T_r$  com média ( $\mu$ ) nula e desvio padrão ( $\sigma$ ) da mesma ordem dos torques perturbadores provocados pelos mancais ( $\mu=3E-4$  Nm).

4) Responder, para um degrau de torque comandado ( $T_c$ ), com um tempo de subida ( $t_r$ ) do tor que  $T_r$  bem menor que o tempo de discretização do sistema de controle de atitude do satélite ( $T_{sat}$ ), ou seja,  $t_r < 0,2 T_{sat}$ .

5) Apresentar, para a mesma entrada anterior, um tempo de acomodação ( $t_s$ ) de  $T_r$  em torno do seu valor de regime permanente bem menor que  $T_{sat}$ , ou seja,  $t_s < 0,3 T_{sat}$ .

4. CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR

Os critérios para seleção do ganho do controlador e do tempo de discretização da roda já foram apresentados por Trivelato e Souza (1987). Já os para seleção dos níveis de quantização do sistema são apresentados por Trivelato (1988). Eles são resumidos a seguir:

4.a - Tempo de Discretização da Roda (T): Pelo teorema da amostragem e utilizando um fator de segurança de 10 vezes como sugerido por Franklin e Powell (1980), têm-se:

$$T < \pi / 5.W_d \quad (1)$$

onde:  $W_d$  é a maior frequência natural amortecida da malha de controle da roda.

O tempo de discretização deve superar o tempo de aquisição do sinal ( $t_a$ ), o tempo de processamento e cálculo do controle ( $t_p$ ) e o tempo de saída do controle ( $t_c$ ) para atuação no sistema. Portanto,

$$T > t_a + t_p + t_c \quad (2)$$

Quando o sensor utilizado é digital, o tempo de discretização deve ser superior ao tempo de medida ( $t_m$ ) deste sensor. Logo:

$$T \geq t_m \quad (3)$$

4.b - Ganho do Controlador ( $P_w$ ): A escolha do parâmetro  $P_w$  do controlador proporcional em velocidade deverá satisfazer as especificações da seção 3. A equação característica das funções de transferência relevantes é dada por:

$$P(z) = z^2 + (a - 1).z + a \quad (4)$$

onde:  $a = (P_w.T) / (2.J)$  e  $J$  é o momento de inércia do volante da roda.

Na Tabela 1 estão apresentadas as origens das condições para uma resposta adequada e os correspondentes critérios para seleção de  $P_w$ .

TABELA 1 Critérios para seleção do ganho  $P_w$ .

	ORIGEM	CRITÉRIO
1	Estabilidade	$P_w < 2.J.T$
2	Tipo de Resposta	$P_w > 0,345.J/T$
3	Tipo de Resposta	$P_w < 11,655.J/T$
4	Tempo de Subida	$P_w > \frac{J}{T} \cdot (-b + \sqrt{b^2 + 4})$
5	Tempo de Acomodação	$P_w \leq \frac{2.J}{T} \cdot \exp\left(\frac{-3.T}{t_s}\right)$
6	Sobre-elevação	$P_w < \frac{2.J}{T} \cdot \exp(-1,15\phi)$

onde:

$$b = 2 \cdot \cos[2,16.T/t_r]$$

$$\phi = 0,6.W_n.T$$

$W_n$  = frequência natural do sistema.

4.c - Níveis de Quantização do Sistema ( $Q_w$  e  $Q_i$ ): A quantização aparece em três partes principais do sistema: 1) no sensor digital de medida da velocidade da roda, 2) na unidade de processamento, e, 3) na corrente de saída do controlador para o atuador. Cada quantização é caracterizada por uma média e uma variação, comporta-se como uma entrada de um novo ruído, e provoca uma correspondente perturbação na saída do sistema. A perturbação total provocada na saída por essas entradas também pode ser caracterizada por uma média e uma variação.

Os critérios para a escolha destes níveis de quantização são definidos a partir das relações entre suas médias e variâncias e a média e a variação da correspondente perturbação provocada na saída. Aplicando-se os Teoremas de Parseval (propagação de sinais aleatórios através de funções de transferência discretas) e de Cauchy (cálculo da integral complexa em um contorno fechado), conforme apresentado por Katz (1981), a média ( $\mu_T$ ) e a variância ( $\sigma_T^2$ ) de um ruído na saída de um sistema causado por um ruído de quantização são dadas por:

$$\mu_T = \mu_Q \cdot \lim_{z \rightarrow 1} z \cdot D(z) \quad (5)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_Q^2 \cdot \sum \text{Res } D(z) \cdot D(z^{-1}) \cdot z^{-1} \quad (6)$$

onde:  $D(z)$  é a função de transferência de  $Q$  para  $T_r$ .

Os ruídos de quantização são modelados por um sinal aleatório com distribuição uniforme. O ruído no torque de saída também é admitido aleatório com distribuição uniforme. Para truncamento têm-se:

$$\mu = q/2 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = q^2/12 \quad (8)$$

onde  $q$  é o nível de quantização do sinal em questão.

A função de transferência do nível de quantização do sensor ( $Q_w$ ) para  $T_r$ , conforme pode ser deduzida do diagrama apresentado na Figura 1, é:

$$\frac{T_r(z)}{Q_w(z)} = \frac{P_w \cdot z \cdot (z - 1)}{z^2 + (a-1)z + a} \quad (9)$$

Desenvolvendo as relações (5) e (6) com  $D(z)$  dada por (9), a média será nula e a variação dada por:

$$\sigma_T^2 = \frac{\sigma_w^2 \cdot (2J/T)^2 \cdot a^2}{(1-a)} \quad (10)$$

Aplicando (7) e (8) em (10) e admitindo o ruído provocado na saída com uma ordem de grandeza inferior aos ruídos dos mancais ( $Q_t = 1E-4N.m$ ), têm-se um critério para escolha do nível de quantização do sensor de velocidade:

$$Q_w < \frac{\sqrt{1-a} \cdot T \cdot 10^{-4}}{2 \cdot a \cdot J} \quad (11)$$

O efeito dos ruídos de quantização da unidade de processamento de controle são desprezados em relação aos demais porque: 1) a unidade de processamento possui palavras longas em relação à palavra do sensor; 2) aquelas utilizam ponto flutuante.

A função de transferência do nível de quantização da corrente ( $Q_i$ ) para  $T_r$ , conforme pode ser deduzida do diagrama apresentado na Figura 1, é:

$$\frac{T_r(z)}{Q_i(z)} = \frac{K_m \cdot z \cdot (z-1)}{z^2 + (a-1)z + a} \quad (12)$$

onde  $K_m$  é a constante de torque do motor.

Desenvolvendo as relações (5) e (6) com  $D(z)$  dada por (12), a média será nula e a variação será dada por:

$$\sigma_T^2 = \frac{\sigma_i^2 \cdot K_m^2}{(1-a)} \quad (13)$$

Aplicando (7) e (8) em (13) e admitindo a mesma ordem de grandeza anterior para este ruído, têm-se um critério para escolha do nível de quantização da corrente:

$$Q_i < \frac{\sqrt{1-a} \cdot 10^{-4}}{K_m} \quad (14)$$

## 5. ESCOLHA DOS PARÂMETROS

O controlador foi testado para um protótipo desenvolvido por Souza (1986) com parâmetros apresentados na Tabela 2. O tempo de discretização do um sistema de controle de atitude do satélite ( $T_{sat}$ ) é um(01) segundo, conforme sugerido por Ribeiro (1985) e Oterloo (1973).

Admitindo que cada roda tenha uma frequência amortecida de pelo menos 1 Hz ou  $W_d = 6,28 \text{ rad/s}$  e aplicando o critério dado por (1) obtêm-se:

$$T < 100 \text{ ms}$$

Considerando  $t_a$  e  $t_o$  da ordem de 1 ms e estimando  $t_p$  em 10 ms, o critério (2) fornece:

$$T > 12 \text{ ms}$$

O tempo de medida do sensor ( $t_m$ ) utilizado é de 55,55 ms. Portanto, por (3):

$$T \geq 55,55 \text{ ms}$$

O T escolhido é de 55,55 ms correspondente a uma frequência de 18 Hz.

Aplicando os critérios apresentados na Tabela 1, têm-se o seguinte intervalo para escolha de  $P_w$ :

$$0,079 < P_w < 0,131$$

O ganho selecionado é  $P_w = 0,128$  o que favorece a diminuição do tempo de estabilização.

Utilizando os critérios dados por (11) e (14) têm-se:

$$Q_w < 0,02 \text{ rpm}$$

$$Q_i < 1,86 \text{ mA}$$

Os parâmetros utilizados para o controlador proporcional são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 Parâmetros utilizados no controlador proporcional.

PARÂMETRO	VALOR
Momento de Inércia	$J = 9,87E-3 \text{ kg.m}^2$
Constante do Motor	$K_m = 5,01E-2 \text{ N.m/A}$
Tempo de Discretização	$T = 1/18 \text{ Hz}$
Ganho Proporcional	$P_w = 0,128$
Quantização da Velocidade	$Q_w < 0,003 \text{ rpm}$
Quantização de corrente	$Q_i = 1,67 \text{ mA}$

## 6. EXPERIMENTO E RESULTADOS

Para testar o controlador projetado foram efetuados dois testes típicos: 1) rejeição de ruídos em regime permanente e 2) resposta ao degrau de torque comandado, tanto através de simulação em computador digital ("software") como através de implementação física do sistema ("hardware").

6.a - Teste 1 - Rejeição de Ruídos em Regime Permanente: O objetivo deste teste é verificar o nível de ruído em  $T_r$  considerando os distúrbios de torque e os ruídos de quantização.

O sistema foi simulado digitalmente e implementado fisicamente em regime permanente para uma velocidade de 200 rpm (20,94395 rad/s), com uma referência de torque nula ( $T_c = 0 \text{ N.m}$ ). Na Figura 2 são apresentados os resultados gráficos da simulação, na Figura 3 são apresentados os resultados de laboratório e, na Tabela 3, são apresentados os equivalentes resultados numéricos.

Em regime permanente o torque de saída simulado da roda em média é  $1,42190E-6 \text{ N.m}$  com desvio padrão de  $4,08121E-5 \text{ N.m}$ . A velocidade da roda real simulada está estabilizada abaixo da velocidade da roda ideal simulada (modelo de referência) com média  $2,08537E+1 \text{ N.m}$  e desvio padrão

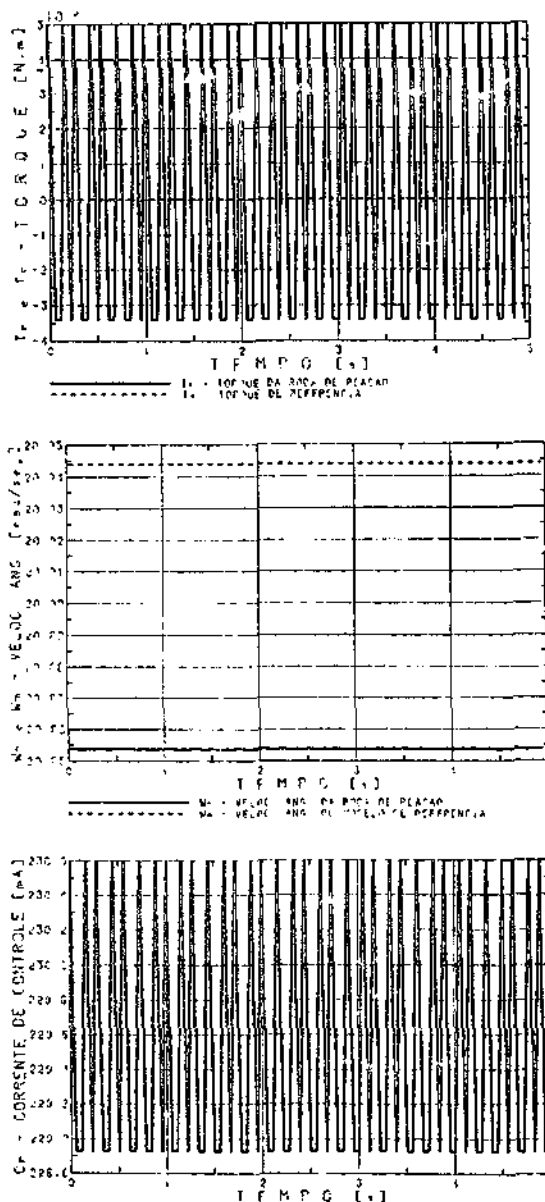


Fig. 2: Resposta do teste de rejeição de distúrbios simulado.

$1,41856E-4 \text{ N.m}$ . Os desvios padrão em  $T_r$  e  $W_r$  simulados são devidos aos efeitos dos ruídos de quantização e podem ser verificados nos gráficos. O controle da roda oscila de um  $Q_i$  de forma assimétrica com média  $2,29576E-1 \text{ A}$ , para manter este ponto de equilíbrio com  $T_r = 0 \text{ N.m}$ .

O torque de saída implementado da roda é estimado pela derivada da velocidade após a aplicação de uma interpolação por mínimos quadrados. Ele é  $2,96935E-5 \text{ N.m}$  com desvio padrão  $2,82673E-3 \text{ N.m}$ . A velocidade da roda real implementada está estabilizada com média  $20,8677 \text{ rad/s}$  e desvio  $2,82673E-3 \text{ rad/s}$ . Os desvios padrão experimentais são superiores aos simulados e são causados principalmente pelos ruídos de quantização e pelos distúrbios de torque nos mancais com frequências superiores à frequência Nyquist do controlador digital. A corrente (controle) tem valor médio de  $302 \text{ mA}$  e é superior à simulada, o que



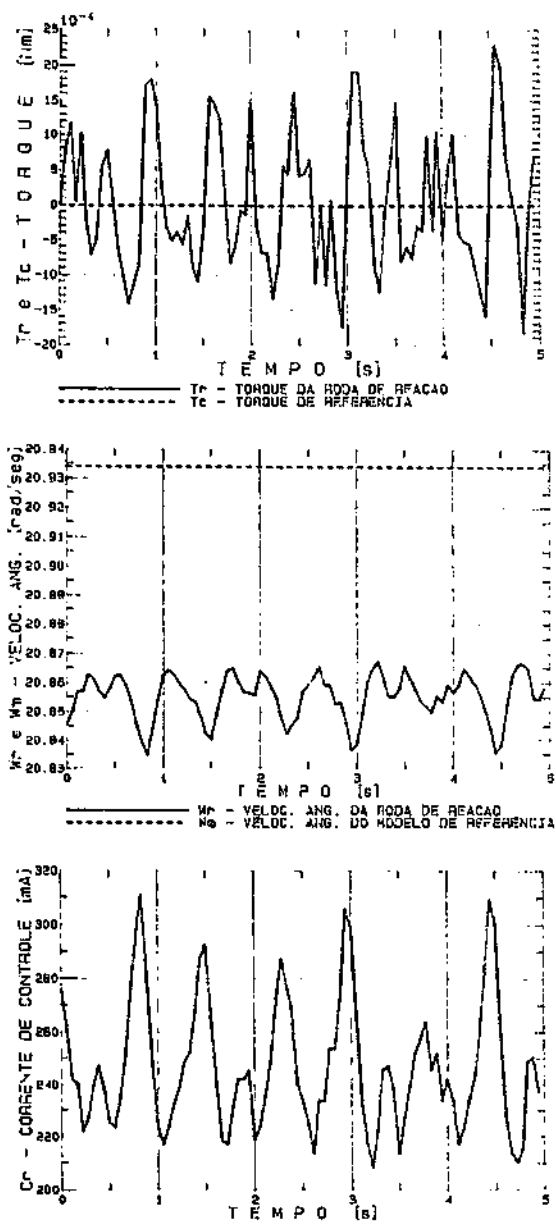


Fig. 3: Resposta do teste de rejeição de distúrbios implementado.

TABELA 3 - Resultados numéricos do teste de rejeição de ruídos.

TESTE: REJEIÇÃO DE RUÍDOS			
UNIDADES (SI)		intervalo: 0 a 5 s	
		simulado	implementado
Torque da roda	- U	1,42190E-6	2,96935E-5
	- O	4,08121E-5	2,82673E-3
Velocidade angular da roda	- U	2,08537E+1	2,08677E+1
	- O	1,41856E-4	1,63263E-2
Corrente de controle	- U	2,29576E-1	3,02000E-1
	- O	8,14610E-4	5,26785E-2

indica um erro na medida da constante de torque do motor.

6.b - Teste 2 - Resposta ao Degrau de Torque Comandado: O objetivo deste é verificar a resposta do sistema para um degrau de torque comandado  $T_c$  e se a resposta do sistema atende às especificações utilizadas para o projeto do sistema de controle.

O sistema foi simulado digitalmente e implementado fisicamente em regime permanente para uma velocidade de 200 rpm (20,94395 rad/s) e aplicado um  $T_c = 5E-3$  N.m a partir do instante  $T = 2s$ . Na Figura 4 são apresentados os resultados gráficos da simulação, na Figura 5 são apresentados os resultados de laboratório e, na Tabela 4, são apresentados os equivalentes resultados numéricos para o intervalo 2 a 5s. Os resultados numéricos no intervalo 0 a 2s são semelhantes aos do teste anterior.

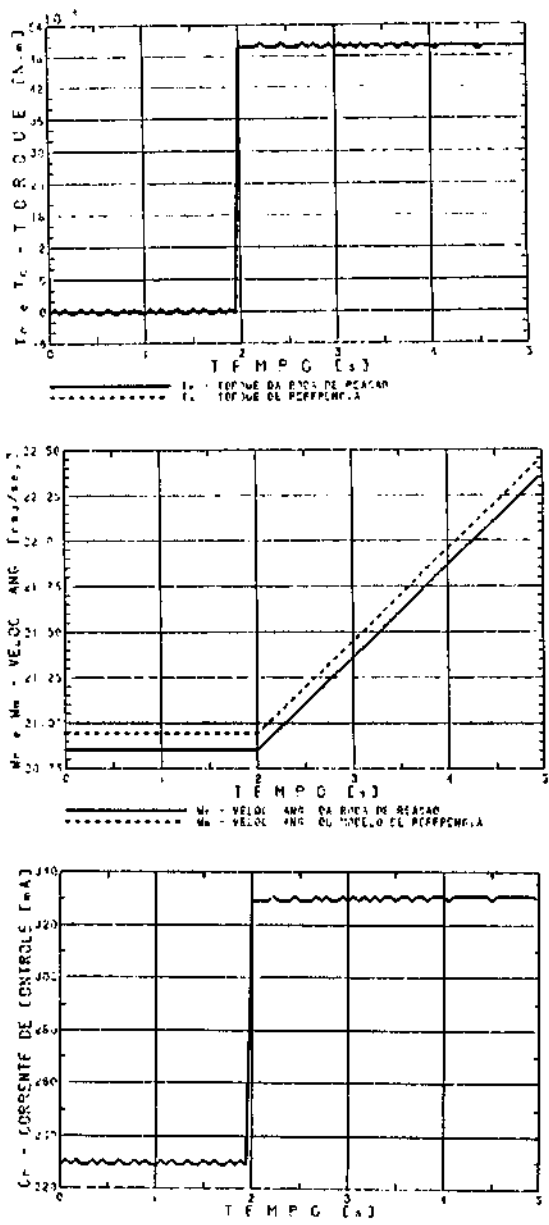


Fig. 4: Resposta simulada ao degrau  $T_c = 5E-3$  N.m.

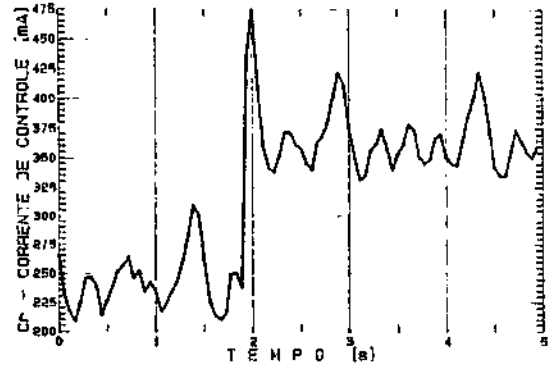
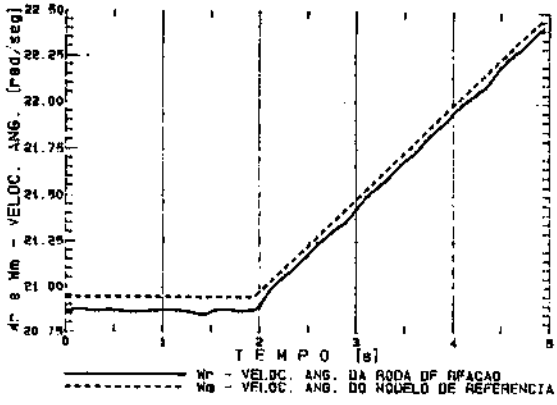
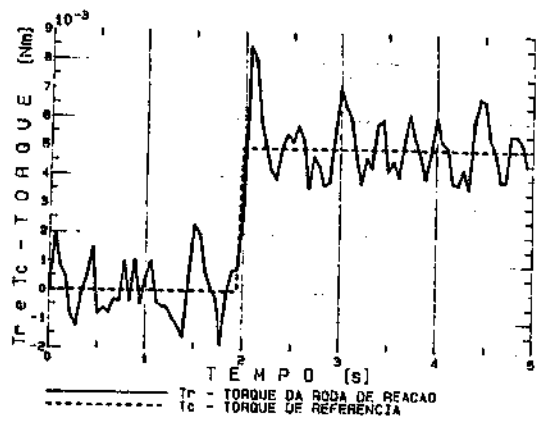


Fig. 5: Resposta implementada ao degrau  $T_c = 5E-3N.m$ .

TABELA 4 - Resultados numéricos do teste de resposta ao degrau de torque co

TESTE: RESPOSTA AO DEGRAU DE TORQUE $T_c = 5E-3 N.m$			
UNIDADES (SI)		intervalo: 2 a 5 s	
		simulado	implementado
Torque da roda	- u - o	4,99777E-3 3,62904E-5	5,00634E-3 1,36353E-3
Corrente de controle	- u - o	3,30746E-1 1,08006 -3	4,32148E-1 2,54146E-2
Subida (tr)		0,055 s	0,055 s
Estabiliz. (ts)		0,055 s	0,167 s

O erro no torque médio simulado é  $2.23E-6$  N.m enquanto o erro de torque médio implementado é de  $6.34E-6$  N.m. Seus desvios padrões são respectivamente  $3.62904E-5$  N.m e  $1,36353E-3$  N.m. Os tempos de subida são iguais enquanto o de estabilização é maior no sistema implementado.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O controlador simulado e implementado apresentou resultados satisfatórios frente aos objetivos iniciais. Ele reduz os efeitos dos distúrbios de torque de baixa frequência na roda, eliminando o seu efeito médio e reduzindo o seu desvio padrão.

O controlador proporcional em velocidade utilizado na estrutura de controle por modelo de referência, embora simples, foi suficiente para fazer a roda real acompanhar o modelo de referência e manter o torque de saída da roda aproximadamente igual ao torque comandado. Ele apresenta a vantagem de ser rápido e a desvantagem de produzir uma ação de controle (corrente) em variações bruscas, devido aos ruídos do sistema.

A estrutura de controle por modelo de referência mostrou-se eficiente no presente caso pois o modelo utilizado é simples, exige pouco tempo de processamento e é baseado num parâmetro praticamente imutável durante toda a vida de um satélite: o momento de inércia do volante mais rotor do motor. Além disso não apresenta problema de divergência em integração porque o torque comandado pelo sistema de controle de atitude do satélite é constante por partes e os dois controladores estão sincronizados.

São satisfatórios os critérios definidos para a escolha dos níveis de quantização utilizando: i) o modelo de distribuição uniforme para os ruídos de quantização, ii) o Teorema de Parseval para propagação de ruídos em sistemas discretos e, iii) a hipótese de que o ruído de torques provocado na saída devido às quantizações no sistema tem também uma distribuição uniforme. Isto pode ser constatado nos testes simulados, porém é mascarado por distúrbios (provavelmente dos mancais) que o controlador não consegue rejeitar nos testes implementados.

O critério de resposta no tempo para a escolha do parâmetro do controlador proporcional é satisfatório após definidos os níveis de quantização do sistema. Entretanto, é necessário definir o período de discretização do sistema de controle de atitude do satélite antecipadamente.

Foi possível também concluir que as maiores desvantagens do sistema de controle da roda simulado e implementado são: i) uma eletrônica mais complicada para o sensor; ii) a exigência de processamento com palavras grandes; iii) dificuldades para conciliar os parâmetros tempo de discretização da roda e nível de quantização da medida de velocidade; iv) não possibilita a rejeição de distúrbios e ruídos com frequências superiores a aproximadamente 1/10 da frequência de amostragem do sistema de controle da roda.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seus agradecimentos ao analista de sistemas João

## 7º CBA - ITA - São José dos Campos-SP

Benedito Diehl pela programação do algoritmo em linguagem de máquina.

### 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D., (1980). Digital Control of Dynamic Systems, Reading, MA, USA, Addison-Wesley Publishing Company.

KATZ, P., (1981). Digital Control Using Microprocessors, Englewood Cliffs, NJ, USA, Prentice-Hall Inc.

OTERLOO, P. Van., (1973). "Attitude Control for the Netherlands Satellite (ANS)". Phillips Tech. Rev. 33(6):162-176, 1973.

RIBEIRO, J. F., (1985). "O Uso de Controle Auto-Sintonizado num Sistema de Controle de Atitude Ativo em três eixos de um Satélite Artificial de Sensoriamento Remoto", INPE - Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, (INPE-3840-TDL/2130).

SOUZA, P. N. S., (1986). "Análise, Projeto, Construção e Testes de um Modelo de Roda de Reação para Aplicações Espaciais", INPE - Dissertação de Mestrado, S. J. dos Campos, SP (INPE-4358-TDL/299).

TRIVELATO, G. C.; SOUZA, M. L. O., (1987). "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência". Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 895-898, Florianópolis, SC.

TRIVELATO, G. C., (1988). "Controle de Rodas de Reação Através de Técnicas Digitais Usando Modelos de Referência". INPE - Dissertação de Mestrado (Prelo), São José dos Campos, SP.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIGITAL DE TORQUE DE UMA  
RODA DE REAÇÃO COM UM COMPUTADOR INCREMENTAL

João Benedito Diehl  
Gilberto da Cunha Trivelato  
Juan Suñe Perez

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515  
12201 São José dos Campos - SP

Resumo

Este trabalho mostra uma aplicação, em tempo real, de um computador (digital) incremental na realização de um controlador digital de torque de uma roda de reação. Seus objetivos são: i) avaliar o emprego de técnicas de computação incremental; ii) aplicar esta técnica a um controlador em tempo real; iii) verificar o desempenho do controlador digital implementado. Inicialmente são descritas: a arquitetura do computador, a estrutura de controle implementada e os parâmetros utilizados no sistema considerado. A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos com os testes realizados em laboratório com o sistema de controle resultante. Estes resultados indicam que o computador e o algoritmo adotados atendem às especificações do projeto do sistema de controle que foi construído e testado.

Palavras Chaves: Sistemas Digitais, Controle Digital, Computação Incremental, Roda de Reação, Atuadores, Modelagem de Sistema, Simulação.

IMPLEMENTATION OF A REACTION WHEEL DIGITAL TORQUE CONTROLLER  
WITH AN INCREMENTAL COMPUTER

Abstract

This paper presents a real-time application of a digital incremental computer in the realization of a digital torque controller of a reaction wheel. The objectives are: i) to evaluate the application of incremental computation techniques; ii) to apply this technique in real time controller; iii) to verify the performance of the implemented digital controller. Initially, description is given of: the computer architecture, the implemented structure of control and the parameters which were utilized in the system. Afterwards, experimental results obtained with tests made in laboratory with the resulting control system are presented. These results indicate that the computer and the adopted algorithm comply with the specifications of the control system project which was built and tested.

Keywords: Digital Systems, Digital Control, Incremental Computing, Reaction Wheel, Actuators, Systems Modelling, Simulation.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho mostra uma aplicação, em tempo real, de um computador (digital) incremental para controle de torque de uma roda de reação (usada no controle de atitude de satélites artificiais). Seus objetivos são: i) avaliar o emprego de técnicas de computação incremental; ii) aplicar esta técnica a um controlador em tempo real; iii) verificar o desempenho do controlador digital assim implementado.

O computador utilizado tem como principais características: 1) arquitetura multiprocessadora, concebida especialmente para solução numérica de equações; 2) unidades de processamento conectadas por um barramento

único; 3) comunicação de dados entre processadores feita por difusão ("broadcast"); 4) modo de processamento "Multiple Instruction Multiple Data" (MIMD); 5) processadores imediatamente acoplados.

A roda de reação utilizada é o protótipo desenvolvido e descrito por Souza (1986) e a estrutura de controle empregada é a proposta por Trivelato e Souza (1987, 1988) e desenvolvida por Trivelato (1988).

Inicialmente é apresentada a arquitetura do protótipo do computador incremental ASTRO L-V2, desenvolvido no Departamento de Engenharia e Computação do INPE (Diehl e Perez, 1988). A seguir são descritos: a estrutura de controle empregada; o tipo de con