

## PROJETO DE UM MODELO EXPERIMENTAL DE UMA RODA DE REAÇÃO PARA CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS



PETRONIO NORONHA DE SOUZA  
AGENOR DE TOLEDO FLEURY  
JOSÉ A.M. FELIPPE DE SOUZA  
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS — INPE



### SUMÁRIO

Este trabalho descreve o projeto mecânico e o projeto de um sistema de controle de velocidade de uma roda de reação com capacidade de 2Nms. Uma roda de reação é um dispositivo atuador de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais que opera segundo o princípio da troca de quantidade de movimento angular entre a roda e o satélite. A roda de reação, atualmente em fase de construção no Instituto de Pesquisas Espaciais, será utilizada em ensaios de sistemas de controle de atitude sobre mesas de mancal a ar.

### INTRODUÇÃO

Uma das opções mais utilizadas no controle da atitude de satélites artificiais é a roda de reação. Neste caso, o sistema de controle de atitude comanda os motores das rodas acelerando-as ou freando-as. O torque nelas aplicado atua no satélite em sentido contrário, o que torna possível a absorção de impulsos angulares perturbadores externos que são armazenados na roda na forma de um incremento na sua quantidade de movimento angular (QMA).

As rodas de reação são projetadas para a operação com velocidade média igual a zero. Isto significa que elas são ora aceleradas em um sentido, ora em outro, acompanhando o sentido dos torques cíclicos (p.ex.: de vido à pressão de radiação solar) que atuam no satélite. A existência de torques não-cíclicos (p.ex.: devido ao arrasto aerodinâmico) tende a saturar a roda. Quando isto ocorre é necessário dessaturá-la, o que pode ser feito através de dispositivos como jatos de gás e bobinas magnéticas.

As rodas de reação operam nos modos de manobra e apontamento. No modo de manobra o satélite sofre grandes deslocamentos angulares. No modo de apontamento as rodas exercem controle da atitude de forma contínua e com alto grau de precisão.

Este trabalho apresenta o projeto de um protótipo de roda de reação a ser utilizado na execução de testes de sistemas de controle de atitude sobre uma mesa de mancal a ar de um eixo. A Figura 1 mostra um esboço do sistema da roda de reação montada sobre a mesa de mancal a ar.

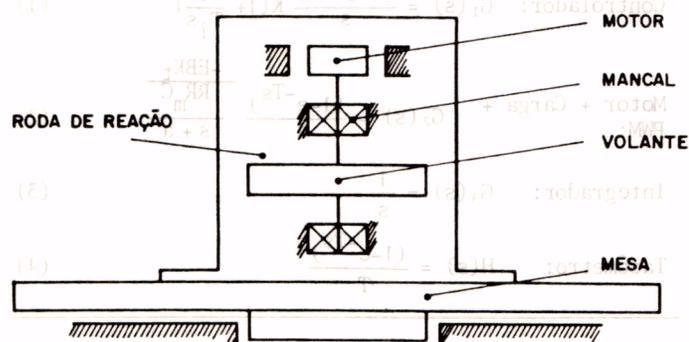


Figura 1. Roda de reação montada sobre a mesa de mancal a ar.

### DESCRIÇÃO DA RODA DE REAÇÃO

Sob o aspecto construtivo, as rodas de reação são dispositivos eletromecânicos constituídos por um motor que aciona um volante.

A maioria das rodas de reação qualificadas para vôo utiliza mancais de rolamento. O projeto destes mancais apresenta graves problemas tecnológicos. Ele deve: a) ter vida de aproximadamente dez anos, sem qualquer tipo de manutenção; b) conservar suas características de atrito constantes com o tempo e com a temperatura, nos menores níveis possíveis. A passagem da velocidade de rotação por zero é o grande problema dos mancais. Ela provoca contato metal-metal, o que, além de diminuir drasticamente sua vida, introduz não-linearidades que dificultam o controle da roda.

No projeto em questão o volante apóia-se em um mancal de rolamentos de esferas de contato angular. Os rolamentos utilizados são da classe de precisão ISO P4 em montagem "O". A pré-carga na montagem é de 50Nm. A precisão dos rolamentos exige precisões semelhantes nos assentos do mancal. Todas as superfícies devem ser acabadas em operações de retífica fina, para garantir as tolerâncias dimensionais de forma e de posição exigidas pelos rolamentos.

A lubrificação dos rolamentos deve ser permanente e estável ao longo do tempo, propiciar baixo atrito e ter bom desempenho na ampla faixa de rotações coberta pela roda. O lubrificante escolhido é um óleo sintético com  $v=69\text{mm}^2/\text{s}$  a  $40^\circ\text{C}$  e  $I.V. \approx 235$ .

O volante é desenhado como um disco simples. A otimização do seu perfil será feita em estudo posterior.

O motor utilizado é de corrente contínua do tipo "frameless", montado sobre o mesmo mancal do volante.

A medida da velocidade angular é realizada por um tacômetro óptico digital. Na primeira versão da roda o elemento sensor é um "encoder", que será substituído por um disco dentado.

A Tabela 1 e a Figura 2 fornecem as principais especificações e uma vista em corte da roda de reação.

Tabela 1. Especificações da roda de reação

QMA = 2Nms
Rotação máxima = 2000 (rpm)
Torque máximo de reação = 0,14 (Nm)
Potência máxima do motor = 60 (W)
Corrente máxima do motor = 2,82 (A)
Diâmetro/Altura = 255/246 (mm)

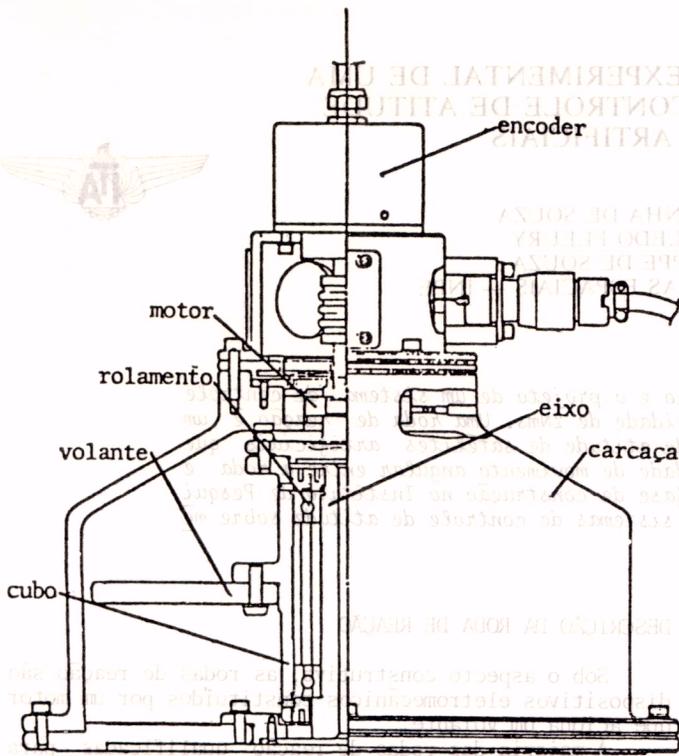


Figura 2. Vista em corte da roda de reação.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Nesta primeira etapa do projeto decidiu-se construir um sistema de controle de velocidade para a roda de reação. Este controle terá como finalidade a realização de manobras com a mesa de mancal a ar, de testes do desempenho da roda e do teste de todo o aparato que deve ser colocado sobre a mesa para a realização de simulações.

O controle é do tipo PI; o acionamento do motor é do tipo PWM e a realimentação é feita por um tacômetro digital. A opção por um controlador PI deve-se à necessidade de seguir perfis de velocidade do tipo trapezoidal. Optou-se pela abordagem de controle discreto a despeito da alta frequência de amostragem exigida pelo "encoder". A Figura 3 mostra um diagrama do sistema de controle.

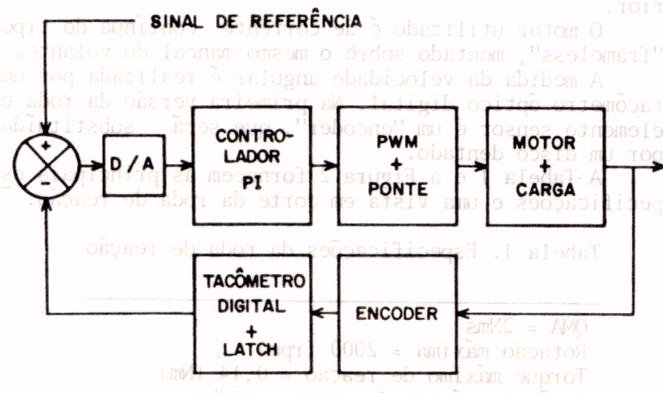


Figura 3. Diagrama do sistema de controle.

A Figura 4 mostra a malha de controle com os seus amostradores.

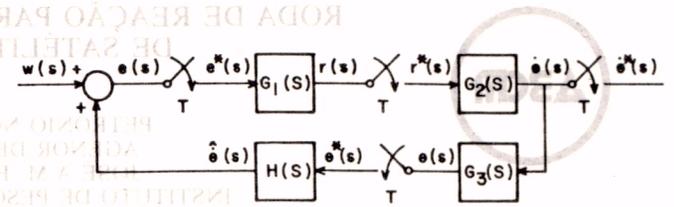


Figura 4. Malha de controle.

As funções de transferências são apresentadas na Tabela 2, onde:

- K = sensibilidade proporcional;
- T<sub>i</sub> = tempo integral;
- K<sub>t</sub> = constante de torque;

- K<sub>b</sub> = constante da f.c.e.m.;
- R<sub>m</sub> = resistência do motor;
- J<sub>r</sub> = momento de inércia da roda;
- J<sub>t</sub> = momento de inércia da mesa;

- C = coeficiente de atrito viscoso;
- T = tempo de discretização;
- E = amplitude do sinal do PWM;
- R = valor máximo do controle;

$$B = \frac{C(J_t + J_r)}{J_t J_r}$$

$$a = B \left(1 + \frac{K_t K_b}{T b}\right);$$

$$b = \frac{E K_t}{R(R_m C + K_t K_b)}$$

Tabela 2. Funções de transferências

Controlador:	$G_1(s) = \frac{(1-e^{-Ts})}{s} K \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$	(1)
Motor + Carga + PWM:	$G_2(s) = \frac{(1-e^{-Ts})}{s} \frac{-EBK_t}{RR_m C} \frac{1}{s+a}$	(2)
Integrador:	$G_3(s) = \frac{1}{s}$	(3)
Tacômetro:	$H(s) = \frac{(1-e^{-Ts})}{T}$	(4)

A função de transferência em malha fechada é dada por (5). A mesma equação aparece escrita em (6) na forma de transformada z.

$$\frac{\dot{\theta}^*(s)}{\omega^*(s)} = \frac{G_1^*(s)G_2^*(s)}{1-H^*(s)G_1^*(s)G_2^*(s)} \quad (5)$$

$$\frac{\dot{\theta}(z)}{\omega(z)} = \frac{-bK(1-e^{-aT}) \left[ 1 + \frac{T}{T_i(z-1)} \right] \frac{1}{(z-e^{-aT})}}{1 + \frac{bK}{T} \left[ 1 + \frac{T}{T_i(z-1)} \right] \frac{(z-1)}{z} \left[ \frac{T}{(z-1)} - \frac{(1-e^{-aT})}{a(z-e^{-aT})} \right]} \quad (6)$$

A função de transferência do erro é dado por (7)

$$\frac{e(z)}{\omega(z)} = \frac{1}{1-H(z)G_1(z)G_2G_3(z)} \quad (7)$$

A aplicação do Teorema do Valor Final para as entradas degrau e rampa unitários mostra erro zero para o degrau e erro em velocidade dado por (8):

$$e = \frac{1}{K_v} = \frac{T_i}{bK} \quad (8)$$

A substituição dos valores numéricos em (6) leva a (9):

$$\frac{\dot{\theta}(z)}{\omega(z)} = \frac{-2,740 \times 10^{-3} K [z - (1 - T/T_i)]}{(z-1)(z-9,998 \times 10^{-1})} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1,380 \times 10^{-3} K [z - (1 - T/T_i)] (z+9,801 \times 10^{-1})}{z(z-1)(z-9,998 \times 10^{-1})}} \quad (9)$$

Fazendo  $T_i = 6 \times 10^{-3}$ , um dos zeros da malha aberta fica igual a 0,5. A Figura 5 mostra o lugar das raízes da função de transferência (9) com  $T_i = 6 \times 10^{-3}$  e  $K$  valendo 1 e 5.

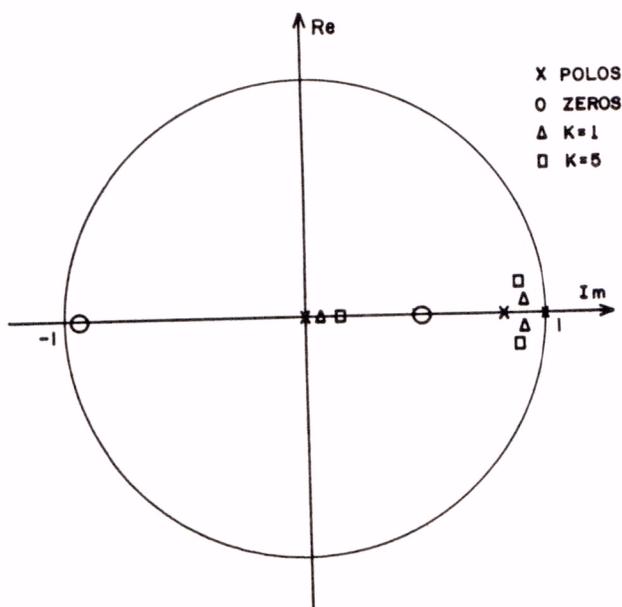


Figura 5. Lugar das raízes.

As raízes mostradas são  $6,77 \times 10^{-4}$  e  $0,9989 \pm i 0,0369$  para  $K=1$  e  $3,39 \times 10^{-3}$  e  $0,9948 \pm i 0,0826$  para  $K=5$ .

O sistema tem comportamento assintoticamente estável pelo fato de ter todas as raízes dentro do círculo unitário.

#### COMENTÁRIOS

Este trabalho descreve, de modo resumido, o projeto da primeira versão de uma roda de reação. Em função de ser um protótipo, essa roda será utilizada principalmente em ensaios de laboratório, comandando as manobras de uma mesa de mancal a ar que suporta partes do sistema de controle de atitude. Essa primeira versão, após testada, servirá de base para os desenvolvimentos futuros que incluem, na parte de controle, um controlador de torque centrado em microprocessador, e na parte mecânica, o aperfeiçoamento do mancal e melhores projetos do volante.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Ogata, K., Engenharia de Controle Moderno, Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro (1982).
- [2] Andeen, R.E., "Analysis of Pulse Duration Sampled-Data Systems With Linear Elements", IRE Transactions on Automatic Control, Setembro 1960, p.306-313.

#### SUMMARY

This paper describes the mechanical and velocity control system designs for a 2Nms capacity reaction wheel. Reaction wheels are used as actuator devices in satellite attitude control systems, exchanging angular momentum with the satellite in order to maintain a desired stability configuration. The reaction wheel will be installed in a single-degree of freedom air bearing platform, and used for attitude control systems tests in laboratory.