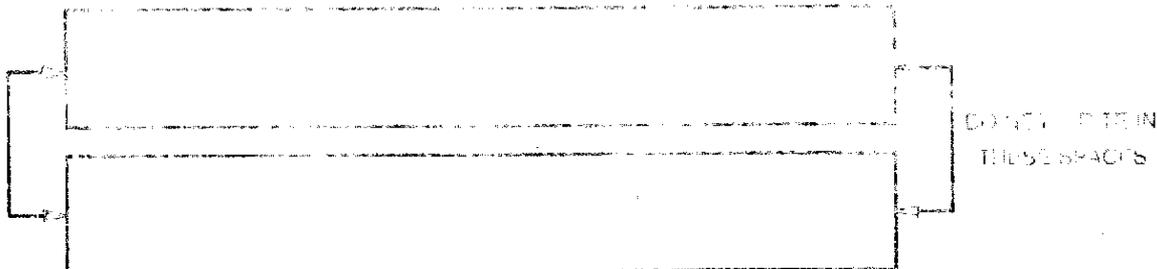


1. Publicação nº <i>INPE-4274-PRE/1146</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto 1987</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC</i>	Programa <i>A8B 508500</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E ÓRBITA</i> <i>CONTROLE DE ATITUDE</i> <i>ATUADORES</i>			<i>RODAS DE REAÇÃO</i>
7. C.D.U.: <i>629.7.062.6</i>			
8. Título <i>MODELO EXPERIMENTAL DE UMA RODA DE REAÇÃO PARA CONTROLE DA ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS: CONSTRUÇÃO, SIMULAÇÃO E TESTES</i>		10. Páginas: <i>5</i>	
		11. Última página: <i>4</i>	
9. Autoria <i>Petrônio Noronha de Souza</i> <i>Agenor de Toledo Fleury</i>		12. Revisada por  <i>Trivelato</i> <i>Gilberto da C. Trivelato</i>	
Assinatura responsável <i>Petrônio Noronha de Souza</i>		13. Autorizada por  <i>Manoel Antonio Raupp</i> <i>Director Geral</i>	
14. Resumo/Notas  <i>Este trabalho descreve os aspectos relativos ao projeto, à construção e aos testes de um modelo experimental de uma roda de reação de pequena capacidade. A roda em questão representa a consolidação do projeto descrito por Souza et al. [1]. Após a caracterização dos atritos da roda, simulações foram realizadas em laboratório com o protótipo construído, dotado de um novo controlador de velocidade. Os resultados são confrontados com simulações em computador utilizando um algoritmo não-linear para representar a passagem da velocidade por zero, demonstrando boa coerência.</i>			
15. Observações <i>Este trabalho será submetido no IX Congresso Brasileiro de Eng<sup>o</sup> Mecânica - COBEM/87, de 07 à 11 de Dezembro em Florianópolis, Santa Catarina.</i>			



**SUMÁRIO**

Este trabalho descreve os aspectos relativos ao projeto, à construção e aos testes de um modelo experimental de uma roda de reação de pequena capacidade. A roda em questão representa a consolidação do projeto descrito por Souza et al. [1]. Após a caracterização dos atritos da roda, simulações foram realizadas em laboratório com o protótipo construído, dotado de um novo controlador de velocidade. Os resultados são confrontados com simulações em computador utilizando um algoritmo não-linear para representar a passagem da velocidade por zero, demonstrando boa coerência.

**INTRODUÇÃO**

A roda de reação é um atuador comumente adotado para o controle fino da atitude de satélites artificiais que tem como características: a precisão na execução do apontamento, a alta confiabilidade, o baixo consumo de energia e as pequenas dimensões e massa. O torque nelas aplicado atua no satélite em sentido contrário, o que torna possível a absorção de impulsos angulares externos perturbadores que são armazenados na roda na forma de um incremento na sua quantidade de movimento angular (QMA). Devido à existência de torques perturbadores não-cíclicos a roda tende a saturar. A sua dessaturação pode ser feita por meio de jatos de gás ou 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.

**PROJETO MECÂNICO**

As rodas de reação são dispositivos eletromecânicos constituídos, basicamente, por um motor que aciona um volante. As exigências fundamentais no seu projeto são: volume e massa mínimos, alta confiabilidade, baixo consumo de energia e conceito modular. Além disto é necessário que as características do motor e dos torques de atrito sejam bem conhecidas e não sofram grandes alterações ao longo da sua vida.

A maioria das rodas de reação qualificadas para vôo utiliza mancais de rolamentos, que devem ter vida de aproximadamente dez anos e torques de atrito os menores possíveis. A passagem da velocidade de rotação por zero causa grandes problemas para os mancais, pois provoca contato metal-metal, o que, além de diminuir em muito sua vida, introduz não-linearidades que dificultam o controle da roda. As referências [1] e [2] trazem uma descrição completa das partes da roda de reação, a Tabela 1 traz as suas especificações e a Figura 1 mostra uma vista em corte.

Tabela 1 - Especificações da roda de reação.

Capacidade (QMA) [Nm.s]	2
Rotação máxima [rpm]	± 2.000
Potência máxima do motor [W]	60
Torque máximo [Nm]	0,137
Diâmetro/Altura/Peso [mm]/[kg]	250/246/9,16

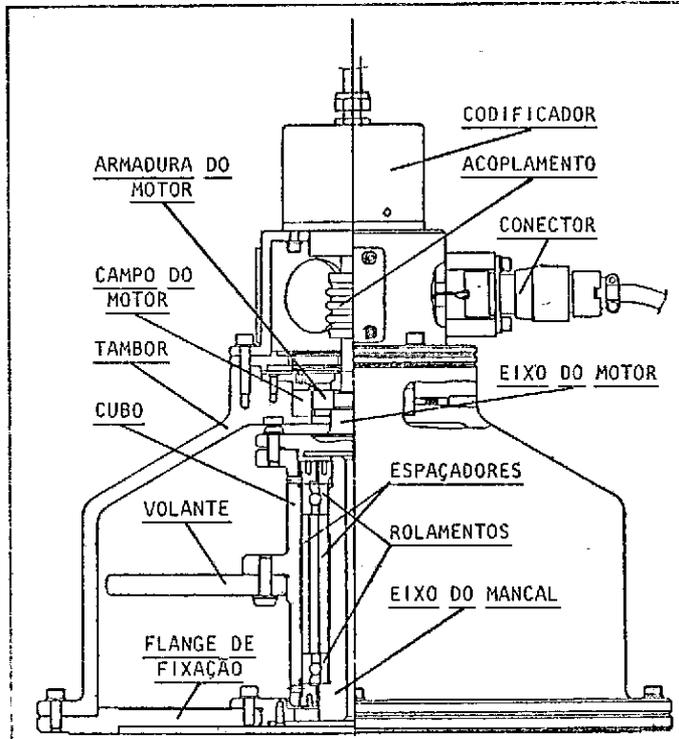


Fig. 1 - Vista em corte da roda de reação.

**SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE**

A eletrônica da roda de reação tem a função de ligá-la ao sistema de controle de atitude do satélite (SCA), o que permite sua operação como atuador.

A eletrônica concebida para ser utilizada nesta fase do projeto é uma evolução da apresentada em [1] e tem o seu circuito dividido em tacômetro, comparador, controlador-modulador da largura de pulso (MLP) e, finalmente, gerador de sinais de referência (Figura 2).

O gerador de sinais de referência gera perfis de velocidade mediante telecomandos. O comparador faz a diferença entre os sinais digitais de referência e do tacômetro. Sua saída passa por um conversor D/A de 10 bits. O sinal de erro passa então para o controlador analógico (PouPI). A saída do controlador comanda o circuito modulador de pulsos que, por sua vez, comanda a ponte de alimentação do motor. A realimentação é feita por um tacômetro digital cujo sensor é um codificador óptico.

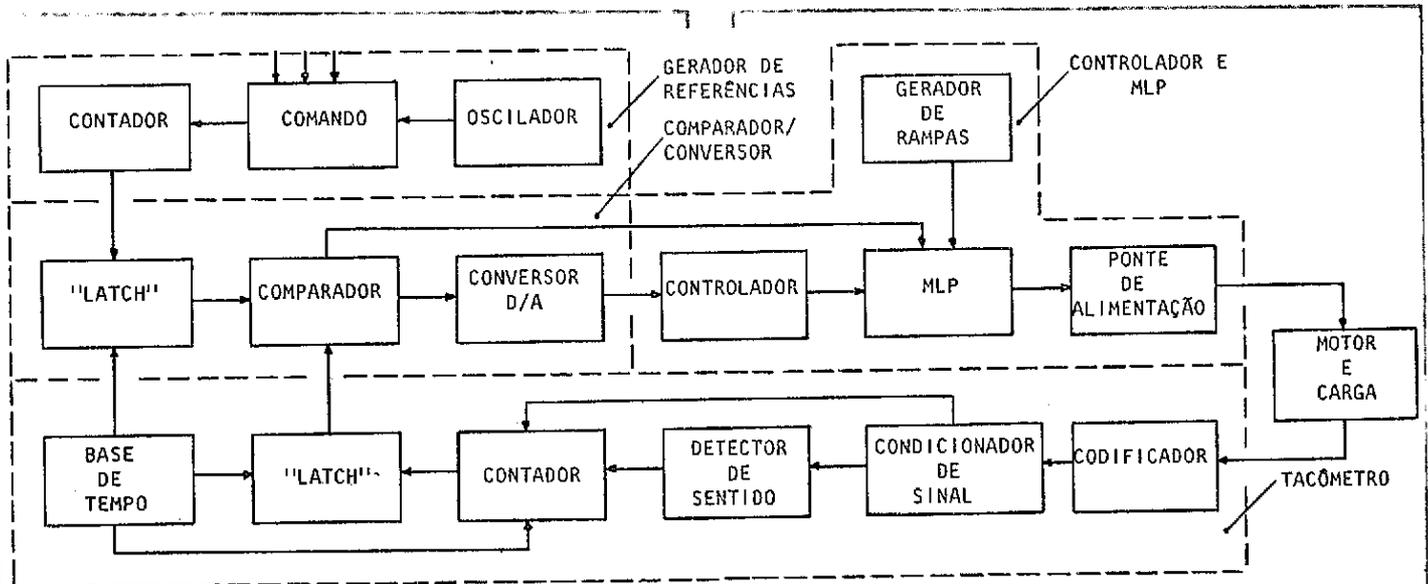


Fig. 2 - Diagrama da eletrônica da roda de reação.

A análise do sistema de controle parte do modelo da carga, que é tomado como duas massas girantes no espaço, conectadas através de um motor e possuidoras de atrito viscoso entre si. O motor de corrente contínua é considerado sem indutância e o modulador da largura de pulsos é tomado como um ganho fixo, dada a frequência de chaveamento (1.200 Hz) [2]. Os modelos dos controladores P e PI são analógicos [3]. O tacômetro opera de forma amostrada e seu modelo é uma equação de diferenças que calcula a velocidade média ao longo do período de amostragem (1/18 s). A Figura 3 apresenta a malha de controle equivalente ao diagrama da Figura 2.

A análise da malha é feita por meio da transformação em Z. A estabilidade é verificada através do Critério de Jury. A Figura 4 traz o lugar das raízes com o controlador PI, no qual o ganho proporcional ( $K_p$ ) varia de 1 a 400 e o tempo integral ( $T_I$ ) vale 1,54 s. A vantagem do controlador PI sobre o controlador P vem do fato de ele seguir os perfis de velocidade com maior precisão (não apresenta desajuste com relação ao degrau) e também por apresentar um melhor desempenho no momento da passagem por zero [2].

#### CARACTERIZAÇÃO DOS TORQUES DE ATRITO

Os testes de caracterização visam determinar os valores dos torques de atrito seco, de aderência e do coeficiente do torque de atrito viscoso. Para tanto foram realizados dois experimentos distintos. No primeiro, o coeficiente do torque de atrito viscoso e o torque de atrito seco são determinados por meio da medição da corrente consumida pela roda em diversas velocidades. No segundo, a corrente consumida no instante da

partida é medida, o que possibilita o cálculo do torque de atrito de aderência. Os resultados colhidos experimentalmente estão na Figura 5. Os valores médios dos parâmetros são  $4,98 \times 10^{-5}$  Nm/rad/s para o coeficiente do torque de atrito viscoso,  $9,42 \times 10^{-3}$  Nm para o torque de atrito seco e  $2,02 \times 10^{-2}$  Nm para o torque de aderência. Estes resultados são confrontados na Figura 6 com os resultados disponíveis para as rodas de reação RSR2-2 e RSR2-0 da Teldix [4], tradicional fornecedora desses dispositivos para a Agência Espacial Europeia, ESA.

Com relação aos torques de atrito seco e viscoso, nota-se que a diferença em relação à roda RSR2-2 é pequena. A maior discrepância está no valor do torque de atrito de aderência.

Deve ser salientado que o projeto feito deve incorporar uma série de melhorias para um segundo modelo: a eliminação dos rolamentos do codificador, a evacuação da caixa e a eliminação dos escovas do motor. Desta maneira será possível atingir níveis de atrito compatíveis com as rodas de reação já qualificadas.

#### MANOBRAS COM A RODA DE REAÇÃO

A finalidade das manobras é conhecer o comportamento real da roda e validar um programa de simulação cuja finalidade é auxiliar o desenvolvimento de SCAs. Este programa conta com um algoritmo que simula algumas das não-linearidades dos torques de atrito e as saturações presentes no conversor D/A, no controlador e no circuito MLP.

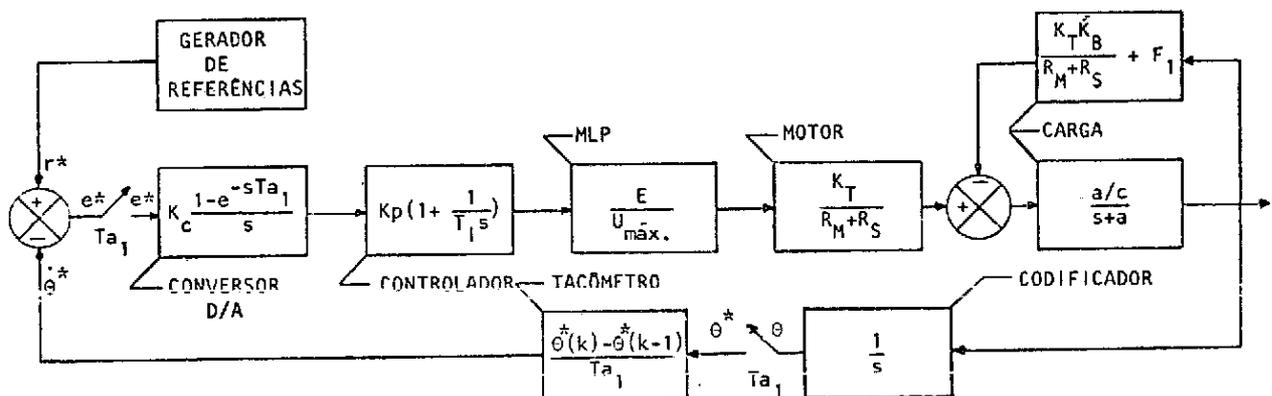


Fig. 3 - Malha de controle da roda de reação.

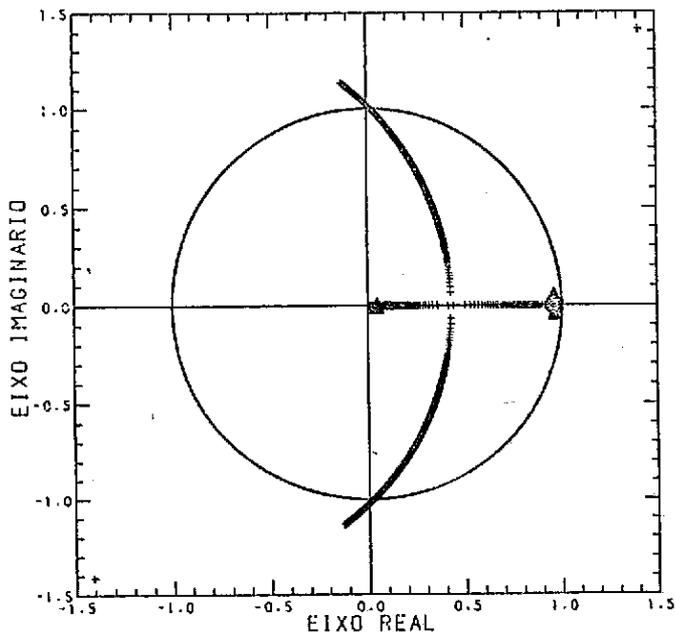


Fig. 4 - Lugar das raízes com controlador PI.

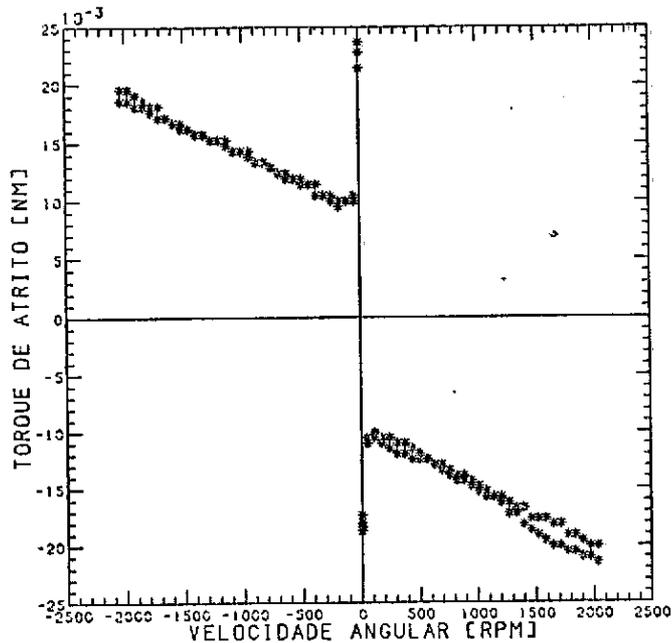


Fig. 5 - Torques de atrito que atuam na roda de reação.

O resultado apresentado é o registro dos sinais de erro e controle ao longo de uma rampa de 100 a -100 rpm, seguida de outra de -100 a 100 rpm, cada uma em 100s e com a roda equipada com o controlador PI. Este experimento mostra os reflexos das não-linearidades nos movimentos anteriores e posteriores à imobilização. A Figura 7 traz o resultado de laboratório e as Figuras 8 e 9 as simulações em computador digital (Burroughs B6800).

Neste experimento dois eventos de grande importância são identificados. O primeiro, denominado congelamento, é observado na primeira parte da rampa. Trata-se da interrupção do movimento devido ao brusco incremento do torque de atrito nas proximidades da velocidade zero. O detalhe 1 da Figura 7 mostra este evento,

O segundo evento a ser ressaltado é a dificuldade que o sistema tem para partir a roda após sua imobilização. Isto se deve ao atrito de aderência, que se manifesta com a roda imobilizada (detalhe 2).

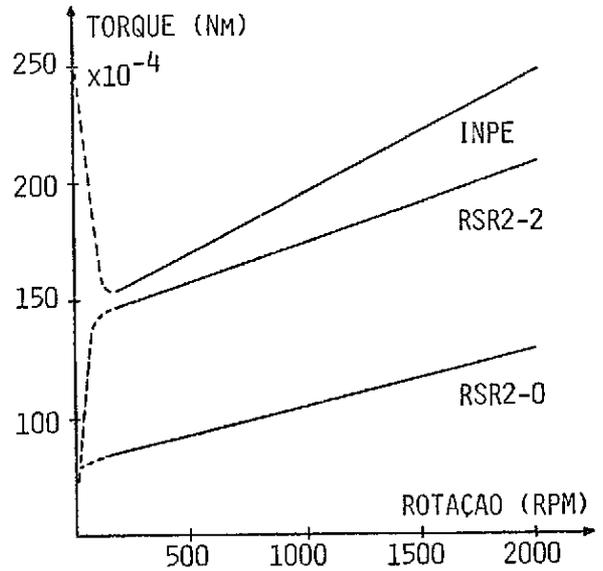


Fig. 6 - Comparação com as rodas RSR2-2 e RSR2-0 da Teldix.

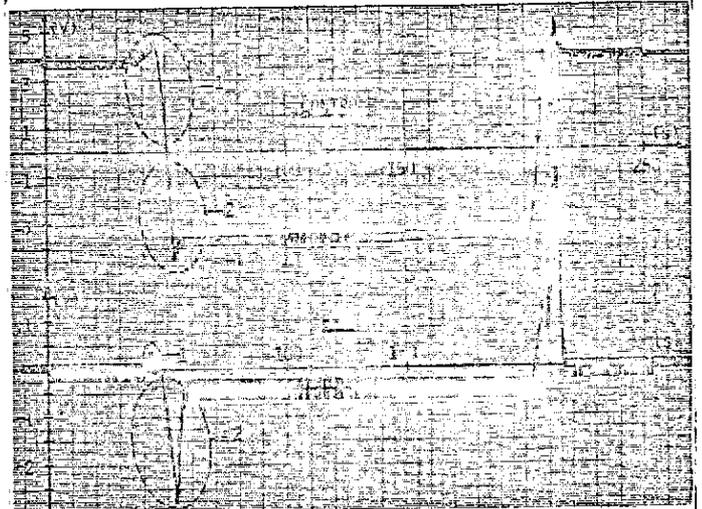


Fig. 7 - Controle e erro para as rampas com controlador PI.

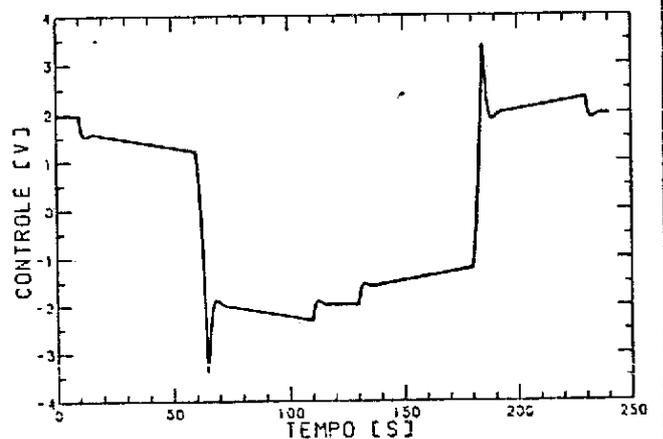


Fig. 8 - Simulação do controle.

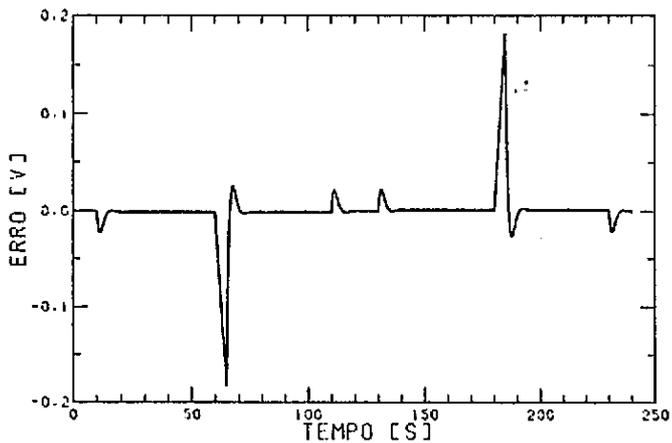


Fig. 9 - Simulação do erro.

O modelo de atrito implementado no programa de simulação distingue-se do modelo real por desconsiderar a transição existente entre os torques de atrito seco e de aderência. Quanto ao modelo da eletrônica, este não considera outras não-linearidades além das saturações já citadas. Por estas razões as simulações não conseguem reproduzir nem o congelamento nem as variações do nível da voltagem do erro em torno de zero, porém reproduzem com fidelidade o comportamento ao longo da partida. As discrepâncias numéricas devem-se às dificuldades envolvidas na determinação dos torques de atrito nas proximidades da velocidade zero.

#### COMENTÁRIOS

O grau de desenvolvimento atingido pelo projeto deste modelo experimental de roda de reação, juntamente com um controlador de torque já em desenvolvimento, satisfaz as necessidades da bancada de desenvolvimento de sistemas de controle da atitude em desenvolvimento no INPE [5] e, além disto, mostra que existe a possibilidade de desenvolver no País um dispositivo deste tipo com vistas na qualificação para voo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Souza, P.N.; Fleury, A.T.; Felipe de Souza, J.A. M., Projeto de um Modelo Experimental de uma Roda de Reação para Controle de Atitude de Satélites Artificiais, Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pp. 481-483, S.J. dos Campos, 1985.
- [2] Souza, P.N., Análise, Projeto, Construção e Testes de um Modelo de Roda de Reação para Aplicações Espaciais, Dissertação de Mestrado, INPE, S.J. dos Campos, 1986.
- [3] Ogata, K., Engenharia de Controle Moderno, Prentice/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, 1982.
- [4] Prins, J.J.M., Experimental and System Study of Reaction Wheels Part II: System Study on Wheel State Feedback, National Aerospace Laboratory NLR, The Netherlands, 1982.
- [5] Fleury, A.T.; Souza, P.N.; Trivelato, G.C.; Ferraresi, V.A.; Ribeiro, J.F., Simulação e Testes de Sistemas de Controle de Atitude e Órbita de Satélites: considerações gerais sobre um caso exemplo (INPE) e projeto de uma mesa de rotação controlada. A ser publicado em SBA: Controle e Automação, Vol I, nº 3, 1987.

#### ABSTRACT

This work describes aspects of design, construction, simulation and tests of a low capacity reaction wheel experimental model. This reaction wheel represents the consolidation of a project described by Souza et al. [1]. Computer simulations are presented using a non linear algorithm in order to represent the critical problem occurred when the wheel speed has to cross near zero velocities, where dry and stiction frictions cause a large degradation on the actuator performance. After measurement of the friction parameters, simulations were done in laboratory using a model including a new speed control system. The experimental results are compared with the computer simulations demonstrating a good coherence.