

# Controle de uma Mesa de Mancal a Ar de um Eixo Equipada com Giroscópio e Roda de Reação

Valdemir Carrara\*, Paulo Giacomo Milani\*

**Resumo** Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de controle realizado em uma Mesa de Mancal a Ar - MMAr de um eixo. Ele está sendo realizado no Laboratório de Simulação – LabSim de sistemas de controle de satélites da Divisão de Mecânica Espacial e Controle – DMC do INPE. O trabalho apresenta uma lista de todos os equipamentos utilizados e as suas características, assim como se desenvolvem os modelos matemáticos do giroscópio e da roda de reação, realiza-se a medida do momento de inércia da mesa de mancal a ar, propõe-se um modelo linear para a dinâmica dela e realiza-se um teste de controle em malha fechada usando os equipamentos listados. Os resultados foram compatíveis com as precisões dos instrumentos, conseguindo-se controlar a mesa com erro de 0,01%/s em velocidade e 0,7° em ângulo.

**Palavras chave** Mesa de Mancal a Ar, controle em tempo real, controle de atitude.

**Abstract** This article presents an implementation of a control system implemented on one axis Air Bearing Table. It has been executed at the Laboratory of Simulation of the Space Mechanics and Control Division – DMC of INPE. The work presents a list of all the equipments used in the experiment and their characteristics, the developed models for the gyroscope and the reaction wheel, the measured momentum of inertia of the air table, a linear mathematical model of its dynamics and some tests of a closed loop control system using all the above listed equipments. The results were compatible with sensor accuracy, reaching 0.01%/s error in the angular velocity and 0.7° in angular position.

**Keywords** Air Bearing Table, real time control, attitude control.

## I. INTRODUÇÃO

O controle de atitude de satélites artificiais é considerado uma área estratégica pelos países que possuem tecnologia para construir e lançar satélites. O Brasil, por intermédio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, está investindo nesta área para garantir autonomia nas próximas missões espaciais, que requerem, dos sistemas embarcados, alto grau de precisão, confiabilidade e autonomia. O presente experimento visa iniciar atividades no sentido de dotar o LabSim do INPE de um conjunto de equipamentos e ferramentas computacionais para efetuar simulações e controle em ambiente de laboratório.

Um sistema de controle de atitude em três eixos, comumente empregado nos satélites atuais, envolve um grupo de sensores inerciais para medição de velocidade (giroscópios) e deslocamento angular (sensores de estrelas, sensores solares, magnetômetros, sensores de horizonte), aliado a um grupo de

atuadores que incluem bobinas magnéticas, jatos e rodas de reação). Embora nem todos os satélites contem com todos estes equipamentos, muitos usam uma combinação de rodas de reação com giros e sensores de estrelas. Este arranjo dá ao sistema um alto grau de confiabilidade e precisão, além de ser propício para utilização em controle digital. Rodas de reação são motores DC *brushless* dotados de um rotor com grande inércia. Ao aplicar-se um torque ao motor, este responde com um torque (princípio da ação e reação) no sentido contrário, que pode ser utilizado para controlar a posição ou velocidade angular de um satélite. Como este torque é de origem interna, ele não altera o momento angular total do satélite.

No experimento aqui relatado decidiu-se implementar um arranjo que contemplasse pelo menos uma roda de reação e uma unidade girométrica. Em virtude da impossibilidade de se gerar, na Terra, um ambiente ausente de torques como aquele encontrado no espaço, foi selecionada para o experimento uma mesa de mancal aerostático, que se apóia num colchão de ar e permite um movimento rotacional de baixo torque num plano horizontal. Experimentos anteriores [1] indicaram um torque residual de cerca de  $10^{-4}$  Nm a uma velocidade angular de 30°/s. Tais torques são cerca de 10 vezes menores do que o torque máximo gerado pela roda de reação, embora esta possa gerar torques de magnitude ainda menor.

Assim, os equipamentos usados para realizar o experimento foram:

- Mesa de mancal aerostático, com diâmetro de 650 mm.
- Uma roda de reação da Sunspace com velocidade de rotação entre  $\pm 4200$  rpm, torque máximo de 50 mNm, momento angular máximo de 0,65 Nms, momento de inércia do rotor de  $1,5 \cdot 10^{-3}$  kgm<sup>2</sup>, erro da malha de rastreamento de velocidade menor do que 1 rpm e consumo de corrente de 40mA / mNm a 12 VDC.
- Um giroscópio do tipo FOG (Fiber Optics Gyroscope) da Sunspace com campo de medidas de  $\pm 80$  °/s, viés em toda a faixa de temperatura menor que 6°/h e, em temperatura estabilizada, menor que 3°/h.
- Um equipamento de transmissão e recepção bidirecional por radiofrequência (Rádio-modem) produzido pela Freewave, operando de 908 a 950 MHz, com taxa máxima de dados de 110 Kbps e protocolo RS-232.
- Uma bateria de 12VDC (ácido-chumbo) selada, com capacidade de 7 Ah para alimentação dos equipamentos montados na MMAr.
- Um computador National Instruments PXI-8171 PIII de 1,26 GHz executando Windows 2000.

Tanto o giroscópio quanto a roda de reação são comandados e alimentados por meio de uma eletrônica de controle que aceita comandos através de um protocolo

\*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Divisão de Mecânica Espacial e Controle – DMC, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mails: val@dem.inpe.br, milani@dem.inpe.br

dedicado com interface RS-485. Um conversor RS-232/RS-485 permite que se conecte essa eletrônica de controle com um computador tipo IBM-PC ou equivalente. É necessário que a bateria que alimenta o experimento suporte corrente reversa de até 3 A, pois a roda de reação atua como gerador quando desacelerada. Na mesa foram integrados o giroscópio, a roda de reação, a eletrônica de controle, o conversor 232/485, um rádio-modem e a bateria. Na parte estática ficaram o computador e o outro rádio-modem. A Figura 1 apresenta um diagrama em blocos do arranjo, enquanto que a Figura 2 mostra uma foto da mesa com os equipamentos já montados.

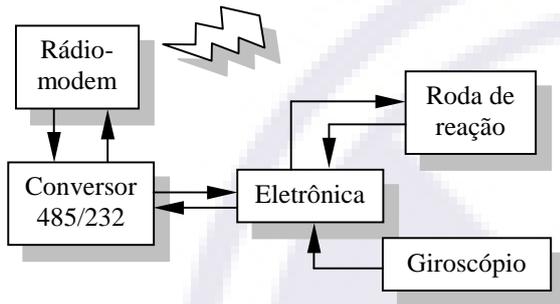


Fig. 1. Diagrama em blocos do experimento.

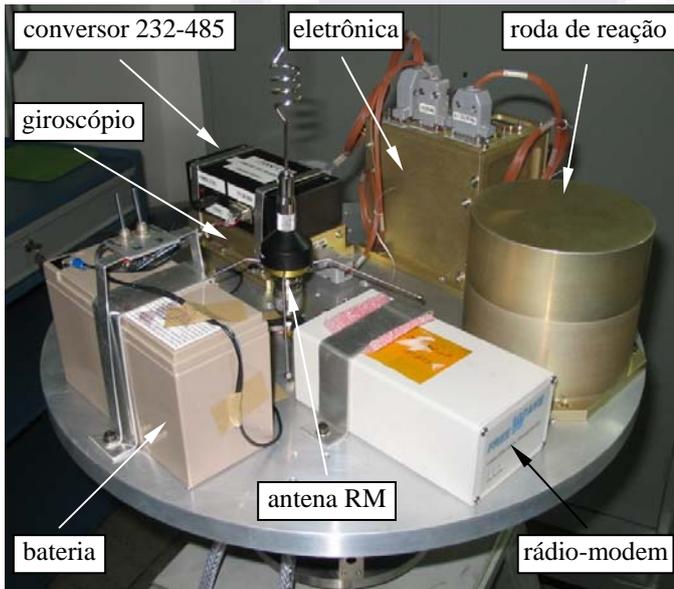


Fig. 2. Foto do experimento montado na mesa de mancal a ar.

Observa-se que a eletrônica de controle está interligada tanto ao giroscópio quanto à roda de reação. A comunicação por rádio-modem permite que o programa de controle fique estacionário sem a necessidade de cabo de conexão ou anéis deslizantes (*slip-rings*), que certamente introduziriam atritos adicionais à mesa.

## II. BALANCEAMENTO E NIVELAMENTO DA MMR

Para a correta operação da mesa é necessário que ela seja balanceada e nivelada, já que pequenos erros tanto em um ajuste quanto no outro influem fortemente nas medidas do giroscópio, como ficou demonstrado por Carrara e outros [1].

O balanceamento foi realizado com a mesa desnivelada

propositadamente em cerca de 2°, com todos os equipamentos já fixados a ela, de tal forma a evidenciar o efeito da assimetria na distribuição de massa. Utilizou-se uma pressão de 2 kgf/cm<sup>2</sup> de ar comprimido para manter a mesa sem contacto com o mancal [2]. Determinou-se, em seguida, a direção de desbalanceamento da mesa, pela observação do ponto ao redor do qual a mesa oscilava. Foram em seguida aplicados contra-pesos em duas posições distintas (uma quase oposta à concentração da massa e outra perpendicular a esta), conseguindo-se, assim, um balanceamento relativamente preciso, embora bastante empírico. De fato, um contra-peso de apenas 10 gramas, após balanceada, foi suficiente para fazer com que a mesa de mais de 15 kg voltasse a oscilar.

O nivelamento da mesa exigiu uma estratégia oposta ao balanceamento. A inclinação da mesa foi ajustada por meio de 3 parafusos espaçadores fixados aos 3 pés, acompanhando-se o resultado com o uso de um nível de bolha de precisão (0.02mm/m). Sabia-se, porém, que possíveis erros de desalinhamento do próprio mancal fariam com que tal nivelamento se mostrasse imperfeito, como de fato ocorreu. Neste estágio a mesa ainda apresentava uma pequena tendência a oscilar em longos períodos. Provocou-se então um forte desbalanceamento na mesa acrescentando um peso numa dada posição dela, a fim de evidenciar a direção de desnivelamento. Quando a tendência de oscilação foi eliminada, com o ajuste dos parafusos, o peso extra foi removido e considerou-se a mesa nivelada e balanceada. Nesta situação não se conseguiu observar qualquer tendência da mesa a mover-se uma vez que fosse estacionada numa direção qualquer. As duas atividades desta etapa do trabalho foram interdependentes. Foi preciso desnivelar a mesa para permitir o seu balanceamento e desbalanceá-la para permitir o seu nivelamento.

O uso de rádio-modem facilitou a preparação do arranjo de testes, pois, uma vez que a mesa foi nivelada e balanceada, não se alterou mais a configuração dos equipamentos e todo o controle foi realizado em um computador, sem qualquer contato físico com os equipamentos.

O programa de controle da mesa foi desenvolvido em C (Ansi), com recursos de operação em tempo real implementados por Carrara e Hassmann [3] com compilador Visual C++ 6. As funções para telemetria e telecomando do giroscópio e da roda de reação (*drivers*) foram providas pelo fornecedor SunSpace [4].

## III. MODELO DO GIROSCÓPIO

Embora o giroscópio utilizado possua precisão suficiente para atender aos propósitos do experimento, ainda assim pode-se melhorar significativamente suas medidas pela adoção de um modelo matemático dos erros sistemáticos. O modelo empregado aqui é estabelecido por:

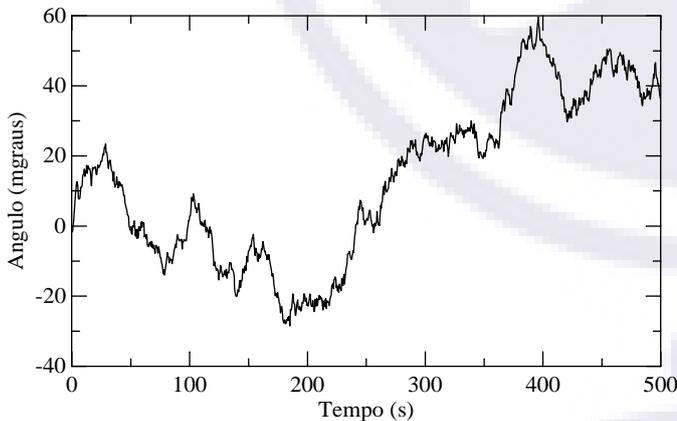
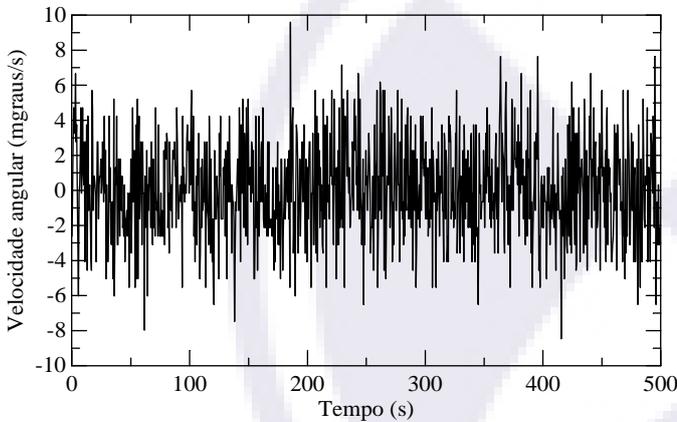
$$\omega = \frac{g}{\Delta t} \frac{8000}{32765} - \omega_T - b \quad (1)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular da mesa (em miligráus/s),  $g$  é a leitura acumulada do giro (em unidades giométricas),  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem,  $\omega_T$  é uma compensação da

velocidade angular da Terra na direção do eixo de leitura do giro, e  $b$  é o viés estimado (*bias*). A velocidade angular da Terra é calculada por:

$$\omega_r = \Omega_T \text{ sen } \varphi, \quad (2)$$

no qual  $\Omega_T = 4,178075$  miligraus/s é a velocidade angular da Terra, e  $\varphi = -23,21014^\circ$  é a latitude do local do experimento (São José dos Campos, SP). Para estimar o viés, procedeu-se a um teste com a mesa imobilizada, com duração de 500 s,  $\Delta t$  de 1 s, no qual o viés calculado foi de 0,35 m<sup>o</sup>/s (miligraus/s), compatível com a especificação do giroscópio. Repetiu-se em seguida o mesmo teste, agora com a correção de viés, cujas leituras da velocidade angular são mostradas na Figura 3 e cujo ângulo integrado é mostrado na Figura 4. Percebe-se, na Figura 4, o característico sinal residual de *random walk* apresentado pelo giroscópio.



**IV. MODELO MATEMÁTICO DA RODA DE REAÇÃO**

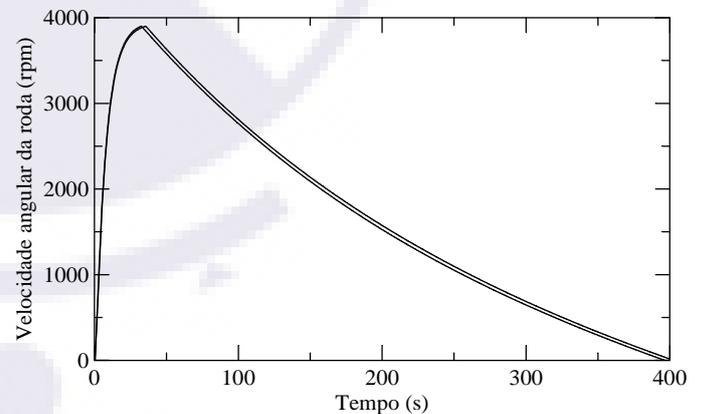
Rodas de reação podem ser controladas de duas formas distintas: em malha aberta, por ajuste da tensão ou corrente aplicada ao motor DC, ou em malha fechada, pela seleção da velocidade angular da roda. Neste caso um circuito eletrônico ajusta a corrente do motor com base na velocidade de referência. A roda utilizada no experimento conta com estas duas formas de controle: seleção da velocidade em malha fechada, ou em malha aberta com seleção da corrente de armadura. Porém, neste último caso não se conhece a correspondência entre o a corrente e o torque desenvolvido.

Sabe-se que o torque gerado pelo motor é praticamente proporcional à corrente de armadura, mas a constante de proporcionalidade não foi fornecida. O torque máximo, dado pelo fabricante, é de 50 mNm [4]. Além disso, o controle da corrente não é igual ao controle do torque, uma vez que o atrito diminui o torque líquido aplicado à roda em altas velocidades. Para investigar esta correspondência entre o torque e a corrente, foi necessário desenvolver um modelo para o torque gerado pela roda de reação.

Neste experimento, acelerou-se a roda até 3900 rpm (em ambos os sentidos), e, a seguir, comandou-se uma corrente de armadura nula, a partir do qual observou-se o decaimento da velocidade angular. Como mostrado na Figura 5, o torque de atrito não é linear, mas pode ser modelado por meio de um torque constante contrário à velocidade angular e um torque linear de atrito viscoso:

$$k_r I_r = J_r \dot{\omega}_r + b_r \omega_r + c_r \text{sgn}(\omega_r) \quad (3)$$

no qual  $k_r$  é a constante de proporcionalidade da roda,  $I_r$  é a corrente de armadura selecionada,  $b_r = 4,9 \cdot 10^{-6}$  kg m<sup>2</sup>/s é o coeficiente de atrito viscoso,  $c_r = 0,3016$  Nm é o atrito estático e  $\text{sgn}(\cdot)$  é a função que extrai o sinal do argumento. Os parâmetros acima foram ajustados manualmente, com grande compatibilidade com os dados obtidos, restando apenas um resíduo menor do que 3 rpm em toda a extensão. O decaimento apresentou valores bastante semelhantes tanto quando a roda foi comandada num sentido de rotação quanto no outro (Figura 5). Acredita-se que  $k_r$  seja aproximadamente igual a 0,023 Nm/A, de acordo com cálculos efetuados a partir de especificações da roda [4], o que é necessário confirmar.



Para evidenciar a correspondência entre o a corrente de armadura aplicada à roda e o torque efetivo gerado pelo motor, efetuou-se um experimento no qual aplicava-se um comando de corrente e media-se a velocidade da roda após estabelecer o equilíbrio entre o motor e o atrito. O torque gerado era então obtido pela comparação com a curva de decaimento (Equação 3), na qual  $\dot{\omega}_r = 0$ . Conseguiu-se, assim, gerar valores para a corrente variando numa faixa muito estreita de -100 a 100 mA, já que, em correntes maiores, o equilíbrio era estabelecido em velocidades muito acima do limite imposto à roda pela sua própria eletrônica, que atua como limitador. De fato, a Equação 3 aponta que o máximo torque de atrito

dinâmico é de apenas 0,002 N ao passo que o atrito estático é 150 vezes maior. Este torque é tão elevado que é necessário uma corrente de cerca de 40 mA para iniciar o movimento da roda, como observado na Figura 6. É um fato bastante conhecido que rodas de reação têm comportamentos não lineares durante a inversão do sentido de rotação [5]. A análise dos valores obtidos com este teste permitiram avaliar que a constante de proporcionalidade da roda é  $k_r = 0,0265 \text{ Nm/A}$ .

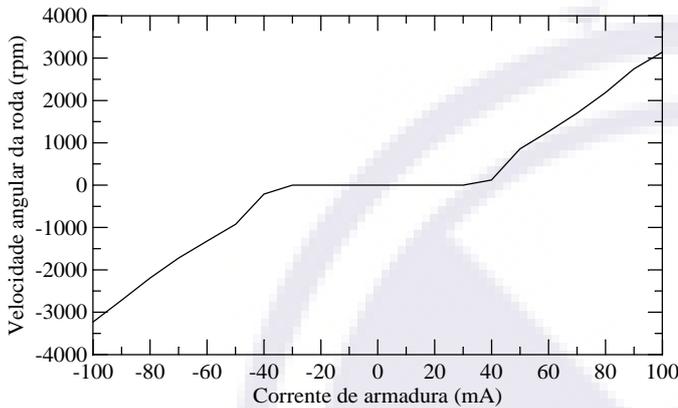


Fig. 6. Comportamento da velocidade de rotação em função da corrente de armadura na roda de reação.

**V. MOMENTO DE INÉRCIA DA MESA**

Para estimar o momento de inércia da mesa adotou-se um procedimento no qual parte-se com velocidade angular nula, e, em seguida, comanda-se a roda de reação para acelerar até uma dada velocidade angular, o que faz com que a mesa gire em sentido oposto. Após as medições da velocidade angular comanda-se novamente a roda de reação para desacelerar até a parada completa, como visto nas Figuras 7 e 8, que correspondem à velocidade da roda e da mesa, respectivamente. As velocidades angulares da mesa são monitoradas com o giroscópio durante todo o processo, inclusive durante os períodos de estabilidade (adotado como 10 s). Se o atrito da mesa for desconsiderado durante este intervalo de tempo, então a lei da conservação do momento angular atesta que:

$$J = - \frac{(\omega + \omega_r)}{\omega} J_r, \tag{4}$$

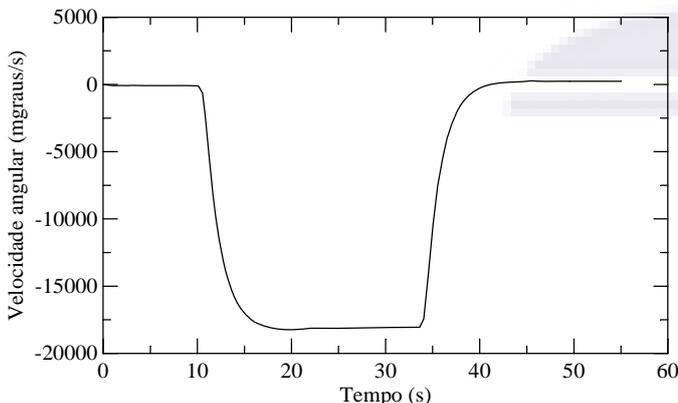


Fig. 7. Perfil de velocidades angulares da mesa durante o teste para determinar o momento de inércia

onde  $J$  é o momento de inércia da mesa ao redor do seu eixo de rotação e  $J_r$  é o momento de inércia do rotor da roda (fornecido pelo fabricante e igual a  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$  [4]). Uma vez que a velocidade da roda é medida em relação à da mesa, então é necessário adicioná-las para se obter a velocidade absoluta. A roda foi comandada para uma rotação de 1000 rpm (velocidade medida média de  $\omega_T = 999,4 \text{ rpm}$ ) e a velocidade angular média medida pelo giroscópio durante esta fase foi de  $\omega = -3,017 \text{ rpm}$ , o que leva a  $J = 0,4954 \text{ kg m}^2$ .

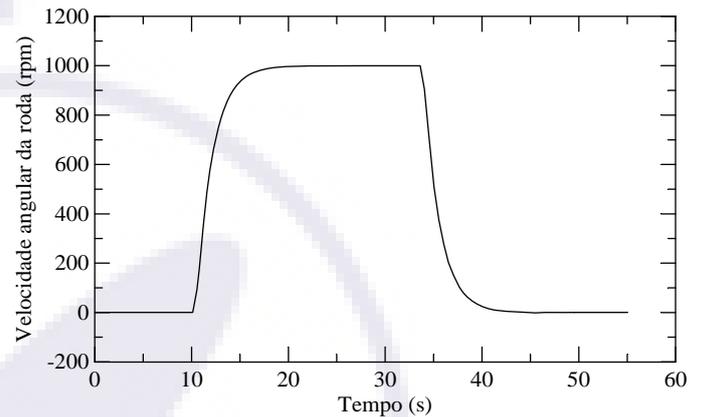


Fig. 8. Perfil de velocidades angulares da roda de reação no teste para a determinação do momento de inércia da mesa

O coeficiente de atrito da mesa pode ser estimado pela análise do decaimento da velocidade angular da mesa. Para efetuar esta determinação, imprimiu-se manualmente uma velocidade de aproximadamente  $40^\circ/\text{s}$  na mesa, e foram coletadas medidas médias do giroscópio a cada 6 segundos. Como visto na Figura 9, ela levou cerca de 5 horas para atingir uma velocidade de aproximadamente  $1^\circ/\text{s}$ , e estabilizou neste patamar.

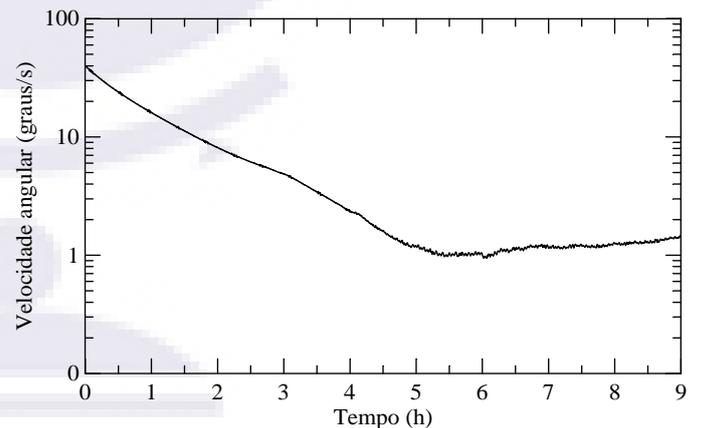


Fig. 9. Decaimento da velocidade angular durante o teste para determinar o coeficiente de atrito.

O decaimento pode ser modelado por meio de um atrito constante, de coeficiente igual a  $b = 9,645 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^2/\text{s}$ . A estabilização da mesa no patamar de  $1^\circ/\text{s}$  deve-se provavelmente a processos de turbilhonamento do ar comprimido no interior do mancal. O ligeiro aumento da velocidade angular após 5 horas de experimentação é de difícil explicação, embora possa ser devido a variações térmicas do ar comprimido e do mancal. Este comportamento foi também

observado quando a mesa foi posta para girar no sentido inverso, com a velocidade estabilizando ao redor de 1°/s. Porém, cerca de 2 horas após a estabilização da velocidade neste patamar a mesa entrou em movimento pendular, devido ao desbalanceamento e desnivelamento residuais. Constatou-se, com isso, que este torque residual é não linear e depende do sentido de giro da mesa. Sabe-se, contudo, que ele seguramente é inferior a  $2,7 \cdot 10^{-7}$  Nm, com base na Equação 3, o que o torna praticamente desprezível para os propósitos do experimento.

## VI. MODELO DINÂMICO DA MESA

Se as contribuições do desnivelamento e desbalanceamento residuais forem desprezadas, então se pode considerar a dinâmica da mesa como composta unicamente por uma inércia sujeita a um torque de atrito viscoso com o ar. A função de transferência em malha aberta será dada, considerando a saída como sendo a velocidade angular da mesa, por:

$$G(s) = \frac{1}{Js + b}, \quad (5)$$

ou seja, é um sistema de primeira ordem. Introduzindo um controle PI neste sistema, tem-se para a função de transferência em malha fechada:

$$G(s) = \frac{K_p (T_i s + 1)}{T_i J s^2 + T_i (b - K_p) s - K_p}, \quad (6)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional e  $T_i$  é o ganho integral. Esta equação permite estabelecer uma correspondência entre os ganhos e o comportamento desejado para o sistema. Considerando-se, então, um comportamento superamortecido, chega-se à uma relação quadrática envolvendo os ganhos proporcional e integral, que pode ser resolvida desde que um dos ganhos seja adotado previamente. Escolhendo-se então  $T_i = 250$  s obtém-se  $K_p > 0,008$  Nms. Nos testes realizados a seguir adotou-se  $K_p = 0,1$  As<sup>o</sup> = 0,152 Nms, caso se considere que  $k_r = 0,0265$  Nm/A.

## VII. TESTES DE CONTROLE DA MESA

Foram elaborados dois testes para avaliar o controle da mesa em malha fechada: no primeiro foi feito um controle da velocidade angular e no segundo implementou-se um controle da posição angular. Utilizou-se em ambos uma taxa de amostragem do giroscópio e de comando da roda de 2 Hz. O sinal de erro para o controlador PI, no controle de velocidade, foi dado pela diferença entre uma velocidade de referência e a leitura corrigida do giroscópio (Equação 1). O erro integrado foi calculado pela acumulação do erro multiplicado pelo tempo de amostragem, e a velocidade de referência foi especificada em 30°/s. A roda e a mesa foram postas inicialmente em repouso, e o controle iniciou-se 2 segundos após a contagem do tempo, como ilustra a Figura 10. Os ganhos foram ajustados de forma a se conseguir um comportamento superamortecido do controle, e resultaram  $K_p = 0,1$  As<sup>o</sup> e  $K_i = 0,0004$  A<sup>o</sup> (correspondente a  $T_i = 250$  s). O sinal de controle é mostrado na Figura 11, onde se percebe que

o controle integral atingiu um patamar não nulo durante a fase de regime permanente, de forma a compensar o efeito de atrito da mesa. Durante a fase de aceleração da roda o sinal de controle ultrapassou o limite superior ( $\pm 2200$  mA) e teve de ser truncado.

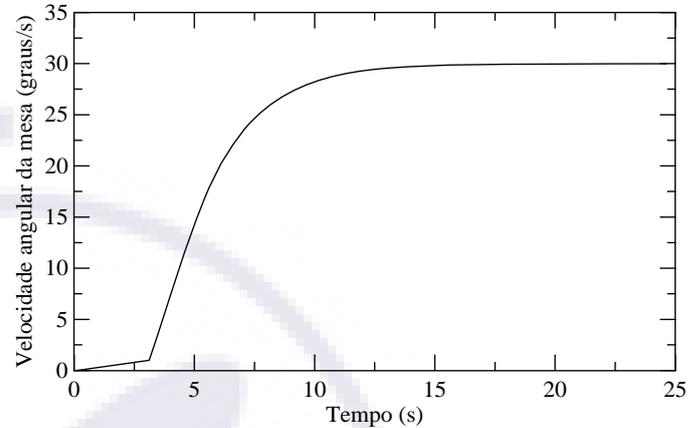


Fig. 10. Velocidade de rotação da mesa de mancal a ar sob ação de um controle de velocidade angular.

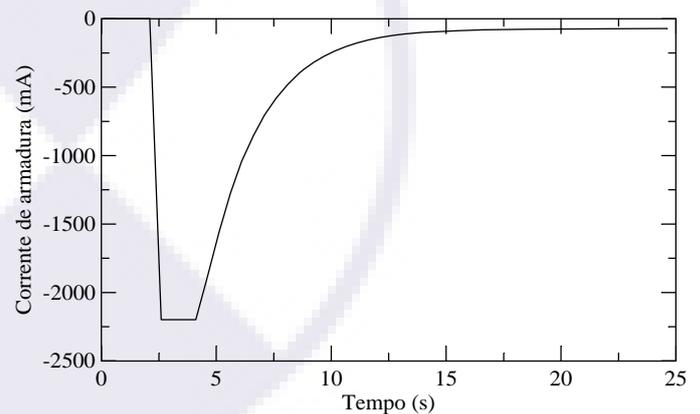


Fig. 11. Corrente de armadura da roda de reação para controle de velocidade da mesa.

O controle de posição angular foi realizado considerando-se um controlador PID, no qual o erro foi calculado pela diferença entre uma referência fornecida e o ângulo integrado das medidas do giroscópio (acumulação da velocidade angular). Considerou-se que as medidas do giroscópio também forneciam as próprias medidas do erro derivativo, enquanto que o erro integral foi fornecido pela adição do produto do erro proporcional pelo intervalo de discretização. Infelizmente, devido à ausência, na mesa, de um sensor que pudesse fornecer a posição angular, não foi possível estabelecer uma comparação com o erro real após o experimento, exceto confiar que as medidas providas pelo giroscópio fossem corretas no intervalo de tempo do teste. O ajuste dos ganhos foi realizado de forma a, novamente, se obter um comportamento superamortecido do erro, o que resultou em  $K_p = 0,04$  A<sup>o</sup>,  $K_d = 0,2$  As<sup>o</sup> e  $K_i = 0,0001$  A<sup>o</sup>s. Os resultados são mostrados nas Figuras 12 e 13, que apresentam, respectivamente, o ângulo da mesa e o sinal de controle. A referência adotada foi de 90°, e o controle é iniciado em  $t = 2$  s. Novamente o sinal de controle ultrapassou a região permitida e foi truncado para a faixa de  $\pm 2200$  mA. A Figura

14 mostra, por fim, a velocidade angular da roda neste intervalo de tempo. Nota-se que esta velocidade é nula no início e também após a estabilização na posição desejada. Uma vez que a roda possui uma região de inatividade próxima da velocidade nula (Figura 6), e que não foi considerada neste modelo de controle, então ela não consegue anular pequenos erros ao fim da manobra. Este erro pode, contudo, ser reduzido caso se empregue o controle com a roda operando inicialmente com velocidade não nula. De fato, em alguns testes realizados (não mostrados aqui), o desempenho mostrou-se melhor, do ponto de vista numérico, mas imperceptível do ponto de vista gráfico.

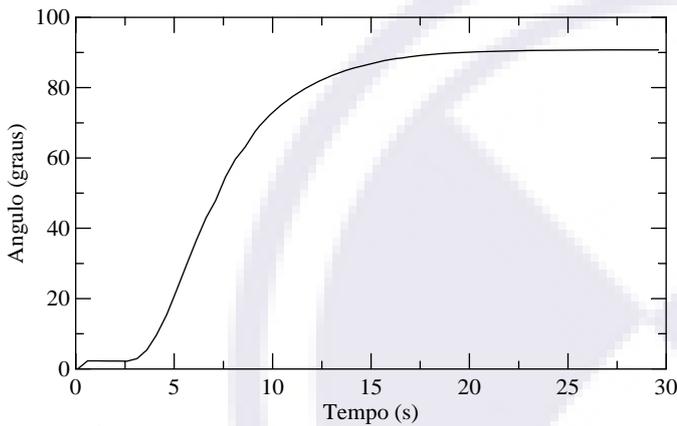


Fig. 12. Ângulo de rotação da mesa de mancal a ar no controle de posição.

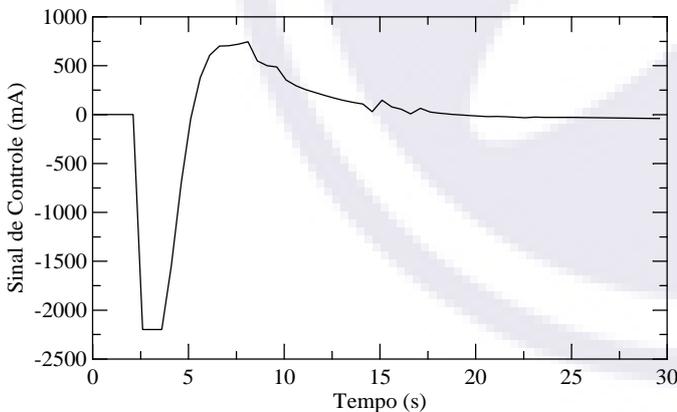


Fig. 13. Corrente de armadura (sinal de controle) da roda de reação no controle de posição angular da mesa.

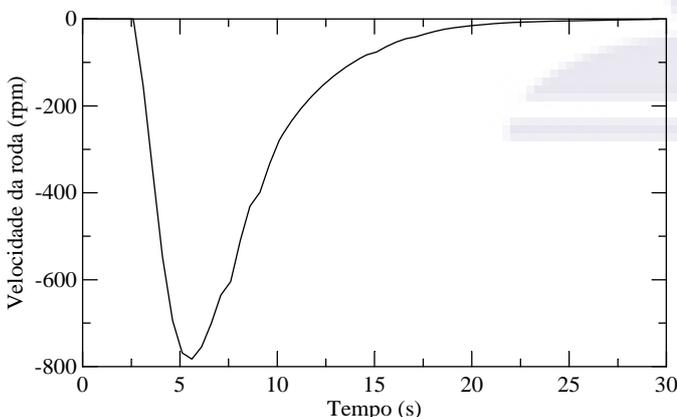


Fig. 14. Velocidade da roda de reação no controle de posição angular.

Os vídeos dos experimentos realizados com controle, além de outras fotos da montagem podem ser vistos em <http://www.dem.inpe.br/~val/projetos/rwexp/>.

## VIII. CONCLUSÕES

Implementou-se neste trabalho um experimento envolvendo uma mesa rotativa de mancal a ar, uma roda de reação e um giroscópio. As características e um modelo matemático tanto da mesa quanto do giroscópio foram estabelecidos, permitindo assim projetar um sistema de controle eficiente. Foi também estabelecido um procedimento para balanceamento e nivelamento da mesa que foi capaz de levá-la a um torque residual menor do que  $10^{-6}$  Nm em baixas velocidades de rotação, compatível com o ambiente espacial. Conseguiu-se também um bom modelo para o giroscópio, eliminando-se o efeito da rotação da Terra e do viés.

Os resultados mostraram-se compatíveis com o nível de precisão dos sensores e atuadores, embora possam ser melhorados com certeza. Implementou-se um programa em C para controle da velocidade angular da mesa, e um outro para controle do ângulo, usando exclusivamente o giroscópio como sensor. O erro final foi de  $0,01^\circ/s$  em velocidade e  $0,7^\circ$  em ângulo. Os próximos experimentos devem incluir:

- Um modelo para a curva de resposta da roda de reação.
- Um modelo matemático para a mesa que leve em conta efeitos de turbilhonamento do ar.
- Testes para determinar qual é a melhor pressão do ar comprimido a ser utilizada neste arranjo.
- Um codificador (*encoder*) para a mesa, para prover medidas angulares.
- Um controle ótimo com ganhos ajustados com base nos modelos matemáticos.

Visto ser este um dos primeiros experimentos desta natureza realizado no Brasil, acredita-se ter atingido o objetivo inicial de iniciar estudos que levem ao domínio da tecnologia de sistemas embarcados de controle de atitude em três eixos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Carrara, V.; Padilha, O. S.; Varotto, S. E. C.; Ricci, M. C. *Um experimento de teste da bobina de rotação do SCD2*. S. J. Campos, INPE, 1992 (INPE-5404-RPQ/658).
- [2] Cardieri, L. V. C.; Tu, C. C. C.; Fleury, A. T. *Mesa com mancais aerostáticos para simulação em um grau de liberdade de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais*. São José dos Campos, INPE, ago. 1987. (INPE-4272-PRE-1144).
- [3] Carrara, V.; Hassmann, C. H. G. An attitude simulator to support space missions. *6th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications*. São José do Rio Preto, May 2007.
- [4] Engelbrecht, J. A. A. *User's Manual for the SunSpace reaction wheel and gyroscope subsystem*. SunSpace, Matieland, South Africa, 2005. (SS01-106000).
- [5] Wertz, J. R. *Spacecraft attitude determination and control*. London, D. Reidel, 1978. (Astrophysics and Space Science Library).