



PRESIDENCIA DA REPUBLICA  
SECRETARIA DA CIENCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-5404-RPQ/658**

UM EXPERIMENTO DE TESTE DA BOBINA  
DE ROTAÇÃO DO SCD2

Valdemir Carrara  
Orlando Sanches Padilha  
Sebastião Eduardo C. Varotto  
Mário César Ricci



INPE  
São José dos Campos  
Maio de 1992

**Publicado por:**

**Divisão de Ensino e Documentação - DED**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

**Caixa Postal 515**

**12201 - São José dos Campos - SP - Brasil**

**Telex: 123.3530 INPE BR**

**Fone: (0123) 41.8977 - Ramal 324**

**Fax: 0123-21-8743**

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet un Austausch
- Pidese canje
- Просим обмена
- 歡迎著作交換
- 出版物交換のお願い

**Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.**

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5404-RPQ/658

UM EXPERIMENTO DE TESTE DA BOBINA  
DE ROTAÇÃO DO SCD2

Valdemir Carrara  
Orlando Sanches Padilha  
Sebastião Eduardo C. Varotto  
Mário César Ricci

INPE  
São José dos Campos  
Maio de 1992

629.7.062.2

CARRARA, V. et al.

Um experimento de teste da bobina de rotação do SCD2. / V. Carrara; O.S. Padilha; S.E.C.Varotto; M.C.Ricci. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 28p. -- (INPE-5404-RPQ/658).

1. Bobinas magnéticas, 2. Controle de atitude. I.Título.

## RESUMO

Este trabalho apresenta alguns resultados obtidos num experimento de teste da bobina de controle da velocidade de rotação do satélite SCD2 e sua eletrônica. Foram utilizados no experimento a mesa de mancal aerostático de um eixo, um magnetômetro, um girômetro para medição da velocidade angular da mesa, um sistema de telemetria para aquisição de dados, o sistema de potência, composto pela bateria e conversores, além, é claro, da bobina e sua eletrônica. Com isso conseguiu-se estimar o torque gerado pela bobina, a partir da análise do decaimento da velocidade de rotação da mesa. As curvas de decaimento, as equações e o modelo proposto para a determinação do torque, bem como os procedimentos de montagem e teste, são descritos neste trabalho. Mesmo tendo que estimar valores bastante pequenos de torque (da ordem de  $10^{-5}$  Nm), conseguiram-se resultados próximos dos valores teóricos.

## A TEST EXPERIMENT FOR THE SPIN PLANE MAGNETIC COIL OF THE SCD2

### ABSTRACT

Some results obtained from a test experiment of the SCD2 spin plane torque coil are presented in this work. The test was carried out in an aerostatic table with one degree of freedom, where were installed a magnetometer (to generate the coil control signal), a gyro package to sense the table's angular velocity, a telemetry system to transmit these data, a power supply (battery and converters), besides the coil and its electronics, responsible for generating the coil polarization current. By measuring the rotation decay of the aerostatic table in the situations: torque coil commanded in the same direction of the table angular velocity, in the opposite direction and turned off, it was possible to estimate the torque generated by the coil, regardless its small value, with good compliance with theory. This work shows also the equations used to model the experiment, its implementation in the aerostatic table and the decay curves of the angular velocity.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 O SISTEMA DE CONTROLE DE ROTAÇÃO DO SCD2	1
3 O EXPERIMENTO	8
4 RESULTADOS	10
5 CONCLUSÕES	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 O sistema de controle de rotação do SCD2.	3
2 Sinal de leitura do magnetômetro e comutação da bobina.	4
3 Sistema de eixos, direções do campo magnético e do momento magnético da bobina.	6
4 Foto do experimento.	9
5 Diagrama de blocos do experimento.	10
6 Decaimento da velocidade angular (sentido horário).	11
7 Decaimento da velocidade angular (sentido anti-horário).	12
8 Curvas de decaimento da velocidade da mesa (sentido horário).	14
9 Curvas de decaimento da velocidade da mesa (sentido anti-horário).	15



## 1 INTRODUÇÃO

O segundo satélite de coleta de dados da MECB (SCD2) terá sua atitude estabilizada por rotação, a uma velocidade de  $30 \pm 2$  rpm (Santana et al., 1989). Torques de corrente de Foucault, causados pela interação de um corpo condutor de eletricidade (o satélite) girando num campo magnético (campo geomagnético), reduzirão gradativamente a velocidade de rotação inicialmente prevista. Para manter esta velocidade dentro dos valores especificados para a missão, o satélite contará com duas bobinas magnéticas, orientadas em direções perpendiculares entre si, e com seus eixos contidos no plano equatorial do satélite. Tais bobinas serão comandadas a partir dos sinais de leitura do magnetômetro de bordo, após passar por uma eletrônica dedicada. A magnitude do torque de Foucault é da ordem de  $10^{-6}$  Nm, ao passo que o torque gerado pelas bobinas será da ordem de  $10^{-5}$  Nm. A dificuldade de medir torques pequenos e, conseqüentemente, testar o sistema de controle de rotação do SCD2 (bobinas, eletrônica e magnetômetro) motivou este trabalho. Além disso, este trabalho serviu de avaliação final da disciplina ANS-412-4, do curso de Mecânica Espacial e Controle do INPE, ministrado pelo Dr. Agenor de Toledo Fleury no 2º período de 1991.

## 2 O SISTEMA DE CONTROLE DE ROTAÇÃO DO SCD2

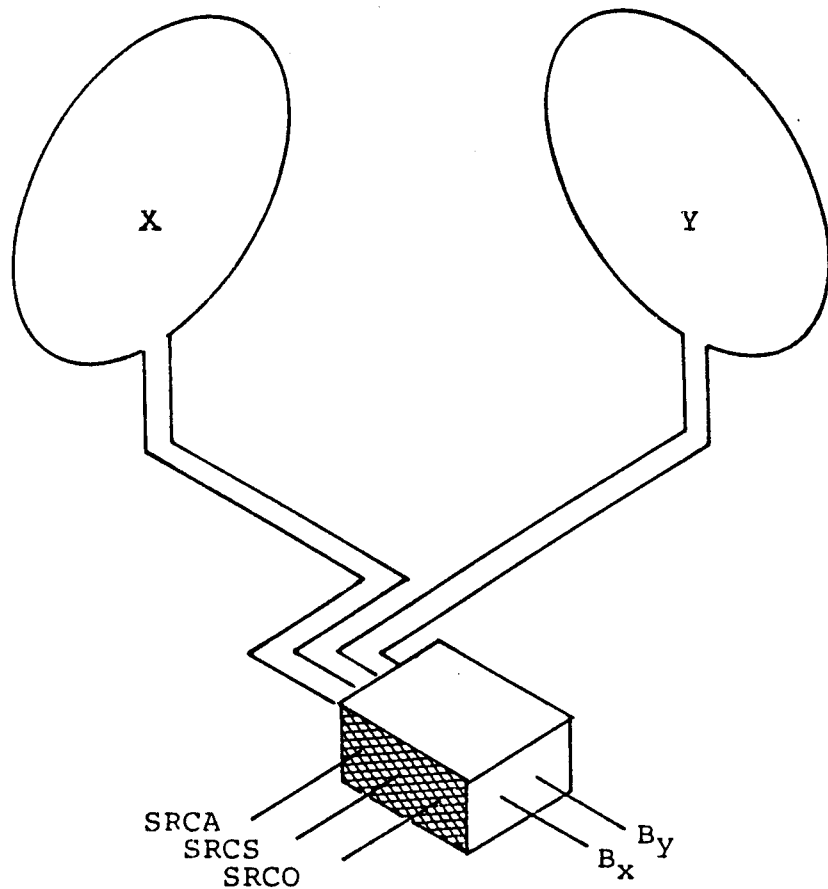
O satélite SCD2 será estabilizado por rotação, com o eixo de rotação alinhado ao pólo norte da eclíptica. Desta forma, o ângulo de aspecto solar (ângulo entre o eixo de rotação e a direção do Sol) ficará sempre próximo de 90 graus. Para manter a atitude dentro de valores previamente estabelecidos através de requisitos de missão, o sistema de controle de atitude contará com uma bobina de eixo com momento magnético de  $12 \text{ Am}^2$  para manobras de apontamento, duas bobinas de plano ou rotação de  $4 \text{ Am}^2$  cada uma (para aumentar ou diminuir a velocidade de rotação do satélite - Ferreira e Carrara, 1989) e um amortecedor de natação passivo. Como sensores, serão utilizados dois sensores solares digitais e um magnetômetro de três eixos.

A bobina de eixo será acionada por telecomando armazenado, sempre que o eixo de rotação se afastar cerca de 10 graus do pólo da eclíptica (Ferreira e Cruz, 1989). A manobra será finalizada quando o eixo de rotação formar um ângulo menor que 1 grau, com a direção da eclíptica. A frequência das manobras será aproximadamente de uma manobra a cada 30 dias, e a duração prevista de cada manobra será de 12 horas (Ferreira et al., 1989; Ferreira e Carrara, 1990).

As bobinas de rotação serão ativadas individualmente (são sistemas redundantes), para manter a velocidade dentro dos valores especificados para a missão, ou seja,  $30 \pm 2$  rpm. A velocidade de rotação será constantemente monitorada pelo computador de bordo, a partir das informações obtidas dos sensores solares. Ao atingir o patamar mínimo (28 rpm), o sistema de controle de rotação será acionado pelo computador (ou por um telecomando) e por ele será desativado quando a rotação atingir 32 rpm. O tempo necessário para acelerar o satélite é estimado em cerca de 8 horas. Torques ambientais causados pela interação do satélite com o campo magnético terrestre irão provocar novamente a queda da velocidade de rotação, devendo repetir o ciclo a cada 25 dias.

O sistema de controle de rotação é autônomo, isto é, não necessita de telecomandos para comutar a polaridade da bobina. A comutação é efetuada diretamente a partir de um processamento eletrônico dos sinais do magnetômetro de bordo. A Figura 1 esboça o sistema de controle de rotação deste satélite. Três telecomandos são previstos para o controle: um telecomando para ligar ou desligar o sistema, um para inverter o sentido de controle (aumentar ou diminuir a velocidade) e outro para comutar o acionamento para a bobina redundante.

As bobinas de rotação têm seus eixos no plano equatorial do satélite (plano X'Y'), os quais são perpendiculares entre si. A bobina X (com eixo alinhado ao eixo X' do satélite) é comutada a partir da leitura do eixo Y do magnetômetro, que mede a componente do campo magnético terrestre na direção Y'. A bobina Y, por sua vez, é comutada pelo sinal X do magnetômetro. Desta forma, as bobinas possuem sistemas independentes de controle, o que aumenta a confiabilidade do sistema como um todo. Além disso, a interferência na leitura do magnetômetro causada pelo campo magnético gerado pela bobina é minimizada, pois os eixos são perpendiculares entre si.



SRCA - SPIN RATE COIL ACTIVATION LINE  
 SRCS - SPIN RATE COIL SELECTOR X/Y  
 SRCO - SPIN RATE COIL OPERATION MODE

Fig. 1 - O sistema de controle de rotação do SCD2.

A Figura 2 indica como é processado o sinal do magnetômetro pela eletrônica dedicada. O magnetômetro coloca na saída um sinal analógico, proporcional ao valor do campo magnético externo, medido em uma dada direção. Devido à rotação do satélite, este sinal assume a forma de uma onda senoidal. A eletrônica transforma o sinal em uma polarização, de forma que quando o sinal do magnetômetro é positivo, a corrente na bobina assume a comutação positiva (ou

negativa, dependendo do sentido do incremento de velocidade), e vice-versa. Para evitar que a bobina seja acionada quando a magnitude do campo magnético for muito pequena, a comutação só é efetivada quando o sinal atinge um valor mínimo de 60 mGauss. Além disso, foram estabelecidos valores diferentes dos sinais para acionar e desligar a bobina, de forma a impedir que ocorressem oscilações durante as comutações da bobina devido a interferências no campo magnético causadas pelo próprio campo da bobina (realimentação). Portanto a bobina é ligada quando o módulo do sinal atinge o valor  $B_{on} = 120$  mGauss e desligada ao atingir  $B_{off} = 60$  mGauss, conforme indica a Figura 2. O sinal gerado pelo magnetômetro não está representado em sua escala verdadeira na Figura 2. Como exemplo, supôs-se que o valor de pico era igual a 400 mGauss; posteriormente foi normalizado.

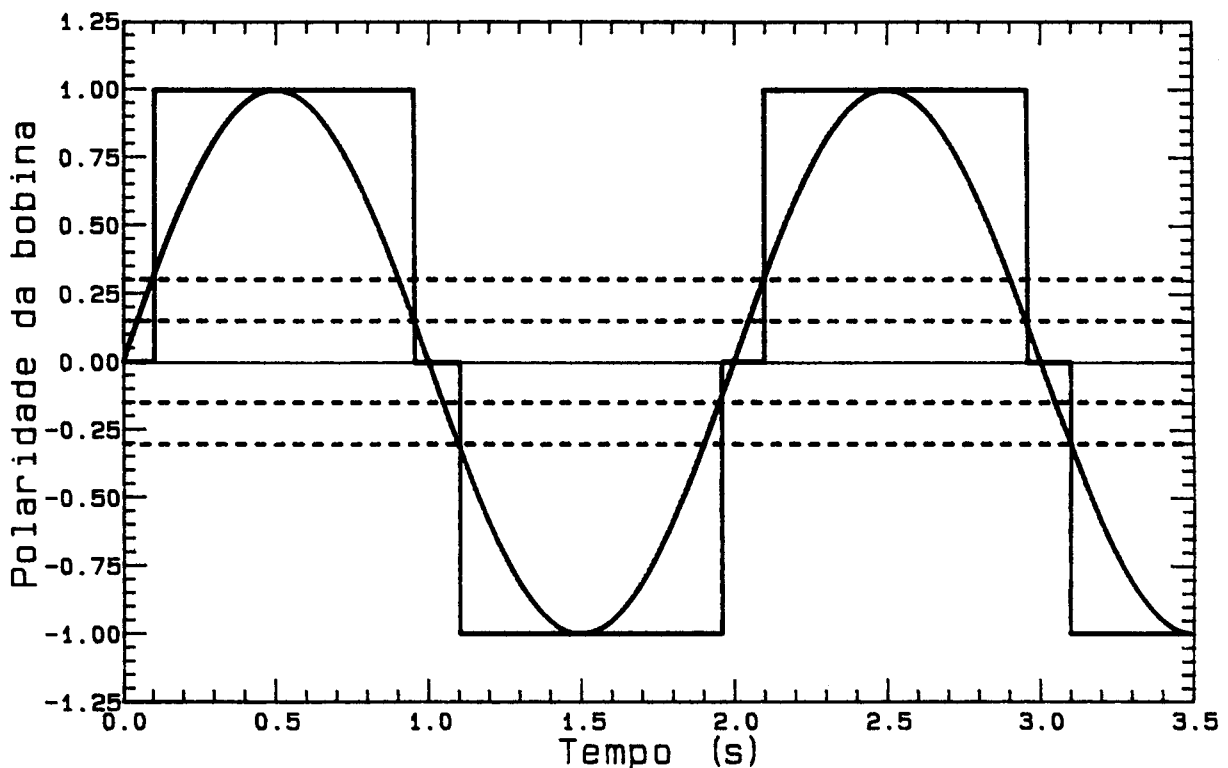


Fig. 2 - Sinal de leitura do magnetômetro e comutação da bobina.

O torque fornecido por uma bobina com momento magnético  $\vec{m}$  ( $\text{Am}^2$ ), imerso num campo magnético  $\vec{B}$  (Tesla), é dado pelo produto vetorial de  $\vec{m}$  e  $\vec{B}$ :

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Considere-se um sistema de coordenadas  $X'Y'Z'$  fixo no satélite, onde o eixo  $Z'$  coincide com o eixo de rotação do satélite, e o eixo  $X'$  coincide com a direção do momento magnético da bobina e com o sentido da polaridade positiva. Desta forma, o magnetômetro está alinhado ao eixo  $Y'$ . Seja ainda o sistema  $XYZ$ , onde o eixo  $Z$  coincide com  $Z'$ , e o eixo  $X$  aponta na direção da projeção do campo magnético no plano equatorial do satélite  $X'Y'$ , conforme a Figura 3. Assim, o sistema  $X'Y'Z'$  gira em torno do sistema  $XYZ$ , e o momento magnético pode ser expresso neste último sistema como:

$$\vec{m} = u m (\cos \omega t \hat{i} + \sin \omega t \hat{j}), \quad (2)$$

pois o momento da bobina está contido no plano  $XY$ . Nesta expressão,  $\omega$  é a velocidade angular do satélite;  $\hat{i}$  e  $\hat{j}$  são os versores unitários dos eixos  $X$  e  $Y$ , respectivamente; e  $u$  é o controle da polaridade da bobina, obtido do sinal processado do magnetômetro, que assume os valores  $+1$ ,  $-1$  e  $0$ . Para o controle desta bobina, utiliza-se o sinal da componente do magnetômetro na direção ortogonal ao momento da bobina,  $Y'$ , cuja direção no sistema  $XYZ$  é dada por:

$$\hat{p} = -\sin \omega t \hat{i} + \cos \omega t \hat{j}. \quad (3)$$

Desta forma, no instante inicial ( $t=0$ ), o momento da bobina está alinhado com o sentido positivo do eixo  $X'$ , enquanto o magnetômetro efetua uma leitura no sentido positivo do eixo  $Y'$ . Numa manobra de aumento da velocidade de rotação do satélite, leituras positivas do magnetômetro correspondem a valores positivos do controle, e vice-versa. Numa manobra de redução da velocidade, leituras positivas correspondem a valores negativos do controle. A outra bobina, alinhada ao eixo  $Y'$  e com polaridade positiva no sentido positivo de  $Y'$ , é comandada pelo sinal do magnetômetro em  $X'$ . Porém, ao contrário da bobina em  $X'$ , numa manobra de aceleração sua polaridade é positiva para valores negativos da leitura do campo. Como as bobinas constituem um sistema redundante entre si e

visto que não serão comandadas simultaneamente, a análise efetuada aqui, para a bobina X, também se aplica à outra bobina.

Considerando ainda que o campo magnético possua componentes  $B_x$  e  $B_z$  nas direções X e Z, respectivamente, a leitura do magnetômetro na direção  $Y'$  é dada pelo produto escalar de  $\hat{p}$  e  $\vec{B}$ :

$$\hat{p} \cdot \vec{B} = -B_x \sin \omega t. \quad (4)$$

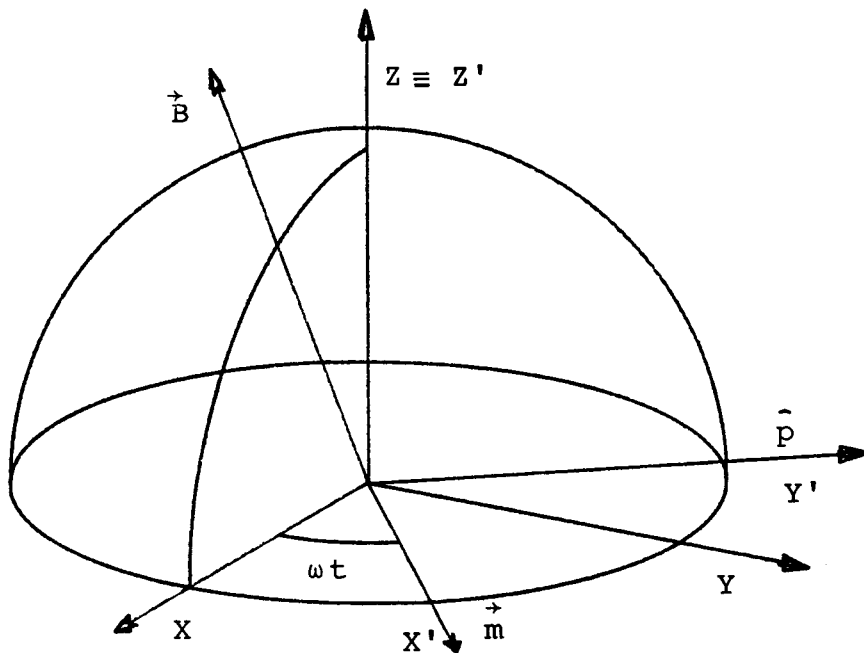


Fig. 3 - Sistema de eixos, direções do campo magnético terrestre e do momento magnético da bobina.

Neste caso, fazendo  $\theta = \omega t$ , os limites de acionamento da bobina, em módulo, são dados pelas expressões:

$$\theta_{\text{on}} = \arcsin B_{\text{on}}/B_x \quad (5)$$

e

$$\theta_{\text{off}} = \arcsin B_{\text{off}}/B_x. \quad (6)$$

Note que, quanto maior for o valor da componente do campo magnético no plano XY, menores serão os valores de  $\theta_{\text{on}}$  e  $\theta_{\text{off}}$ . O controle pode, portanto, ser colocado na forma indicada na Tabela 1.

TABELA 1 - POLARIDADE DA BOBINA

u	limites do ângulo $\theta$
0	$0 \leq \theta < \theta_{\text{on}}$
-1	$\theta_{\text{on}} \leq \theta < \pi - \theta_{\text{off}}$
0	$\pi - \theta_{\text{off}} \leq \theta < \pi + \theta_{\text{on}}$
+1	$\pi + \theta_{\text{on}} \leq \theta < 2\pi - \theta_{\text{off}}$
0	$2\pi - \theta_{\text{off}} \leq \theta < 2\pi$

Pode-se obter o torque médio atuante no satélite integrando o torque em uma revolução completa:

$$\bar{T}_m = \frac{m}{2\pi} \int_0^{2\pi} u (B_z \sin \theta \hat{i} - B_z \cos \theta \hat{j} - B_x \sin \theta \hat{k}) d\theta. \quad (7)$$

Substituindo os valores do controle u, tem-se:

$$\begin{aligned} \bar{T}_m = & -\frac{m}{2\pi} \int_{\theta_{\text{on}}}^{\pi - \theta_{\text{off}}} (B_z \sin \theta \hat{i} - B_z \cos \theta \hat{j} - B_x \sin \theta \hat{k}) d\theta + \\ & + \frac{m}{2\pi} \int_{\pi + \theta_{\text{on}}}^{2\pi - \theta_{\text{off}}} (B_z \sin \theta \hat{i} - B_z \cos \theta \hat{j} - B_x \sin \theta \hat{k}) d\theta, \end{aligned} \quad (8)$$

cujas componentes resultam em:

$$T_x = -\frac{m}{\pi} B_z (\cos \theta_{on} + \cos \theta_{off}), \quad (9)$$

$$T_y = -\frac{m}{\pi} B_z (\sin \theta_{on} - \sin \theta_{off}) \quad (10)$$

e

$$T_z = \frac{m}{\pi} B_x (\cos \theta_{on} + \cos \theta_{off}). \quad (11)$$

Note que este torque possui componentes nos eixos X, Y e Z. No entanto, a componente  $T_y$  é relativamente pequena, pois os valores de  $\theta_{on}$  e  $\theta_{off}$  são também pequenos. É importante salientar que este torque causa, além da esperada alteração do módulo da velocidade angular, uma mudança da atitude do satélite, devido à componente  $T_x$ . Durante uma manobra de aceleração, o eixo de rotação  $Z'$  do satélite irá se deslocar no sentido negativo do eixo X, até que as direções do campo magnético e do eixo de rotação se tornem ortogonais.

O torque máximo ocorre quando o campo magnético se encontra no plano XY, e, supondo uma magnitude do campo de 400 mGauss, tem-se um torque no eixo Z de aproximadamente  $5 \cdot 10^{-5}$  Nm.

### 3 O EXPERIMENTO

Para que o sistema de controle de rotação do SCD2 pudesse ser testado, idealizou-se um experimento utilizando a mesa de mancal aerostático (Cardieri, 1987; Cardieri et al, 1987). Na mesa foi montado o sistema de controle de rotação composto pelo magnetômetro e sua eletrônica, o qual envia o sinal da leitura do campo geomagnético para a eletrônica de comutação que, por sua vez, comanda a bobina. A alimentação dos equipamentos foi realizada pelo sistema de potência, composto pelo banco de baterias e por conversores DC/DC. Para medir a velocidade angular da mesa foi instalado um girômetro cujos sinais foram transmitidos pelo sistema de telemetria (Milani e Ribeiro, 1987). A aquisição destas medidas foi realizada pelo sistema de aquisição de dados, integrado com o receptor de telemetria e um microcomputador.



Com o intuito de minimizar a interferência de campos magnéticos espúrios na leitura do magnetômetro, optou-se, a princípio, pela construção de uma torre de alumínio no topo da qual seria fixado o magnetômetro. Medições efetuadas no local mostraram, contudo, que a interferência causada sobretudo pela própria mesa (cujo tampo giratório e base de fixação eram de material ferromagnético) era significativa mesmo na extremidade da torre. Partiu-se, então, para uma tentativa de eliminação dos materiais magnéticos que compunham o experimento. Para tanto, foram confeccionados dois novos tampos de alumínio, e o mancal foi apoiado numa base também de alumínio sobre uma mesa de madeira (Figura 4). Estes procedimentos mostraram ser suficientes para a eliminação quase completa dos campos magnéticos espúrios no experimento. Embora ainda houvesse um desvio do campo terrestre na região de interesse do experimento, garantiu-se, com as medidas já citadas, que este desvio se mantivesse constante, de forma a não comprometer os resultados. A Figura 5 ilustra a montagem efetuada.

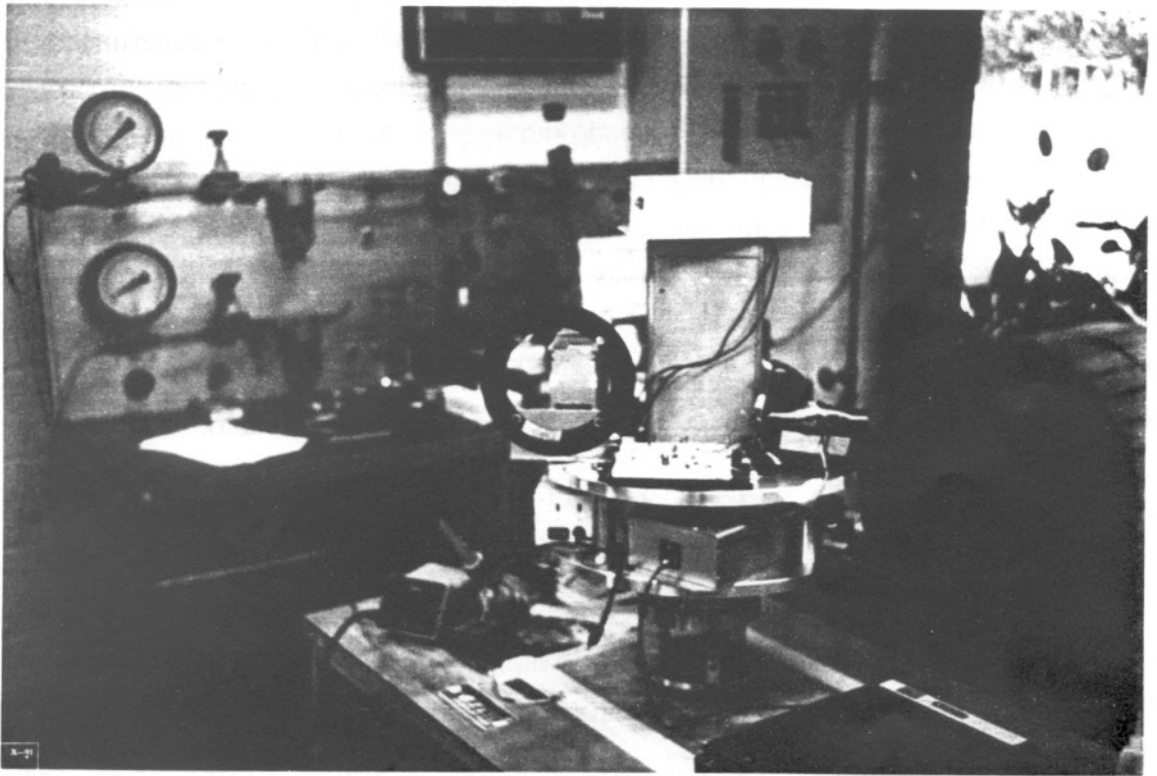


Fig. 4 - Foto do experimento.

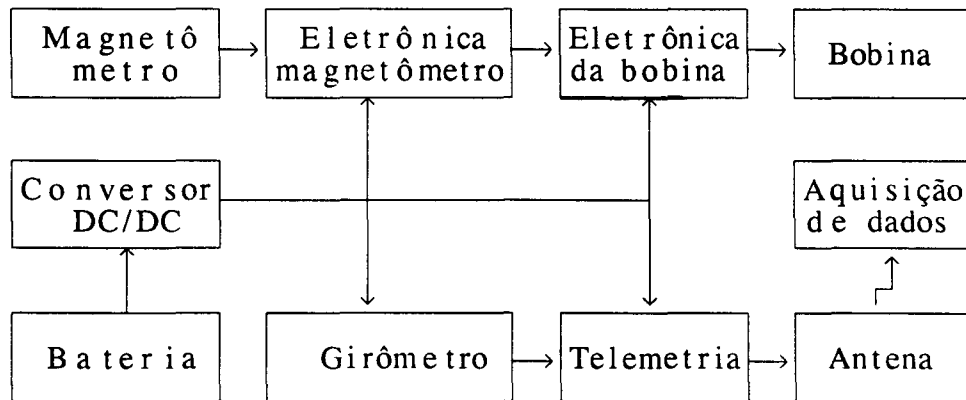


Fig. 5 - Diagrama de blocos do experimento.

Ainda assim, sabia-se que o torque de atrito da mesa de mancal aerostático seria da ordem de  $10^{-3}$  Nm para velocidades angulares moderadas e de  $10^{-4}$  Nm para velocidades baixas. Como o torque gerado pela bobina seria da ordem de  $10^{-5}$  Nm, o problema seria estimar um torque entre 10 e 100 vezes menor que o torque de atrito. No entanto, sob circunstâncias normais dentro do experimento, a velocidade de rotação da mesa de mancal aerostático decai segundo uma curva cujo perfil pode ser perfeitamente determinado no tempo. Neste caso, a introdução de um torque constante (causado pela bobina) irá modificar este perfil, de forma tal que se poderá estimar o valor do torque desde que se tenha um modelo para o decaimento da sua velocidade. As curvas de decaimento deveriam mostrar, como de fato mostraram, taxas de decaimento diferentes, caso as bobinas fossem comandadas para aumentar, diminuir ou não alterar a velocidade de rotação. De posse destas taxas de decaimento, o torque gerado pela bobina pôde ser estimado.

#### 4 RESULTADOS

Inicialmente, com a bobina desligada, efetuaram-se duas séries de medidas do decaimento da velocidade angular da mesa em função do tempo: uma com a mesa girando no sentido horário; a outra, no sentido anti-horário. A velocidade inicial imposta à mesa foi de  $33^\circ/\text{s}$ , aproximadamente, que corresponde ao valor máximo de leitura do girômetro. As curvas de decaimento são mostradas nas Figuras 6 e 7, em escala logarítmica. As oscilações na velocidade da mesa em baixas

rotações devem-se ao desbalanceamento na distribuição da massa dos equipamentos, aliado a um desnivelamento residual da própria mesa.

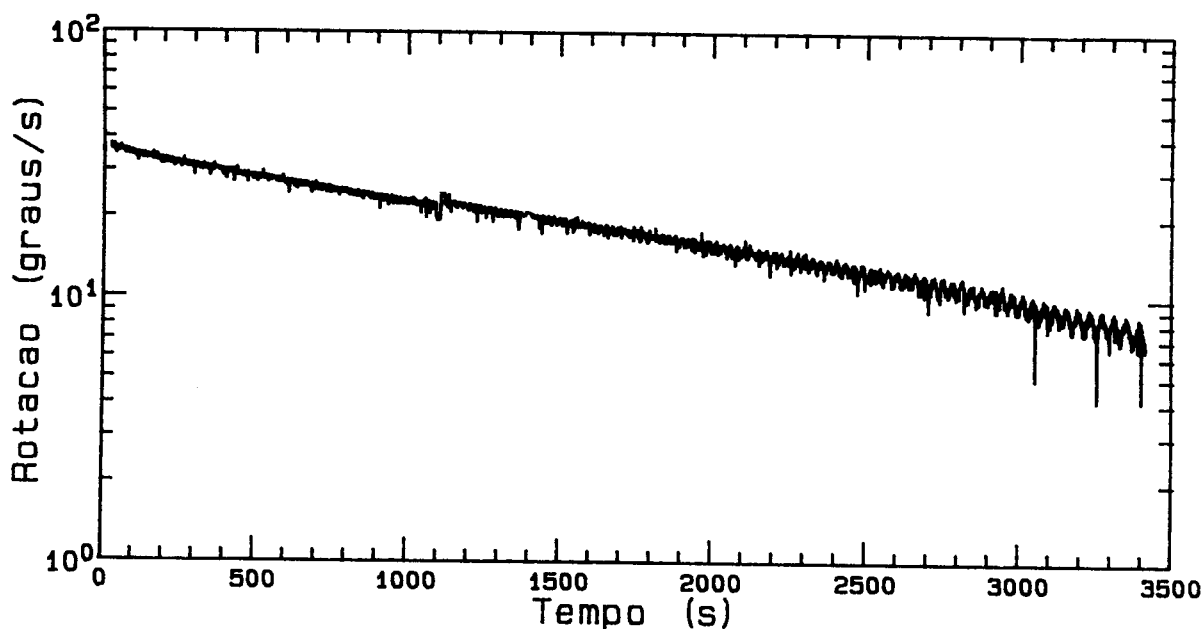


Fig. 6 - Decaimento da velocidade angular (sentido horário).

Nota-se claramente nas figuras que o decaimento é exponencial, o que sugere um torque de atrito  $T_{at}$  proporcional à velocidade angular na forma:

$$T_{at} = -k \omega, \quad (12)$$

o que gera uma dinâmica da mesa baseada na equação diferencial:

$$\dot{\omega} = -\lambda \omega, \quad (13)$$

onde a constante de decaimento da velocidade angular da mesa,  $\lambda$ , relaciona-se com o torque de atrito através da relação:

$$\lambda = k/I, \quad (14)$$

onde  $I$  é o momento de inércia da mesa em relação ao seu eixo de giro. Medições da massa da mesa e dos equipamentos nela instalados indicaram um momento de inércia de  $I = 0.8286 \text{ kg.m}^2$ , aproximadamente.

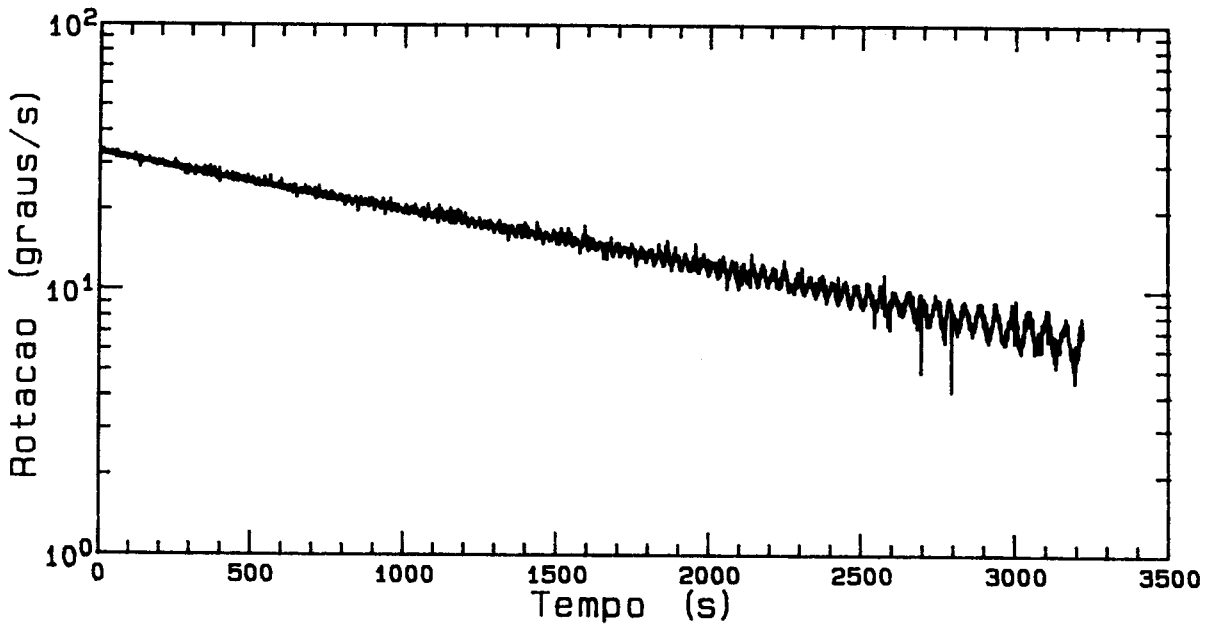


Fig. 7 - Decaimento da velocidade angular (sentido anti-horário).

Efetuuou-se, a seguir, um ajuste de mínimos quadrados para obter os valores de  $\lambda$  para rotações iniciais no sentido horário ( $\lambda_h$ ) e anti-horário ( $\lambda_a$ ), cujos resultados foram:

$$\lambda_h = 4.6055 \cdot 10^{-4}/s \quad (15)$$

e

$$\lambda_a = 5.0368 \cdot 10^{-4}/s. \quad (16)$$

Devido, porém, ao rápido descarregamento da bateria durante os testes, algumas vezes foi necessário interromper o experimento para efetuar a recarga desta. A retomada das medidas, entretanto, causou uma diferença abrupta

na velocidade de rotação pela impossibilidade de se ajustar corretamente a velocidade da mesa, próximo a 1100 segundos, como pode ser visto na Figura 6. Nestes casos, efetuou-se um ajuste por segmentos contínuos e tomou-se a média dos valores obtidos. O valor de  $\lambda_h$  foi calculado desta forma. De posse dos valores de  $\lambda$ , o torque de atrito pode ser obtido para  $\omega = 30^\circ/s$ :

$$T_{at} = 2.17 \cdot 10^{-4} \text{ Nm.} \quad (16)$$

Visto que o torque gerado pela bobina é constante (independe da velocidade de rotação da mesa), a equação diferencial completa resulta em:

$$\dot{\omega} = -\lambda \omega + T_z/I, \quad (17)$$

onde  $T_z$  é o torque gerado pela bobina. A solução desta equação diferencial é:

$$\omega = \left( \omega_0 - \frac{T_z}{\lambda I} \right) e^{-\lambda t} + \frac{T_z}{\lambda I} = a e^{-\lambda t} + c, \quad (18)$$

onde  $\omega_0$  é a velocidade de rotação inicial,  $T_z$  é o torque da bobina, e  $a$  e  $c$  são coeficientes a serem estimados. O torque, neste caso, pode ser obtido indiretamente, a partir do valor do coeficiente  $c$ :

$$T_z = \lambda I c. \quad (19)$$

A seguir, foram efetuadas novas medições, agora com a bobina ligada no sentido de aumentar a velocidade de rotação, num primeiro caso, e com a bobina ligada no sentido reverso, no outro. Em ambos os casos, foram medidas as velocidades de decaimento nos sentidos horário e anti-horário. Os resultados, juntamente com a velocidade de decaimento com a bobina desligada, podem ser visualizados nas Figuras 8 e 9. Os coeficientes  $a$  e  $c$ , ajustados através de mínimos quadrados, são mostrados na Tabela 2, assim como o torque da bobina, obtido pela Relação 19.

TABELA 2 - VALORES ESTIMADOS DOS COEFICIENTES

Sentido	Controle	$a$ °/s	$c$ °/s	$T_z$ Nm
Horário	Desligado	36.60	0.2134	-
	Acelerando	20.58	11.74	$7.82 \cdot 10^{-5}$
	Frenando	43.51	-6.726	$-4.48 \cdot 10^{-5}$
Anti-horário	Desligado	32.84	0.1904	-
	Acelerando	20.63	9.953	$7.25 \cdot 10^{-5}$
	Frenando	40.81	-7.648	$-5.57 \cdot 10^{-5}$

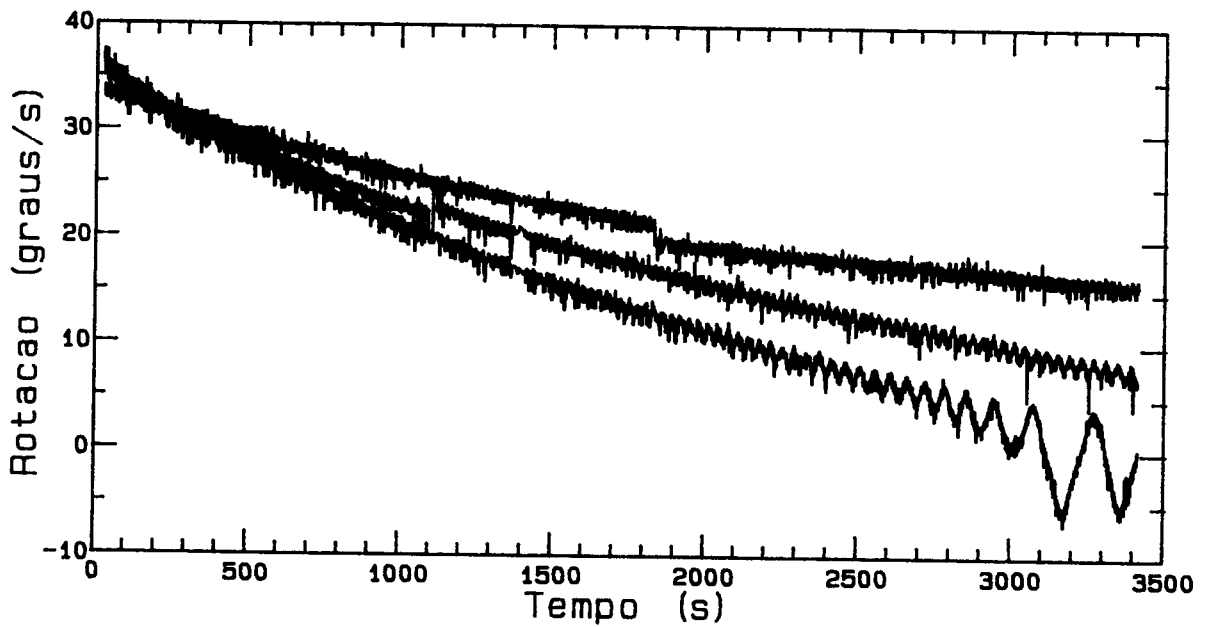


Fig. 8 - Curvas de decaimento da velocidade da mesa (sentido horário).

Percebe-se claramente que a estimativa do torque através da análise do decaimento da velocidade de rotação da mesa leva a erros de até 75% do seu valor. Isto se deve, em primeiro lugar, à ordem de grandeza dos torques estimados; em segundo lugar, a erros no modelo da curva de decaimento. Como acontece na maioria dos fenômenos que envolvem atrito viscoso, em baixas velocidades o torque de atrito da mesa não segue uma relação proporcional à velocidade de rotação, como foi suposto. Como somente as curvas com a bobina ligada no sentido de reduzir a velocidade da mesa atingiram baixas rotações, justifica-se, em parte, os valores relativamente baixos encontrados para o torque nestes casos.

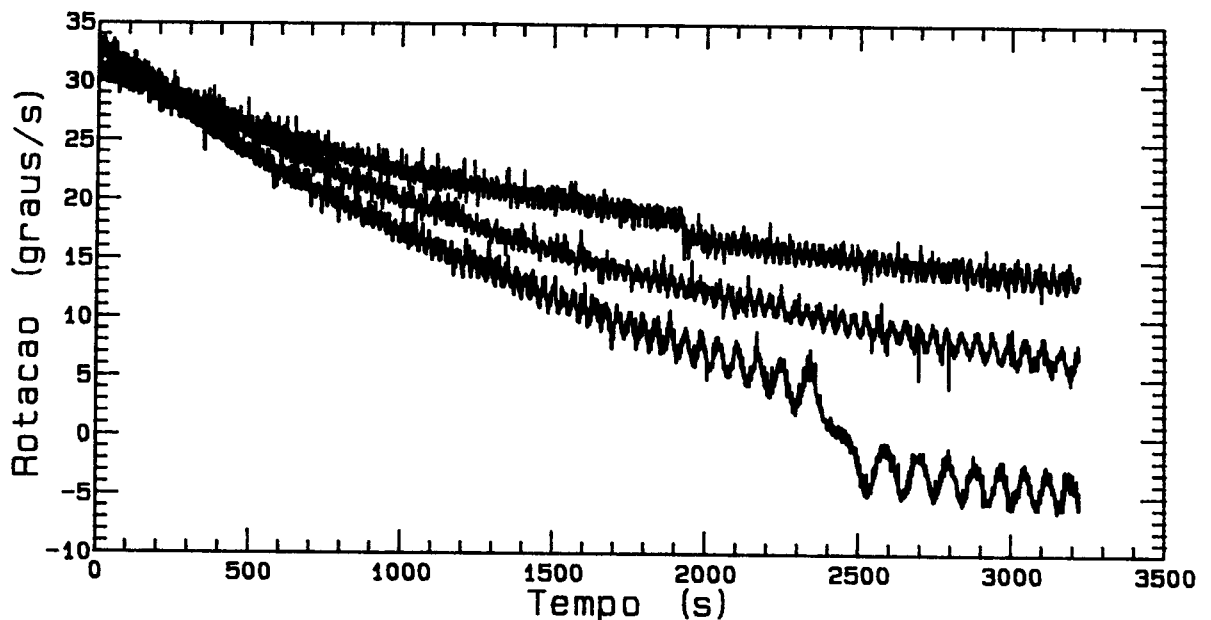


Fig. 9 - Curvas de decaimento da velocidade da mesa (sentido anti-horário).

Medições efetuadas no valor do campo magnético terrestre na região de interesse do experimento, mostraram um valor máximo de 320 mGauss. A componente média do campo no plano da mesa de mancal a ar resultou em  $B_x = 278$  mGauss, que, substituída nas Relações 5 e 6, fornece os valores dos ângulos de ativação da bobina:

$$\theta_{on} = \arcsin 120/B_x = 25^\circ \quad (20)$$

e

$$\theta_{off} = \arcsin 60/B_x = 12^\circ. \quad (21)$$

O torque pode ser obtido a partir da Equação 11:

$$T_z = \frac{m}{\pi} B_x (\cos \theta_{on} + \cos \theta_{off}) = 6.67 \cdot 10^{-5} \text{ Nm}. \quad (22)$$

Note que o torque, obtido desta forma, encontra-se bastante próximo dos valores mostrados na Tabela 2. Isto indica que, apesar da dificuldade de medir valores bastante pequenos de torque, as estimativas obtidas foram bastante confiáveis.

## 5 CONCLUSÕES

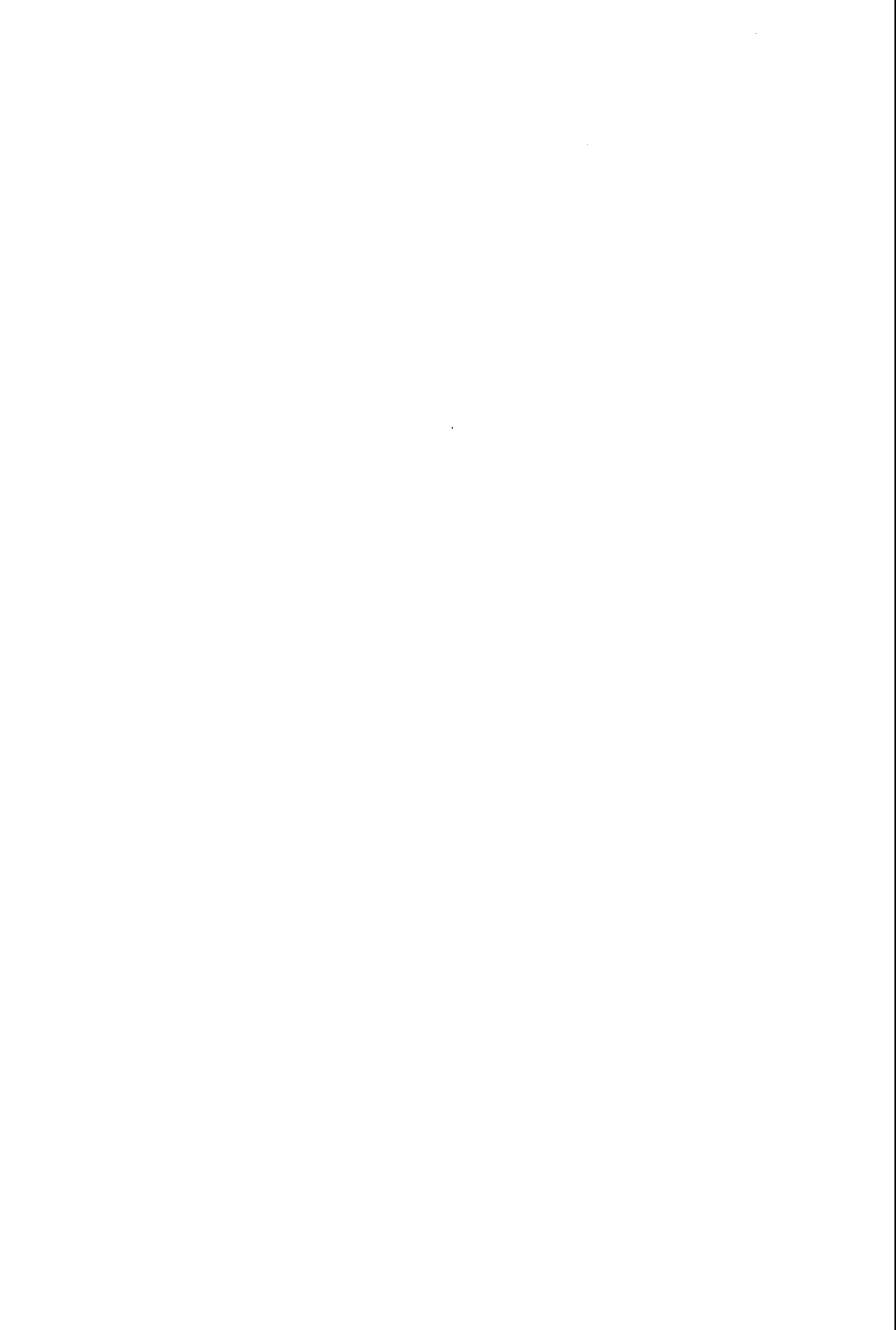
Embora estimando valores de torque da bobina bastante pequenos (da ordem de  $10^{-5}$  Nm), conseguiu-se, neste trabalho, testar e comparar os resultados teóricos com dados experimentais, obtendo boa concordância entre os valores.

As diversas flutuações, que implicaram uma degradação da precisão da medida, podem ser eliminadas através da adoção de técnicas mais refinadas. Por exemplo, o girômetro pode ser substituído por um codificador, que elimina o próprio girômetro e a telemetria da mesa de mancal a ar. Com isso, haveria também uma menor demanda de energia, e o experimento poderia ser realizado por um tempo maior que uma hora, com rotações iniciais bem superiores à utilizada (velocidade de rotação do SCD2 da ordem de  $180^\circ/\text{s}$ ). O desbalanceamento de massa e desnivelamento da mesa também poderiam ser reduzidos a níveis bem inferiores aos atuais. Desta forma, os resultados apresentariam oscilação bem menor em baixas rotações.

Finalmente, cabe observar que o momento magnético da bobina testada, de  $4 \text{ Am}^2$ , é relativamente pequeno. Caso fossem empregadas bobinas



maiores, o experimento forneceria resultados mais confiáveis, já que o torque gerado pela bobina, neste caso, seria bem maior quando comparado com o torque de atrito da mesa, para uma mesma velocidade de rotação. Um exemplo seria a bobina de núcleo desenvolvida pelo INPE, que possui momento magnético de  $10 \text{ Am}^2$ .



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardieri, L. V. C. *Mesa com mancais aerostáticos para simulação em um grau de liberdade de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais*. (Dissertação de mestrado) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, ago. 1987. (INPE-4320-TDL/287).
- 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).
- Ferreira, L. D. D.; Carrara, V. *Attitude control simulation of the data collecting satellite - SCD2*. São José dos Campos, INPE, out. 1990. (INPE-5159-PRE/1638).
- Ferreira, L. D. D.; Carrara, V. *Spin rate coil specification*. São José dos Campos, INPE, jun. 1989. (MECB-A-ETC-0079).
- Ferreira, L. D. D.; Carrara, V.; Padilha, O. S.; Ferraresi, V. A. *Attitude control subsystem preliminary design review - SCD2*. São José dos Campos, INPE, out. 1989. (MECB-A-REV-0082).
- Ferreira, L. D. D.; Cruz, J. J. *Attitude and spin rate control of a spinning satellite using geomagnetic field*. São José dos Campos, INPE, mar. 1989. (INPE-4803-PRE/1452).
- Milani, P. G.; Ribeiro, J. F. *Sistema de telemetria e telecomandos de baixo custo para medição remota de grandezas físicas*. São José dos Campos, INPE, ago. 1987. (INPE-4373-PRE/1145).
- Santana, C. E.; Carrara, V.; Ferreira, L. D. D. *SCD2 - Attitude control specification*. São José dos Campos, INPE, maio 1989. (MECB-A-ETC-0067).