

1. Publicação nº <i>INPE-2836-RPI/082</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto, 1983</i>	5. Distribuição <input checked="" type="checkbox"/> Interna <input type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC/DDO</i>	Programa <i>CONTAT</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>MOVIMENTO AMORTECIDO HISTERESE MAGNÉTICA AMORTECIMENTO MAGNÉTICO</i>			
7. C.D.U.: <i>629.7.062.2:629.783</i>			
8. Título <i>AMORTECIMENTO DOS MOVIMENTOS DE ATITUDE POR HISTERESE MAGNÉTICA DO SATÉLITE COLETA DE DADOS</i>		10. Páginas: <i>29</i>	
		11. Última página: <i>A.2</i>	
		12. Revisada por <i>Décio Castilho</i> <i>Décio Castilho Ceballos</i>	
9. Autoria <i>Roberto Vieira Martins Valdemir Carrara Paulo Donato Allemand Borges</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada Diretor Geral</i>	
Assinatura responsável <i>R.V. Martins</i>			
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho apresenta uma primeira análise do processo de redução da velocidade angular do satélite coleta de dados, durante a fase de pós-injeção em órbita, bem como a análise do amortecimento do movimento oscilatório na fase de captura por gradiente de gravidade. A dissipação de energia é proporcionada pela histerese resultante da iteração de barras de ferro-magnéticas com o campo magnético terrestre. Apresenta-se uma formulação simplificada que permite avaliar, com alguma precisão, os tempos necessários para a redução da rotação e amortecimento das oscilações. Adota-se uma configuração para o posicionamento das barras e estudam-se possíveis interações com outros subsistemas, bem como os tempos envolvidos no caso de falha na liberação do íoiô. Faz-se também um primeiro dimensionamento das barras e indicam-se suas principais características.</i>			
15. Observações			

ABSTRACT

This work presents a preliminary analysis of the procedure of reducing the angular velocity of the satellite for data collection during the post-launch phase, as well as of the procedure of damping the oscillatory motion during the phase of capture by gravity gradient. The energy dissipation is done by hysteresis through ferromagnetic bars. A simplified formulation, which permits to evaluate the times necessary for reducing the rotation and for damping the oscillations, with reasonable accuracy, is presented. A specific configuration for positioning the bars is adopted and the possible interactions with other sub-systems as well as the times involved in the case of the failure of yoyo release are studied. A preliminary dimensioning of the bars also is done and its principal characteristics are indicated.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	v
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - AMORTECIMENTO POR HISTERESE</u>	3
2.1 - O fenômeno de histerese magnética	3
2.2 - Amortecimento do movimento de rotação residual	6
2.3 - Amortecimento das librações	9
<u>CAPÍTULO 3 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES</u>	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
APÊNDICE A - POSICIONAMENTO E DIMENSÕES DAS BARRAS.	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Barra cilíndrica num campo magnético	3
2.2 - Curva de histerese (a) e torque na barra (b)	4
2.3 - Fixação das barras na face superior (a) e inferior (b)	7
2.4 - Oscilação de uma barra num campo magnético	10
2.5 - Movimentos oscilatórios do satélite	14
A.1 - Fixação das barras na estrutura do satélite	A.1

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O satélite coleta de dados da Missão Espacial Completa Brasileira terá um sistema de estabilização passivo por gradiente de gravidade. Tal sistema exige, para manter a precisão de apontamento do satélite (ângulo de rolamento ou de arfagem), que a velocidade angular em torno do eixo de simetria (guinada) do satélite tenha valores próximos de zero (Oliveira, 1982).

O problema do amortecimento desta rotação torna-se relevante sobretudo porque o último estágio do foguete lançador é estabilizado por rotação. Para posterior redução dessa rotação utiliza-se o sistema de frenagem por íoiô que, depois de sua atuação, deixa ainda o satélite com velocidade de rotação da ordem de 100 vezes superior aos valores requeridos pelas condições de estabilização e apontamento (Guizoni et alii, 1979).

Mantendo o sistema de frenagem da rotação residual também passivo, restam dois sistemas de referência absolutos (externos ao satélite): o gravitacional e o magnético, em relação aos quais o sistema de amortecimento pode funcionar dissipando energia cinética. Vários dispositivos complexos que utilizam partes móveis como braços articulados, ancoragem magnética, fluidos em recipientes fechados, etc., podem ser empregados neste caso (Huguier et Ricard, 1968).

Um dispositivo bastante simples utilizando a referência magnética foi empregado com êxito em satélites de baixa altitude. Trata-se de amortecimento por histerese magnética, usando barras ferromagnéticas. Este sistema não apresenta partes móveis e é extremamente simples. Constitui-se na implantação de barras cilíndricas longas, de permeabilidade magnética elevada, fixadas na estrutura do satélite.

Tal sistema de amortecimento foi utilizado com êxito em vários satélites como o TRANSIT-1B, TRANSIT-2A (Fischell, 1961) e os satélites franceses PEOLE e EOLE (Huguier, s.d.). Nos satélites TRANSIT-2A e PEOLE, o sistema de amortecimento substituiu com êxito o funcionamento deficiente do ioiô.

CAPÍTULO 2

AMORTECIMENTO POR HISTERESE

2.1 - O FENÔMENO DE HISTERESE MAGNÉTICA

Uma barra cilíndrica de material ferromagnético, girando em torno de um eixo perpendicular ao seu eixo de simetria (longitudinal) e imersa num campo magnético H_m (Figura 2.1), dissipa energia por um fenômeno conhecido como histerese magnética.

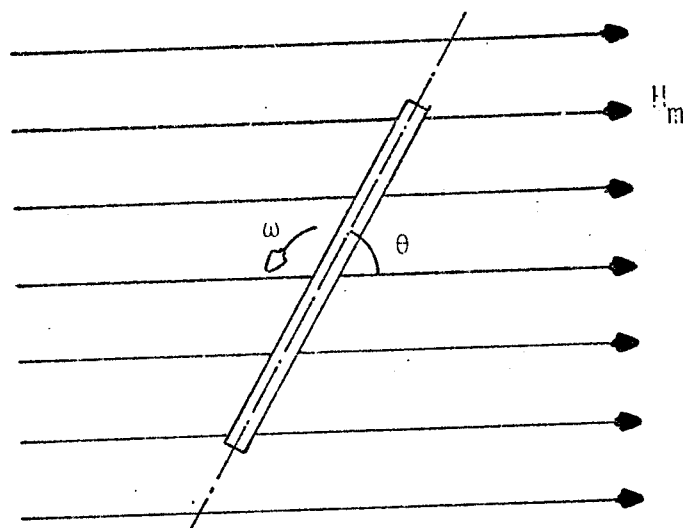


Fig. 2.1 - Barra cilíndrica num campo magnético.

Essa energia dissipada deriva-se de atritos entre os domínios magnéticos internos do material, que se magnetizam em direções diferentes à medida que a barra se move com relação ao campo externo. A magnetização de uma barra, no entanto, é muito mais forte no sentido de seu eixo longitudinal - em virtude da maior quantidade de material nesta direção - de forma que se pode considerar que apenas a componente do campo nesta direção induz a magnetização. Se a barra girar com velocidade de rotação ω uniforme com relação ao campo, então a componente na direção do eixo, H , terá uma variação senoidal com o tempo, na forma:

$$H = H_m \text{ sen}(\omega t) .$$

(2.1)

O fluxo magnético B no interior da barra é função de H e do sinal da sua variação, de forma que numa rotação da barra este fluxo descreve o ciclo de histerese, visto na Figura 2.2(a).

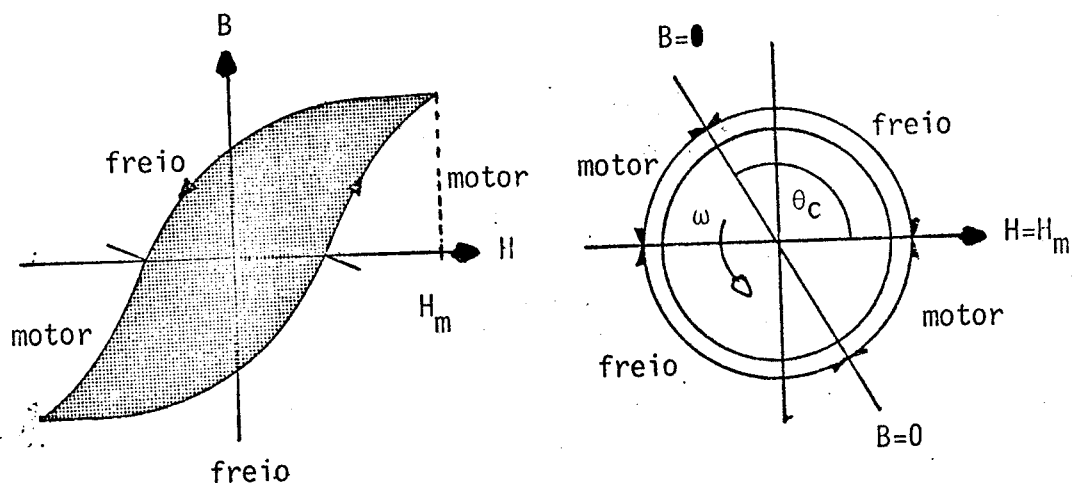


Fig. 2.2 - Curva de histerese (a) e torque na barra (b).

Numa rotação, a barra passa por regiões onde o torque a que fica sujeita (devido à interação de H_m com o campo induzido B) tem o mesmo sentido de ω e por outras em que tem sentido contrário. Em outras palavras, a barra passa por fases de frenagem e aceleração alternadamente. No entanto, as fases de frenagem são maiores e predominam sobre as fases de aceleração, caracterizando desta forma o fenómeno de dissipação da energia rotacional (Figura 2.2b).

A energia dissipada por unidade de volume da barra, por ciclo, é numericamente igual à área interna da curva de histerese da Figura 2.2a, ou seja:

$$\Delta E = \oint H dB .$$

(2.2)

A energia média dissipada por unidade de tempo através de uma barra que gira com velocidade angular ω num campo magnético uniforme \bar{e} é dada por:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = - \frac{V}{2\pi} \omega < \oint H dB > , \quad (2.3)$$

onde $< \oint H dB > \bar{e}$ é a energia média dissipada por ciclo e V é o volume da barra. O sinal negativo indica que a energia \bar{e} dissipativa, ou seja, diminui com o tempo.

Se, no entanto, houver mais de uma barra presente, cada uma delas irá deformar o campo externo na sua vizinhança, de forma que o conjunto irá dissipar menos energia que a soma de todas atuando separadamente. Este efeito é mais pronunciado quanto maior for o paralelismo das barras e quanto menor for a distância entre seus eixos. Essa diminuição da energia dissipada pode ser levada em conta multiplicando-a pelo coeficiente de separação σ ($\sigma \leq 1$), obtido analiticamente ou experimentalmente. Considerando então um conjunto formado de n barras com um coeficiente de separação σ , a energia dissipada por unidade de tempo fica:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = - \frac{\sigma n V}{2\pi} \omega < \oint H dB > . \quad (2.4)$$

Pode-se definir, de acordo com Fischell (1961), o coeficiente de amortecimento por histerese magnética:

$$k_h = \sigma n V < \oint H dB > . \quad (2.5)$$

O torque médio responsável por um decréscimo de energia ΔE num ciclo é dado por:

$$< T > = \frac{1}{\omega} \frac{\Delta E}{\Delta t} = - \frac{k_h}{2\pi} . \quad (2.6)$$

Nota-se que o torque devido à histerese não depende da velocidade angular ω e, desta forma, este tipo de torque consegue efetivamente parar o movimento de rotação do satélite com respeito ao campo externo. Por outro lado, este torque pode ser expresso como a variação da velocidade angular de um sólido, na forma:

$$T = I \frac{d\omega}{dt} . \quad (2.7)$$

Substituindo-se a equação acima na Relação 2.6 e integrando, resulta:

$$\omega = \omega_0 - \frac{k_h}{2\pi I} \Delta t . \quad (2.8)$$

Assim, o intervalo de tempo Δt , necessário para reduzir a velocidade angular de um valor inicial ω_0 para 0, vale:

$$\Delta t = \frac{2\pi I}{k_h} \omega_0 , \quad (2.9)$$

ou seja, o tempo requerido para parar a rotação é proporcional à velocidade angular inicial.

2.2 - AMORTECIMENTO DO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO RESIDUAL

Diversos são os fatores que influem no comportamento da curva de histerese, entre os mais significativos tem-se: natureza do material; razão L/D, onde L é o comprimento e D o diâmetro da barra; intensidade e faixa de variação do campo magnético externo.

Visto a necessidade de ter uma alta redução na velocidade angular do satélite com o menor peso de barras possível, torna-se claro que se deve escolher um material que apresente uma área de histerese elevada para os valores do campo magnético encontrados na órbita. O material proposto como o mais eficaz a 700 km de altitude (utilizado

nos satélites TRANSIT-1B e 2A - órbita polar) é o AEM 4750, uma liga de níquel e ferro, com composição nominal de 47,5% de Ni e 52,5% de Fe (Fischell, 1961).

A dissipação de energia, ou seja, a área da curva de histerese é proporcional ao volume da barra. No entanto, para um dado comprimento L da barra, um aumento no volume requer um aumento do diâmetro D , mas a razão L/D diminuindo, decresce também a área de histerese. Portanto, existe um compromisso entre L e D que otimiza a energia dissipada e o peso das barras sob determinadas condições. Porém, em vista dos poucos dados disponíveis a respeito do comportamento da área de histerese do material AEM 4750 com relação à razão L/D , será adotada aqui a mesma razão $L/D = 248$ utilizada no satélite TRANSIT 2A.

O comprimento das barras deve ser fixado inicialmente em função das dimensões do satélite. A fim de obter a máxima dissipação, deve-se adotar o máximo comprimento possível. Com isso, tem-se que $L = 0,84$ m, visto na Figura 2.3. Usando a relação L/D adotada, tem-se para D o valor 3,4 mm.

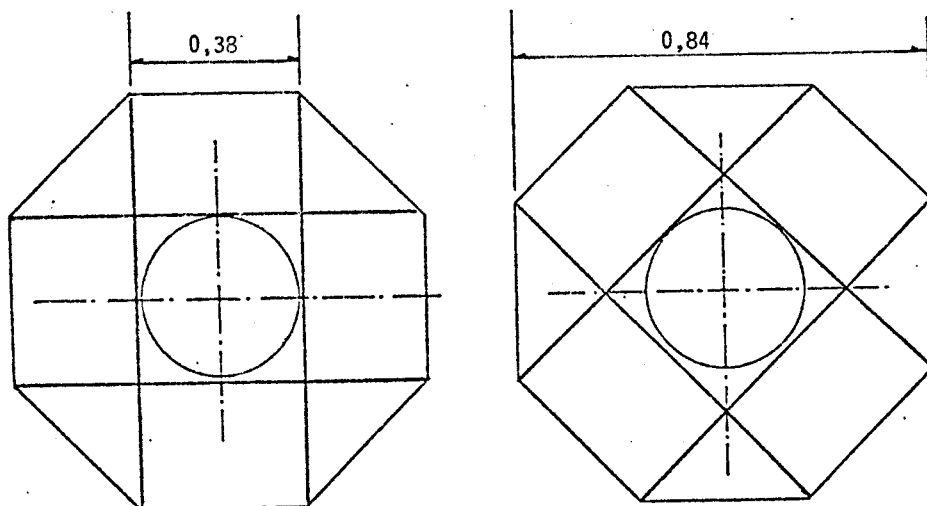


Fig. 2.3 - Fixação das barras na face superior (a) e inferior (b).

Num cálculo preliminar, verificou-se que para ter um tempo de amortecimento da ordem de 7 dias, seriam necessárias mais que 6 barras. Para manter simetria na montagem, será adotada a seguinte configuração: 4 barras (2 a 2 paralelas entre si) separadas de 0,38 m, fixadas na face superior do satélite e defasadas de 45° com relação às 4 barras fixadas na face inferior, que seguem a mesma montagem das superiores (Figura 2.3).

Para essa configuração de barras, com 38 cm separando as barras paralelas e 70 cm separando a face superior da inferior, o coeficiente de separação fica acima de 0,9 (Fischell, 1961). Nota-se que σ é igual a 1 quando as barras são perpendiculares, ou quando a distância entre elas for muito grande. Para ficar dentro de limites confiáveis de segurança, será considerado aqui $\sigma = 0,9$.

O valor da área de histerese é função do fluxo magnético terrestre, B, e portanto, será preciso obter o valor médio das componentes de B ao longo da órbita do satélite. O fluxo, por sua vez, depende da longitude terrestre do satélite, ou seja, da hora do dia. Além disso, como são o valor em módulo é relevante para os cálculos envolvidos, fez-se uma média do módulo de cada uma das três componentes ao longo da órbita em um dia completo. O sistema de referência adotada para a obtenção de B foi o sistema de coordenadas referente ao perigeu, pois a atitude do satélite é conhecida neste ponto (instante de injeção em órbita) e será mantida pela estabilização por rotação que o satélite terá nesta fase. Os valores médios para o fluxo nas direções radial, tangencial e normal ao plano orbital no perigeu resultaram, respectivamente:

$$B_r = 9,3 \mu T ,$$

$$B_t = 9,7 \mu T ,$$

$$B_n = 21,4 \mu T .$$

(2.10)

Nota-se, no entanto, que apenas as componentes normal e radial provocam o amortecimento por histerese, pois elas estão contidas no plano de rotação das barras. A média da soma destas duas componentes \bar{e} , em módulo, igual a $24 \mu T$. Com este valor do fluxo e adotando $L/D = 248$, encontra-se para a área da curva de histerese o valor $1,95 J/m^3$ (Fischell, 1961). Com isso, k_h resulta em:

$$k_h = 106,4 \times 10^{-6} J . \quad (2.11)$$

O momento de inércia do satélite com relação ao eixo de rotação \bar{I} é igual a $10 kg.m^2$. A velocidade de rotação do conjunto satélite - último estágio, após a injeção em órbita, deverá ser da ordem de 180 rpm. O ioiô deverá reduzir esta velocidade para cerca de 5 rpm em poucos segundos após ter sido acionado (Borges, no prelo). O tempo necessário para que as barras dissipem essa energia rotacional e anulem a velocidade angular do satélite será então:

$$\Delta t = \frac{2\pi I_0 \omega_0}{k_h} = 3,6 \text{ dias.} \quad (2.12)$$

No caso de falha do ioiô, as barras deverão reduzir a velocidade de rotação para que o satélite possa efetuar a extensão do mastro estabilizador. Se ω_0 for, no caso, igual à velocidade de injeção, ou seja, 180 rpm, o tempo máximo, considerando-se apenas o efeito de histerese, será de 130 dias, aproximadamente (ver conclusões).

2.3 - AMORTECIMENTO DAS LIBRAÇÕES

A fase seguinte, após ter cessado o movimento rotacional, é a extensão do mastro para promover a estabilização do satélite por gradiente de gravidade. O satélite deverá adquirir, então, uma velocidade angular de rotação igual à velocidade angular orbital (em módulo e sentido), a fim de garantir o apontamento das antenas. Desta forma, o satélite deverá oscilar em torno da posição de equilíbrio - vertical local - em virtude da atuação do torque de gradiente de gravidade e estabilizar-se nesta direção. Este movimento oscilatório (conhecido como

libração) será amortecido pelas barras ferro-magnéticas, instaladas nas faces laterais do satélite, auxiliadas pelas barras usadas no amortecimento da rotação residual. A introdução destas barras nas laterais faz-se necessária, pois apenas as anteriores não seriam capazes de efetuar o amortecimento rapidamente. Isto se deve à pequena área de histerese percorrida pelas barras num movimento de oscilação, dissipando, assim, pouca energia num ciclo.

Adotando 8 barras de $L = 0,66$ m e $D = 2,7$ mm, fixadas nas 8 faces laterais do satélite, encontrou-se um amortecimento de amplitude da ordem de 10^0 /dia; valor este coerente com o tempo total requerido para efetuar a estabilização. Existem dois casos a considerar, embora a formulação para ambos seja idêntica: movimento de oscilação em torno do eixo de rolamento do satélite e em torno do eixo de arfagem. Na realidade o movimento que o satélite realiza é uma composição destes dois modos de oscilação, mas, para fins de cálculo do tempo de amortecimento, pode-se analisá-los em separado.

Considera-se então uma barra oscilando num campo magnético, como mostrado na Figura 2.4.

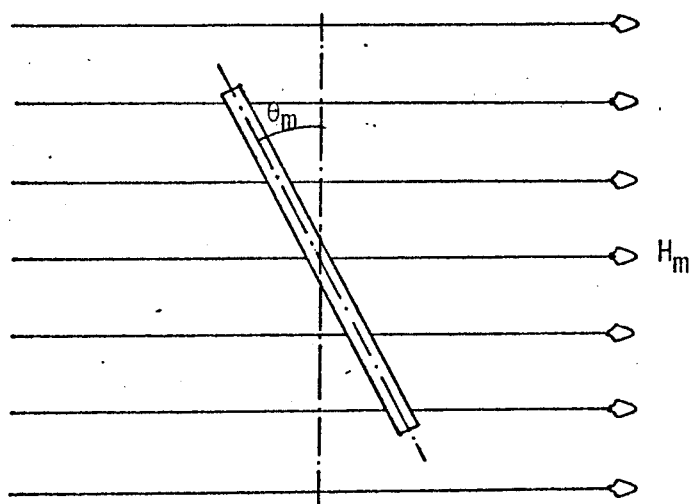


Fig. 2.4 - Oscilação de uma barra num campo magnético.

O campo magnético na direção do eixo longitudinal é dado por:

$$H = H_m \text{ sen } \theta , \quad (2.13)$$

onde:

$$\theta = \theta_m \text{ sen}(2\pi t/\tau) , \quad (2.14)$$

cujos valores máximos são $H_i = H_n \text{ sen } \theta_m$, sendo θ_m a amplitude e τ o período de oscilação, que, para um satélite com momentos de inércia $A \ll B = C$, vale:

$$\tau_r \cong \pi/\Omega \quad (2.15)$$

e

$$\tau_a \cong \frac{2\pi}{\Omega} \frac{\sqrt{3}}{3} , \quad (2.16)$$

onde τ_r é o período de oscilação no eixo de rolamento, τ_a no eixo de arfagem, e Ω a velocidade angular orbital do satélite (Oliveira, 1982).

A energia do movimento depende da oscilação considerada, se é em arfagem ou em rolamento, e vale para cada um desses casos, respectivamente (Oliveira, 1982):

$$E_a = \frac{3}{2} \Omega^2 (B - A) \theta_m^2 , \quad (2.17)$$

$$E_r = 2\Omega^2 (B - A) \theta_m^2 . \quad (2.18)$$

Pela Equação 2.6, a variação de energia é proporcional ao torque médio, ou seja:

$$\left[\frac{\Delta E}{\Delta t} \right]_{\text{ciclo}} = \omega \langle T \rangle . \quad (2.19)$$

Por outro lado, a variação de energia \bar{e} aproximadamente igual a:

$$\frac{\Delta E_a}{\Delta t} \cong 3\Omega^2(B-A)\theta_m \frac{\Delta\theta_m}{\Delta t} , \quad (2.20)$$

$$\frac{\Delta E_r}{\Delta t} \cong 4\Omega^2(B-A)\theta_m \frac{\Delta\theta_m}{\Delta t} . \quad (2.21)$$

O torque médio, no entanto, depende da área de histerese e, portanto, da amplitude de oscilação. Contudo, para pequenas oscilações em θ_m , pode-se considerar que a área de histerese \bar{e} é linear com H_i , da forma:

$$\langle \phi_{HdB} \rangle = \frac{d}{dH_i} \langle \phi_{HdB} \rangle \Big|_{H_i=0} H_i = D H_i , \quad (2.22)$$

sendo $d/dH_i \langle \phi_{HdB} \rangle \Big|_{H_i=0} \cong 18000 \mu T$ (Fischell, 1961). Ainda para pequenas oscilações ($\theta_m < 20^\circ$) também é válido:

$$H_i = H_m \theta_m . \quad (2.23)$$

Substituindo a Relação 2.23 na 2.22 e esta na 2.25, tem-se que:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = - \frac{\sigma n V}{\tau} D H_m \theta_m . \quad (2.24)$$

Iguando agora as Equações 2.24 e 2.20 na 2.21, encon-tra-se que:

$$\theta_f = \theta_i - \frac{\sigma n V D}{\Omega^2 (B - A)} \cdot \frac{H_m}{R_i} \Delta t , \quad (2.25)$$

onde θ_i é a amplitude de oscilação inicial e θ_f é a amplitude da oscilação após o intervalo de tempo Δt . A constante R_i vale, para oscilação em arfagem e rolamento, respectivamente:

$$R_a = \frac{2\pi}{\Omega} \sqrt{3} \approx 3,46 \pi / \Omega , \quad (2.26)$$

$$R_r = \frac{4\pi}{\Omega} = 4 \pi / \Omega . \quad (2.27)$$

O tempo necessário para cessar uma oscilação de amplitude, θ_i , será dado por:

$$\Delta t = \theta_i \frac{\Omega^2 (B - A)}{\sigma n V D H_m} \cdot R_i . \quad (2.28)$$

O campo externo, agora, deverá ser calculado de forma diferente da realizada no cálculo do amortecimento da rotação, pois o satélite se encontra oscilando em torno da vertical local. Deve-se obter, portanto, as componentes do fluxo magnético terrestre B em relação ao sistema orbital: radial, tangencial e normal ao plano orbital, no ponto em que se localiza o satélite. Os valores médios obtidos para B_r , B_t e B_n foram:

$$B_r = 12,3 \mu T ,$$

$$B_t = 6,1 \mu T ,$$

$$B_n = 21,4 \mu T .$$

(2.29)

A componente tangencial é responsável pelo amortecimento do movimento do satélite em torno do eixo de arfagem, enquanto a componente normal amortece esse movimento em torno do eixo de rolamento, con

forme a Figura 2.5. Neste caso, encontram-se, para o tempo necessário para amortecer uma oscilação com amplitude inicial $\theta_i = 20^\circ$, os seguintes valores, em arfagem e rolamento, respectivamente:

$$\Delta t_a = 6.2 \text{ dias ,}$$

$$(2.30)$$

$$\Delta t_r = 2.0 \text{ dias .}$$

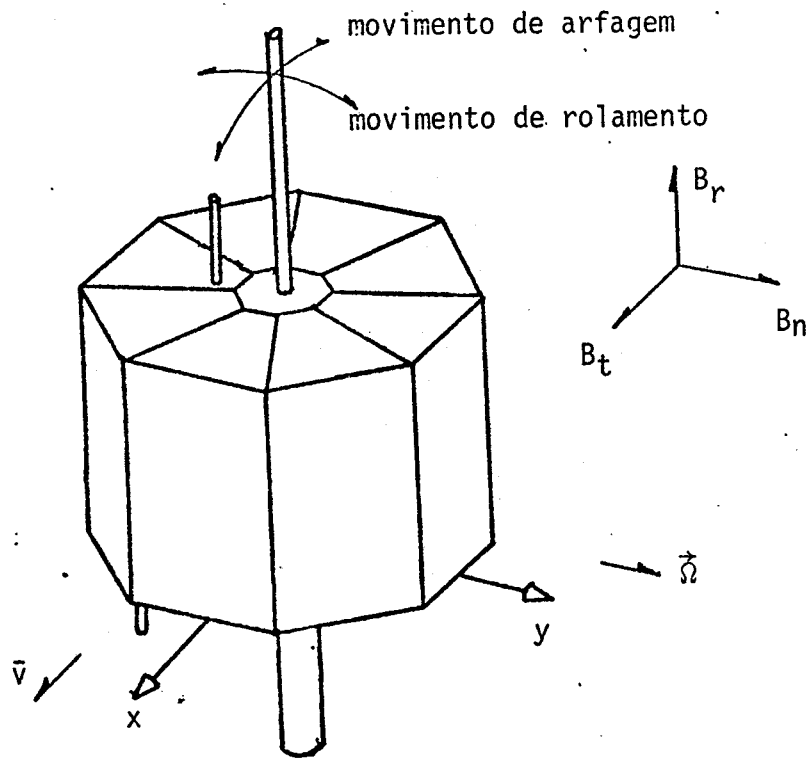


Fig. 2.5 - Movimentos oscilatórios do satélite.

Nestes cálculos não foi considerada a influência das 4 barras da face superior e das 4 da face inferior, pois como não estão todas na mesma direção, não se pode considerá-las em conjunto. Além disso, como o satélite não é estabilizado em torno do eixo de guinada, não existe uma direção preferencial para estas barras. Pode-se, no entanto, considerar que tanto no movimento em arfagem como no de rolamento atuam sempre 4 das 8 barras nas duas faces. Isto reduziria o tempo de

amortecimento em cerca de 40%, usando-se a componente radial do campo em ambos os modos de oscilação. Outro fato a ser considerado é que a componente radial desloca as curvas de histerese das barras laterais para valores fora da origem, ou seja, o campo H da Equação 2.13 tem uma componente em $\cos \theta$ (que não se anula em $\theta = 0$). Neste caso, pode-se considerar que a área de histerese é a mesma, caso de despreze esta componente de H, válido para pequenas oscilações, e assim sua influência é pequena (o mesmo ocorre com relação às barras nas faces e às componentes normal e tangencial).

Os cálculos efetuados não dispensam testes de laboratório e simulação em computador: a variação das componentes do campo magnético terrestre ao longo da órbita tem período da mesma magnitude das oscilações do satélite em torno dos eixos de rolamento e mesmo de arfagem, podendo com isso introduzir ressonância no sistema. Num estudo posterior, poder-se-á também estimar a ordem de grandeza dos momentos magnéticos residuais nas barras e calcular o desvio da posição de equilíbrio que estes momentos introduzem (Huguier et Ricard, 1968).

Uma última observação refere-se ao acoplamento existente entre os movimentos de rolamento e arfagem: uma oscilação em arfagem pura não induz a uma oscilação em rolamento, mas o inverso não é verdadeiro (Oliveira, 1982). Desta forma, não se pode analisar um movimento de rolamento sem considerar a arfagem. Além disso, uma melhor definição quanto à amplitude máxima de oscilação (considerada igual a 20° nos dois modos) irá caracterizar melhor o tempo de amortecimento.



CAPÍTULO 3

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A falta de mais dados referentes à curva de histerese para diversos materiais e dimensões das barras, bem como os ciclos que são percorridos quando o campo varia entre dois valores não-simétricos, leva à adoção dos poucos resultados disponíveis como se fossem genéricos e atuais. Testes laboratoriais são necessários não só para obter as curvas de diversos materiais (optando-se pelo melhor) como também para fornecer dados a uma simulação em computador.

O tempo necessário para amortecer os movimentos - cerca de 4 dias para remover a rotação e 6 dias para amortecer as oscilações - está maximizado. Outros efeitos como correntes de Foucault, tanto nas barras quanto na estrutura do satélite, ou pequenas bobinas que envolvem as barras (Fischell, 1961), podem reduzir este tempo significativamente, principalmente em altas rotações. No caso de falha do ioiô, por exemplo, considerando as correntes de Foucault apenas nas barras, reduz-se o tempo de 130 para 75 dias aproximadamente. Se houver bobinas com 100 voltas em torno de cada barra (das faces), este tempo torna-se 50 dias.

Outro fato a ser questionado é a possibilidade da direção de rotação do satélite não ficar alinhada com o eixo de rolamento ou não ficar no plano orbital quando, por exemplo, soltar-se o ioiô ou efetuar-se a separação do último estágio. No caso do eixo de rotação não coincidir com o eixo de rolamento (eixo do mastro), as barras laterais deverão contribuir com o amortecimento necessário. Caso a direção de rotação não esteja contida no plano orbital, as demais componentes do campo (tangencial e radial) deverão promover o amortecimento, mas num tempo certamente maior, pois a magnitude destas componentes é menor.

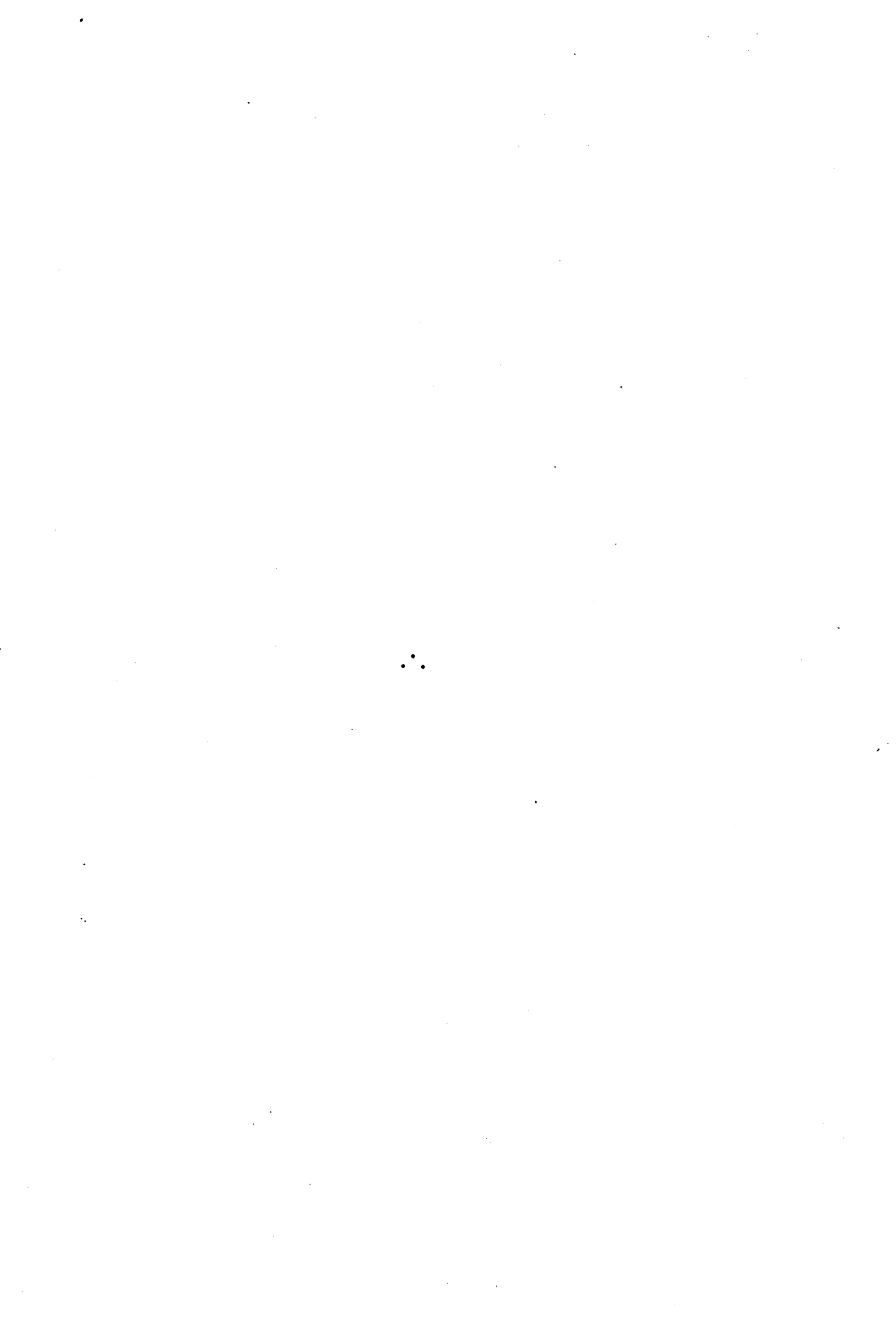
Esperiências mostraram que a curva de histerese é pouco dependente da temperatura, na faixa de -50 a 50°C (Reiter et alii, 1966), podendo ser ignorada a sua influência. É importante também salientar as possíveis influências do campo magnético das barras nos demais aparelhos do satélite, em especial nos magnetômetros, cuja saída pode ser afetada pela presença de materiais ferromagnéticos na sua vizinhança. De fato, no satélite EOLE (Huguier, s.d.) o magnetômetro empregado no sensor de atitude foi fixado no centro geométrico do prisma formado pelas barras, onde o efeito destas é menor. Cálculos simplificados indicaram que para a configuração proposta, no pior caso, as barras introduzem uma perturbação no campo magnético da Terra da ordem de 20% (no centro do satélite), não necessariamente na mesma direção do campo original. Outros locais de fixação do magnetômetro são desaconselháveis em virtude de uma maior distorção do campo.

A energia dissipada pelas barras em forma de calor é insignificante (da ordem de 10^{-3} watts), mesmo considerando-se os efeitos dissipativos de histerese, corrente de Foucault e bobinas enroladas nas barras (100 voltas), não necessitando, assim, de um sistema especial de controle térmico.

De qualquer forma, um sistema de amortecimento passivo, como é o caso, é mais simples e confiável do que um sistema ativo, e aplica-se com perfeição quando não se necessita de uma grande precisão de apontagem do satélite.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, P.D.A. *Análise de dinâmica da trajetória e da atitude de um veículo espacial na fase de injeção*. São José dos Campos, INPE, SP, Tese de Mestrado (no prelo).
- FISCHELL, R.E. Magnetic damping of the angular motions of Earth satellites. *ARS Journal*, Sep. 1961, 1210-1217.
- GHIZONI, C.C.; LINO, C.O.; BORGES, P.D.A.; GHIZONI FILHO, E. *Missão Espacial Completa. Estudo da viabilidade do satélite brasileiro, anexo 2, ante-projeto do satélite, capítulo IV, controle de atitude*. São José dos Campos, SP, Dez. 1979. (não disponível).
- HUGUIER, P. *Stabilization des satellites EOLE et PEOLE*. In: Attitude stabilization of satellites in orbit. AGARD, nº 45, s.d.
- HUGUIER, P.; RICARD, P. *Stabilisation par gradient de gravité et amortissement par hystérésis magnétique - Dimensionnement du système amortisseur*. In: Evolution d'attitude et stabilisation des satellites. Desgrandchamps, Paris, 1968.
- OLIVEIRA, J.R.F. *Estudo de vários aspectos da estabilização passiva de satélites por gradiente de gravidade*. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2400-TDL/088).
- REITER, G.S.; O'NEILL, J.P.; ALPES, J.R. *Magnetic hysteresis damping for gravity gradient stabilization*. In: NASA - Passive gravity gradient stabilization. Proceedings, Washington, 1966. (NASA SP-107).



APÊNDICE A

POSICIONAMENTO E DIMENSÕES DAS BARRAS

A Figura A.1 mostra a localização das barras fixadas na superfície interna do satélite. Suas características mais importantes são dadas abaixo.

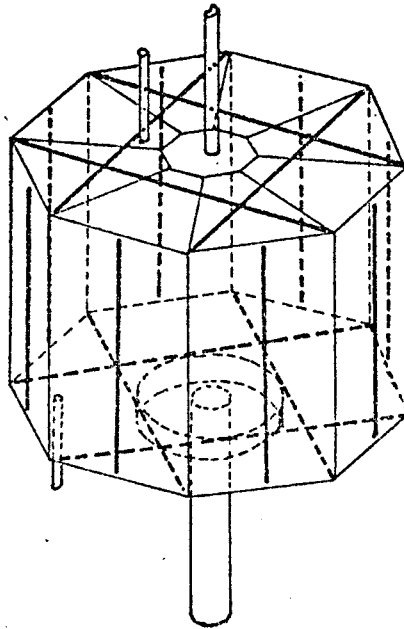


Fig. A.1 - Fixação das barras na estrutura do satélite.

Barras localizadas nas faces:

- comprimento e diâmetro

$$L = 840 \text{ mm} ,$$

$$D = 3,4 \text{ mm} ;$$

- volume

$$V = 7,58 \times 10^{-6} \text{ m}^3 ;$$

- número de barras
 $n = 8$ (4 superiores e 4 inferiores) ;

- material
AEM 4750 ;

- massa
 $m = 0,066$ kg ;

- momentos de inércia
 $I_z = 9,50 \times 10^{-8}$ kg.m² ,

$$I_y = I_x = 3,87 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2 .$$

Barras localizadas nas laterais:

- comprimento e diâmetro

$$L = 660 \text{ mm} ,$$

$$D = 2,7 \text{ mm} ;$$

- volume

$$V = 3,78 \times 10^{-6} \text{ m}^3 ;$$

- número de barras

$$n = 8 ;$$

- massa

$$m = 0,033 \text{ kg} ;$$

- momentos de inércia

$$I_z = 6,01 \times 10^{-8} \text{ kg.m}^2 ,$$

$$I_x = I_y = 1,20 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2 .$$

As barras podem ser seguras por presilhas fixadas na estrutura do satélite, mas outros tipos de fixações poderão ser analisados.