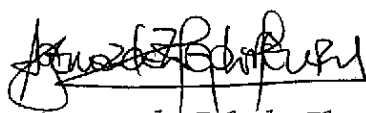
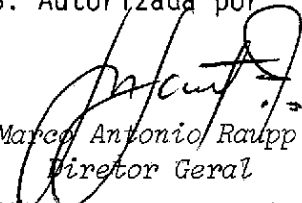


1. Publicação nº <i>1156</i> INPE-4284-PRE/ 1155	2. Versão	3. Data Agosto 1987	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem DMC	Programa AGA42 506435		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) MANCAL ESFÉRICO AEROSTÁTICO SIMULAÇÃO FÍSICA SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUDE			
7. C.D.U.: 629.7.062.2			
8. Título INPE-4284-PRE/1155 PROJETO DE UM SIMULADOR DINÂMICO COM MANCAL ESFÉRICO AEROSTÁTICO PARA TESTES DE SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE DE SATÉLITES ARTIFICIAIS		10. Páginas: 5	
		11. Última página: 4	
9. Autoria Luiz Victor Carone Cardieri Sebastião Eduardo Corsatto Varotto		12. Revisada por  Agenor de Toledo Fleury	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  Marco Antonio Raupp Diretor Geral	
14. Resumo/Notas O Simulador Dinâmico com Mancal Esférico Aerostático (SIDMEA) é usado para reproduzir com precisão o movimento com 3 graus de liberdade de satélites em torno de seus centros de massa. Este trabalho apresenta as principais características especificadas para este simulador e as soluções adotadas no seu projeto, com ênfase no dimensionamento do mancal. É também mostrada a configuração proposta para a execução de testes com um amortecedor de nutação, que é parte integrante do Sistema de Controle de Atitude do Satélite de Coleta de Dados da MECB.			
15. Observações Este trabalho será submetido no IX Congresso Brasileiro de Eng ^o Mecânica - COBEM/87, de 07 a 11 de Dezembro em Florianópolis Santa Catarina.			

SUMÁRIO

O Simulador Dinâmico com Mancal Esférico Aerostático (SIDMEA) é usado para reproduzir com precisão o movimento com 3 graus de liberdade de satélites em torno de seus centros de massa. Este trabalho apresenta as principais características especificadas para este simulador e as soluções adotadas no seu projeto, com ênfase no dimensionamento do mancal. É também mostrada a configuração proposta para a execução de testes com um amortecedor de nutação, que é parte integrante do Sistema de Controle de Atitude do Satélite de Coleta de Dados da MECB.

INTRODUÇÃO

Para desenvolver Sistemas de Controle de Atitude (SCAs) de satélites artificiais e seus componentes, são necessários meios de teste e simulações que reproduzam fisicamente [2], em laboratório, as condições cinemáticas e dinâmicas a que o satélite estará submetido durante a sua operação.

A simulação do movimento livre do satélite em torno de seu centro de massa em 3 graus de liberdade (rotações) é importante para conhecer a influência dos diversos elementos atuadores presentes na dinâmica do veículo. A reprodução deste movimento de torque livre em 3 graus de liberdade somente é possível através da utilização de simuladores dinâmicos de baixo atrito. O equipamento consagrado para esta aplicação é o Simulador Dinâmico com Mancal Esférico Aerostático (SIDMEA) [2], [6].

Este simulador está atualmente em fase de desenvolvimento no INPE, motivado principalmente pela necessidade de execução de testes funcionais em um dos componentes do SCA do Satélite de Coleta de Dados da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Este componente é denominado amortecedor de nutação e atua amortecendo o movimento de precessão do satélite após a separação do último estágio do veículo lançador.

Este trabalho apresenta as principais características especificadas para um SIDMEA, com base nos requisitos de desempenho previstos para os SCAs da MECB [1]. A seguir, é apresentada uma síntese da solução adotada para o projeto deste simulador, enfatizando o dimensionamento do mancal esférico aerostático (MEA). Por fim, apresenta-se a configuração adotada para a execução do teste funcional com o amortecedor de nutação.

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de projetar e construir uma "plataforma" que suporte um modelo físico de um SCA, reproduzindo as condições encontradas em órbita, será abordada na forma de entradas e saídas esperadas para que se possa visualizar com maior clareza as condições de contorno que limitam a solução.

Entradas. São as seguintes:

- carga útil de aproximadamente 1000 N;
- equipamentos que necessitam de um plano preciso de referência para montagem;
- equipamentos que necessitam de movimentação com 3 graus de liberdade em rotação; em torno da direção vertical a movimentação deve ser livre (360°);

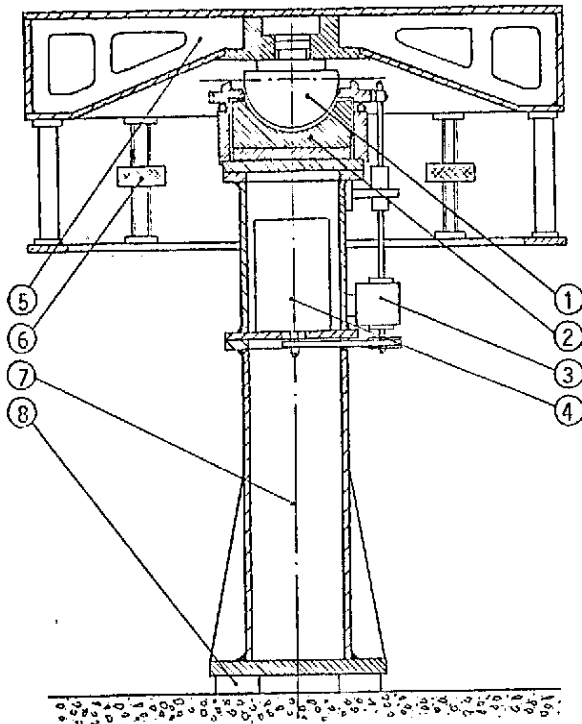
- equipamentos que necessitam de uma velocidade angular até aproximadamente 200 rpm, a qual deve ser previamente imposta à plataforma;
- atuadores que promovem a troca de quantidade de movimento com a plataforma;
- energia suficiente para as simulações e testes previstos, fornecida em níveis estabilizados, sem contato físico entre plataforma e laboratório;
- sinais provenientes de referências celestes simuladas;
- sinais de comando para alguns equipamentos, enviados do laboratório sem qualquer vínculo físico com a plataforma;
- desbalanceamentos estáticos e dinâmicos;
- vibrações e choques provenientes da vizinhança;

Saídas. São as seguintes:

- plataforma suportada por um mancal com 3 graus de liberdade de movimentação, com as seguintes características:
 - possibilidade de fixação rígida dos equipamentos;
 - plano de referência com planicidade melhor que 0,05 mm;
 - capacidade de sustentação de uma carga útil variável maior que 1000 N;
 - rigidez na direção vertical maior que 2×10^7 N/m e lateral maior que 10^7 N/m, ambos para uma carga vertical de 800N;
 - torque perturbador total menor que 10^{-4} N.m em todas as direções;
 - capacidade de balanceamento estático de maneira rápida e precisa;
 - nível de vibração menor que 10^{-2} g, em todas as direções;
- sinais que permitam avaliar o desempenho do SCA utilizado, enviados da plataforma sem qualquer ligação física;
- estabilidade estrutural da base do simulador, conseguida através de massa sísmica;
- medida da velocidade angular da plataforma, obtida sem contato mecânico.

SOLUÇÃO ADOTADA PARA O SIMULADOR DINÂMICO

O ponto crítico do problema formulado é, sem dúvida, o desempenho do mancal. Desta forma, a escolha e o dimensionamento deste mancal devem ser bastante cuidadosos. Analisando as características especificadas para a movimentação da plataforma, conclui-se que o tipo de mancal mais adequado para esta aplicação é o mancal esférico aerostático (MEA). Este mancal é composto de duas partes principais: uma calota esférica fixa, por onde é feita a alimentação do fluido pressurizado, e uma esfera móvel na qual se prende a plataforma (Figura 1).



- 1- Parte móvel do mancal (esfera)
- 2- Parte fixa do mancal (calota)
- 3- Embreagem e freio eletromagnéticos
- 4- Motor cc
- 5- Plataforma
- 6- Massas de balanço
- 7- Estrutura do simulador
- 8- Sistema de nivelamento

Fig. 1 Esquema do Simulador Dinâmico com MEA.

Um outro aspecto importante a ser considerado no encaminhamento da solução é o projeto da plataforma que dará sustentação e rigidez estrutural aos modelos de SCA testados. As dimensões desta plataforma devem proporcionar uma boa relação entre o peso próprio, o momento de inércia, a área disponível para fixação de equipamentos e a rigidez estrutural. O diâmetro selecionado foi 900 mm e a altura da borda 160 mm, o que resulta em uma massa de aproximadamente 61 kg (Figura 1).

Para prover a capacidade de simular SCA de satélites estabilizados por rotação, projetou-se um sistema de motorização que permite impor à plataforma uma rotação previamente estabelecida até 200 rpm. Este conjunto é composto de um motor c.c. de 0,3 cv com variador estático de velocidade, transmissão por correias sincronizadas, embreagem e freio eletromagnéticos, acoplamento elástico e um par de engrenagens (Figura 1). Para separar as superfícies do mancal de forma a permitir que se imprima à plataforma a velocidade angular desejada, idealizou-se um sistema de elevação composto de dois cilindros pneumáticos de dupla ação, uma rosca de movimento trapezoidal, articulações e um mancal axial de pista de arame.

O projeto é completado com uma estrutura de sustentação que permite a montagem modular dos sistemas descritos acima, bem como sua manutenção. Na base desta estrutura são colocados 3 conjuntos de ajuste que promovem o nivelamento da parte fixa do simulador.

DIMENSIONAMENTO DO MANCAL

O mancal esférico aerostático (MEA) não é de uso comum na Engenharia. Portanto, os procedimentos usados no seu dimensionamento não são facilmente encontrados na literatura. No entanto, através de experiências anteriores em mancais aerostáticos radiais e axiais [1], [5], atingiu-se uma razoável confiabilidade no cálculo desses mancais. Dessa forma, optou-se por criar um método de equivalência entre mancais aerostáticos axiais e esféricos para facilitar o dimensionamento do MEA. A equivalência entre os mancais é extensível às hipóteses admitidas para a modelagem do escoamento, o que faz com que as equações sejam modificadas somente devido à geometria.

Vazão e Queda de Pressão para um Mancal Esférico Alimentado por um Orifício Central. Utilizando as mesmas hipóteses efetuadas em [4] e [7] no cálculo de um mancal axial, pode-se integrar a equação de Navier-Stokes [4] e obter a expressão da vazão em função da queda de pressão para um mancal alimentado através de um orifício central (Figura 2). Essa expressão é dada por:

$$\dot{m} = - \frac{\pi h^3 P \sin \theta}{6 \mu R T \cos \theta} \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

onde $\dot{m}$ é a vazão em massa no mancal, h é a folga entre as superfícies, P é a pressão no mancal, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, R é a constante do fluido e T é a temperatura do fluido.

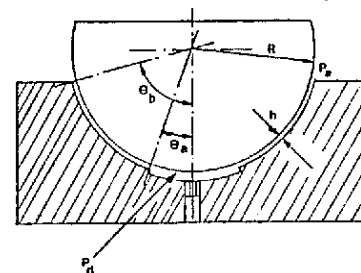


Fig. 2 Esquema de um mancal esférico com alimentação central.

Separando as variáveis e integrando a expressão 1 de θ_a a θ_b , obtém-se:

$$P_d^2 - P_a^2 = \frac{12 \mu \dot{m} R T}{\pi h^3} \ln \left(\frac{\sin \theta_b}{\sin \theta_a} \right), \quad (2)$$

onde P_d é a pressão na saída do orifício de alimentação e P_a é a pressão atmosférica.

Vazão e Queda de Pressão para um Mancal Esférico Alimentado por um Anel de Orifícios. A vazão é calculada da mesma forma mostrada anteriormente, considerando que o fluxo se divide ao sair do orifício. A vazão em massa $\dot{m}_1$ representa o fluxo para fora do mancal, enquanto $\dot{m}_2$ é a vazão em massa para dentro do mancal. A Figura 3 mostra esta geometria. Assim, tem-se:

$$\dot{m}_1 = \frac{\pi h^3 (P_d^2 - P_a^2)}{12 \mu R T \ln \left(\frac{\sin \theta_b}{\sin \theta_c} \right)}, \quad (3)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\pi h^3 (P_d^2 - P_a^2)}{12 \mu R T \ln \left(\frac{\sin \theta_c}{\sin \theta_a} \right)}. \quad (4)$$

Para que as vazões $\dot{m}_1$ e $\dot{m}_2$ sejam iguais, tem-se a seguinte relação geométrica:

$$\sin \theta_c = (\sin \theta_a \cdot \sin \theta_b)^{1/2} \quad (5)$$

Relações para Equivalência. As relações entre as principais dimensões dos mancais axial e esférico, visando a equivalência no dimensionamento, são apresentadas a seguir.

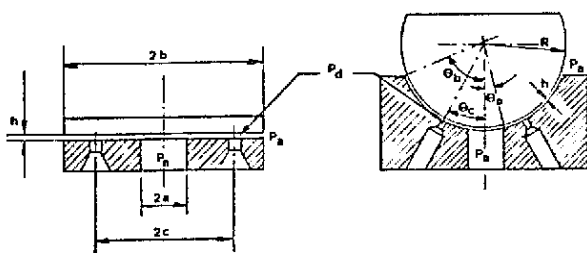


Fig. 3 - Esquema dos mancais axial e esférico.

Da Figura 3 tem-se:

- área do mancal axial - $A_a = \pi b^2 (1 - (\frac{a}{b})^2)$, (6)

- área do mancal esférico - $A_e = 2\pi R^2 (\cos \theta_a - \cos \theta_b)$, (7)

Confrontando a expressão obtida para queda de pressão no mancal esférico com a obtida no mancal axial [4], [7], observa-se que a relação entre os diâmetros do mancal axial,

$$M = \frac{b}{a}, \quad (8)$$

é substituída no mancal esférico pela relação entre o seno dos ângulos, ou seja:

$$M = \frac{\sin \theta_b}{\sin \theta_a}. \quad (9)$$

Para que as áreas de ambos os mancais sejam iguais tem-se:

$$b = \left[\frac{2 R^2 (\cos \theta_a - \cos \theta_b)}{1 - M^2} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

As demais dimensões, tais como a folga, o diâmetro de orifício, a profundidade dos bolsões, etc., serão consideradas iguais entre os mancais equivalentes.

Cálculo do Mancal Esférico Aerostático. Considerando as características especificadas para o MEA, admitem-se parâmetros que satisfazem alguns dos vínculos iniciais.

- raio da esfera $R = 80 \text{ mm}$;
- ângulo $\theta_b = 60^\circ$;
- relação $M = 6$;
- folga de projeto $h = 25 \text{ } \mu\text{m}$;
- número de orifícios $N = 8$.

Para os valores de M e θ_b dados anteriormente, e utilizando as Equações 9 e 5, tem-se:

$$\theta_a = 8,3^\circ \text{ e } \theta_c = 20,7^\circ .$$

Com estes valores, podem-se calcular as dimensões do mancal axial equivalente pelas relações 10 e 8:

$$b = 80,3 \text{ mm e } a = 13,4 \text{ mm} .$$

Para o mancal equivalente supõe-se uma carga média superior à carga média esperada para o mancal esférico: $W = 2000 \text{ N}$. Em condições de máxima rigidez [4] no mancal axial equivalente tem-se, para esta car-

ga e geometria, a pressão de alimentação efetiva $P_e = 3,70 \text{ bar}$. Para esta pressão, folga e geometria, chega-se ao seguinte diâmetro de orifício [3]: $d = 0,416 \text{ mm}$. Adotando $d = 0,5 \text{ mm}$, tem-se uma folga no mancal de $h = 28 \text{ } \mu\text{m}$.

Cálculo da Capacidade de Carga. A capacidade de carga do MEA pode ser obtida através da expressão [8]:

$$W = 2\pi R^2 \int_{\theta_a}^{\theta_b} P(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta - \pi R^2 \sin^2 \theta_b P_a, \quad (11)$$

onde $P(\theta)$ é a pressão absoluta no mancal, calculada pelas Equações 3 e 4.

Integrando numericamente (método de Simpson) a expressão resultante, assim como a expressão equivalente para o mancal axial, calcula-se a redução do coeficiente de carga para o MEA, que é 76%. Desta forma, obtém-se a carga média esperada no mancal esférico para a pressão $P_e = 3,7 \text{ bar}$:

$$W_e = 1520 \text{ N} .$$

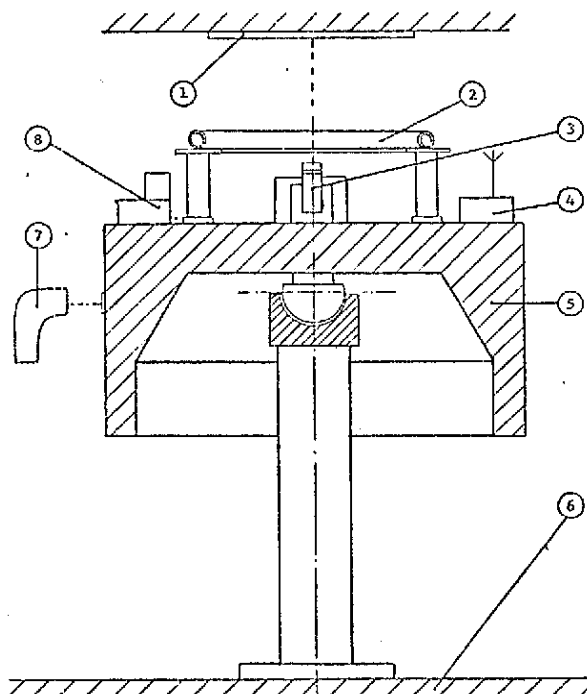
Para a pressão máxima disponível $P_{e,\text{máx}} = 6,5 \text{ bar}$ tem-se a capacidade de carga máxima

$$W_{e,\text{máx}} = 2670 \text{ N} .$$

A rigidez vertical para uma carga de 800 N é estimada em $K_v = 3,4 \times 10^7 \text{ N/m}$; a rigidez lateral para esta mesma carga é estimada em $K_l = 1,1 \times 10^7 \text{ N/m}$.

TESTE COM O AMORTECEDOR DE NUTAÇÃO

A primeira utilização prevista para o SIDMEA é o teste funcional com o amortecedor de nutação do Satélite de Coleta de Dados da MECB. A configuração básica deste experimento está mostrada na Figura 4.



- 1- Papel fotosensível
- 2- Amortecedor de nutação
- 3- Laser
- 4- Receptor de telecomandas
- 5- Plataforma dinamicamente equivalente ao satélite
- 6- Bloco sísmico
- 7- Tacômetro óptico digital
- 8- Baterias e conversores DC/DC

Fig. 4 Esquema da configuração do teste

COMENTÁRIOS FINAIS

O Simulador Dinâmico com Mancal Esférico Aerostático (SIDMEA) está em fase final de desenvolvimento pelo INPE, em cooperação com a Escola de Engenharia de São Carlos- USP, que está fabricando o mancal. Os principais problemas esperados para o seu funcionamento dentro das especificações estão relacionados com o baixo torque perturbador exigido, o que impõe uma alta precisão na forma esférica do mancal e um balanceamento cuidadoso da plataforma.

As principais características estáticas e dinâmicas deste simulador deverão ser levantadas experimentalmente tão logo se conclua sua construção. Geralmente necessita-se para este simulador de instrumentação para medir com precisão a posição angular da plataforma no espaço. Neste primeiro experimento, a instrumentação foi substituída por um feixe laser, que é alinhado com o eixo de rotação de forma a imprimir, em um papel fotossensível, a trajetória do movimento de amortecimento.

REFERÊNCIAS

- [1] 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 em Ciência Espacial. São José dos Campos, INPE, 1986, 156 p.
- [2] Fleury, A.T.; Rios Neto, A. Control systems dynamic verifications; first progress report. Saint-Anne-de-Bellevue, Quebec, 1984. SPAR AEROSPACE, SASP (Report n°RMC-009-84-24).
- [3] Munday, A.J. Gas bearings. In: Neale, M.J., ed. Tribology handbook. London, Butterworths, 1973.
- [4] Powell, J.W. Design of aerostatic bearing. London, Machinery Publishing, 1970.
- [5] Purquerio, B.M. Banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais, projeto, construção e testes experimentais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. São Carlos, EESCUSP, 1975, 87 p.
- [6] Reinell, K.; Stapf, R. Modern hardware simulation methods in spacecraft dynamics. In: IFAC Workshop on Simulation and Validation Techniques to Establish Spacecraft Control System Performance. Stanford, CA, Jan. 18, 1983, 16p.
- [7] Shires, G.L. The design of externally pressurized bearings. In: Grassan, N.S.; Powell, J.W., ed. Gas lubricated bearings. London, Butterworths, 1964.
- [8] Wilcock, D.F. Design and performance of gas-pressurized, spherical. space-simulator bearings. Journal of Basic Engineering, vol. 9, pp. 604-612, 1965.

ABSTRACT

The Spherical Air Bearing Dynamic Simulator (SIDMEA) is used to accurately reproduce the 3 degree-of-freedom movement of a satellite about its center of mass. This work presents the main specifications for this simulator and the solutions adopted in its design, with emphasis on the bearing dimensioning. The configuration proposed for the tests of a mutation damper, which is part of the Attitude Control Systems of the MECB Data Collecting Satellite, is also shown.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROPOSTA PARA
PUBLICAÇÃO

- ☐ DISSERTAÇÃO
☐ TESE
☐ RELATÓRIO
☐ OUTROS

TÍTULO

Projeto de um simulador dinâmico com mancal esférico aerostático para testes de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais

4x

IDENTIFICAÇÃO

AUTOR(ES)

Luiz Victor Carone Cardieri
Sebastião Eduardo Corsatto Varotto

ORIENTADOR

CO-ORIENTADOR

DIVULGAÇÃO

- ☒ EXTERNA ☐ INTERNA ☐ RESTRITA COBEM
EVENTO/MEIO
☒ CONGRESSO ☐ REVISTA ☐ OUTROS

LIMITE

DEFESA

CURSO

ORGÃO

DMC

NOME DO REVISOR

Agenor de Toledo Fleury

NOME DO RESPONSÁVEL

WILSON CUSTODIO CARVALHO
Chefe do Departamento de
Mecânica Espacial e Controle

RECEBIDO

DEVOLVIDO

ASSINATURA

27/5/87

20/5/87

[Assinatura]

APROVADO

☐ SIM
☐ NÃO

28/5/87

ASSINATURA

[Assinatura]

REV. LINGUAGEM

Nº

PRIOR

RECEBIDO

NOME DO REVISOR

137

1

28/5/87

Paulo Manoel de Carvalho

PAG

DEVOLVIDO

ASSINATURA

98

28/5/87

Paulo P. Carvalho

OS AUTORES DEVEM MENCIONAR NO VERSO INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS, ANEXANDO NORMAS, SE HOUVER

RECEBIDO

DEVOLVIDO

NOME DA DATILÓGRAFA

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO

☐ SIM

☐ NÃO

___/___/___

Nº DA PUBLICAÇÃO

4284 PRE/1156

PAG

CÓPIAS

Nº DISCO

LOCAL

OBSERVAÇÕES E NOTAS