

SIMULAÇÃO E TESTES DE SISTEMAS DE CONTROLE DE ATITUDE E ÓRBITA DE SATÉLITES: CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE UM CASO EXEMPLO (INPE) E PROJETO DE UMA MESA DE ROTAÇÃO CONTROLADA.

Agenor de Toledo Fleury  
Petrônio Noronha de Souza  
Gilberto da Cunha Trivelato  
Valtair Antonio Ferraresi  
José Francisco Ribeiro

Departamento de Mecânica Espacial e Controle  
INPE/MCT - Caixa Postal 515  
12201 - São José dos Campos - SP

RESUMO

O Sistema de Controle de Atitude e Órbita (SCAO) é uma das partes fundamentais de um satélite. O correto funcionamento do SCAO deve ser garantido por uma exaustiva série de ensaios e testes em laboratório que compreendem componentes e o sistema integrado. Este trabalho tem por objetivos descrever a implantação de um Laboratório de Simulação de SCAO pelo Departamento de Mecânica Espacial e Controle do INPE, como um caso exemplo, mostrando, de maneira resumida, os resultados tecnológicos já alcançados, e apresentar os principais aspectos relativos ao projeto, à construção e aos testes de uma Mesa de Rotação Controlada de um grau de liberdade, desenvolvida com apoio da FINEP/PADCT. O projeto de um segundo eixo controlado, que se encontra em fase de finalização, é também descrito.

Attitude and Orbit Control System Simulation and Tests: General comments about an example case (INPE) and the design of a servo rate table

Abstract

The Attitude and Orbit Control System (AOCS) is one of the basic parts of a satellite. In order to guarantee AOCS correct performance, exhaustive testing has to be done in a laboratory, both at component and at system level. This work intends to present first the implementation of an AOCS Simulation Laboratory by INPE's Space Mechanics and Control Department, as an example case, briefly showing the technological results already accomplished. It presents as well the basic aspects related to design, manufacturing and tests of a one degree-of-freedom servo rate table. It also describes, in an introductory level, the design of a second controlled axis for the table.

1. INTRODUÇÃO

Uma das etapas mais importantes no desenvolvimento do projeto de um satélite é a fase de testes a que devem ser submetidos tanto o satélite como cada um de seus subsistemas. Desta etapa dependem a garantia de desempenho e a confiabilidade do satélite como um todo. O Subsistema de Controle de Atitude e Órbita (SCAO) é um dos conjuntos de relevância fundamental, sendo, de uma maneira geral, responsável pela realização de manobras de órbita e de atitude e pela manutenção de atitude do satélite em órbita, com vistas a garantir o correto apontamento da carga útil para o cumprimento de uma dada missão. Desde sua concepção até sua completa qualificação, que precede a integração do SCAO ao satélite, uma longa e exaustiva série de ensaios, que compreendem componentes e o subsistema integrado, deve ser cumprida. Em se tratando de área ainda muito nova em nosso País, o Departamento de Mecânica Espacial e Controle (DMC) do INPE/

MCT vem, desde 1982, desenvolvendo esforços no sentido de prover um laboratório com recursos humanos e capacidade técnica para enfrentar os diversos aspectos de testes e de qualificação de subsistemas de Controle de Atitude necessários para atendimento aos projetos dos satélites previstos para a Missão Espacial Completa Brasileira (MECB). Neste processo, o grupo envolvido conseguiu materializar resultados de interesse tecnológico dentre os quais se destaca uma Mesa de Rotação Controlada ("rate-table") construída com componentes disponíveis no mercado brasileiro. Este trabalho tem por objetivo descrever a implantação do Laboratório de Simulação do DMC/INPE, como um caso exemplo, mostrando, de maneira bastante resumida os resultados tecnológicos já alcançados, e apresentar os principais aspectos relativos ao projeto, à construção e aos testes de uma Mesa de Rotação Controlada de um grau de liberdade, desenvolvida com apoio do FINEP/PADCT (projeto 52.85.0169.00). Será também abordado o projeto de um segundo eixo

controlado (segundo grau de liberdade) que se encontra em fase de finalização.

## 2. IMPLANTAÇÃO DO LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO

As dificuldades envolvidas num laboratório de Simulação de SCAO podem ser melhor entendidas quando se verifica que, mesmo no caso de satélites de complexidade não muito elevada como os satélites de sensoriamento remoto da MECB, os requisitos de apontamento se situam na faixa de décimos de grau, com velocidades residuais da ordem de milésimos de grau por segundo em cada um dos três eixos.

Para atingir os requisitos apresentados pelas missões da MECB e futuras, o Laboratório de Simulação tem por objetivos (Fleury et al., 1984),

- prover a infra-estrutura necessária para os testes de desenvolvimento, integração e qualificação funcional de SCAOs;
- capacitar gradualmente a Instituição a nível de projeto de componentes e equipamentos de teste de SCAO, através do desenvolvimento de dispositivos para, numa primeira fase, atender ao Laboratório e, num futuro próximo, fornecer componentes qualificados espacialmente.

Os testes de qualificação de SCAO serão conduzidos em instalações especiais por um sistema concebido no próprio INPE e centrado num Simulador Dinâmico de três Graus de Liberdade (Contraves Goerz Co.) interligado a um sistema digital composto por um computador (VAX 780), um processador vetorial e interfaces dedicadas para aquisição de dados. Estão sendo desenvolvidos no DMC o software que rodará neste sistema e os simuladores de referências celestes (Sol, Terra) necessários para estimular os sensores e permitir o fechamento da malha de simulação (Fleury e Rios Neto, 1984).

Por outro lado, atingir a qualificação exigida para trabalhar com esse sistema não é tarefa fácil. Para obter esta qualificação e o desenvolvimento de capacitação na área de Sistemas de Controle de Atitude e Órbita, optou-se pelo projeto e pela construção de duas bancadas de teste de SCAO que pudessem ser utilizadas nos estágios preliminares de concepção de equipamentos e do sistema como um todo. Uma premissa básica no desenvolvimento das bancadas foi a utilização extensiva de tecnologia disponível no mercado nacional. Essas duas bancadas são a Mesa de Mancais Aerostáticos (MMA) de Um Grau de Liberdade (Cardieri, 1986) e a Mesa de Rotação Controlada (Fleury et al, 1987).

O único meio possível de testar com experimentação física, simultaneamente, todas as partes do SCAO - sensores, atuadores e eletrônica de controle - é através de uma

Mesa de Mancais Aerostáticos. A plataforma (mesa), suspensa numa fina camada de ar, reproduz os movimentos do satélite na situação real dos baixos atritos, encontrados quando em órbita. A Figura 1 mostra o esquema para os testes com uma MMA de Um Grau de Liberdade para caracterização de atuadores.

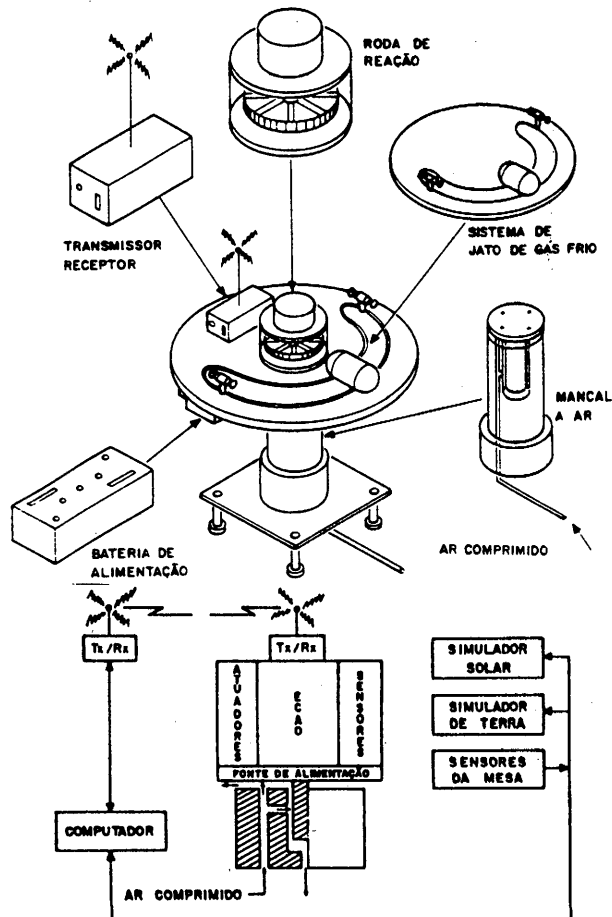


Fig. 1 - Esquema de testes com Mesa de Mancais Aerostáticos.

Na bancada desenvolvida no INPE estão já disponíveis ou em fase final de fabricação os seguintes itens:

- a) A plataforma propriamente dita, instrumentada a partir de um codificador ótico incremental (DIADUR), que permite medidas com precisão de 13" (treze segundos de arco) (Cardieri, 1986).
- b) Uma roda de reação de 2Nms de capacidade, que opera na faixa de -2000 a +2000 rpm, controlada em velocidade por um controlador PI de implementação amostrada (Souza, 1986). Esta roda, cujos parâmetros de desempenho são muito próximos aos de rodas similares já utilizadas em vôo, deverá dispor em breve de um controlador de torque implementado em microprocessador. No modelo atual, apenas o motor, de corrente contínua, do tipo "frameless", é importado.

- c) Um sistema de jatos de gás frio, que utiliza nitrogênio como gás propulsor, com 4 motores, em montagem oposta, capazes de fornecer 1N de empuxo para geração de torques na plataforma.
- d) Um sistema de telemetria/telecomando para transmissão de comandos e sinais entre os sensores e atuadores sobre a plataforma e o laboratório. Esse sistema, que opera em radiofrequência para telemetria e em infravermelho para telecomandos, possui 32 canais, que permitem configurações desde 16 sinais digitais e 16 analógicos até 32 sinais digitais.
- e) Um sistema de potência com conversores regulados de tensão para permitir o correto funcionamento dos equipamentos sobre a plataforma.

Os sensores que serão utilizados nessa configuração estão sendo desenvolvidos no Departamento de Sistemas Eletroópticos (DEO) do INPE.

Os resultados obtidos com a Mesa de Mancais Aerostáticos de Um Grau de Liberdade permitiram que se saltassem estágios quando, por necessidades de mudança de concepção do primeiro satélite da MECB, tornou-se necessário a utilização de uma Mesa de Mancais Esférico (3 Graus de Liberdade). O mancal, que está sendo desenvolvido em conjunto com a EESC/USP, permitirá inclinações até 15° em relação ao eixo vertical. Numa primeira fase a Mesa de Mancais Esférico não será instrumentada, ficando seus movimentos registrados em papel fotossensível pela trajetória de uma fonte de luz rigidamente ligada à plataforma.

Embora extremamente atrativos por permitir o teste global do SCAO, os ensaios com Mesas de Mancais Aerostáticos de 3 Graus de liberdade são bastante restritivos em vista da complexidade dos equipamentos, das exigências de balanceamento e da presença de torques parasitas (Fleury e Rios Neto, 1984). Por essas razões, é comum trabalhar sempre que possível com mesas servocontroladas, reservando para as Mesas de Mancais Aerostáticos a importantíssima função de caracterização de atuadores.

Em testes com mesas servocontroladas ou simuladores dinâmicos apenas os atuadores não são envolvidos. A Figura 2 mostra o esquema dos testes com a Mesa de Rotação Controlada de Dois Graus de Liberdade desenvolvida no INPE. Esse esquema é bastante semelhante ao que será empregado nos testes de qualificação com o Simulador Contraves de Três Graus de Liberdade.

Embora destinada fundamentalmente aos testes de SCAO desde a concepção até uma

fase de pré-qualificação, onde baixas e médias velocidades de rotação devem ser reproduzidas com precisão, a Mesa de Rotação Controlada pode ser utilizada como equipamento suporte de testes de sistemas de controle em outras áreas, como é o caso de caracterização de sensores inerciais. Além disso, acredita-se que resultados materializados no desenvolvimento deste dispositivo possam ser aplicados em outras áreas como robótica. No estágio atual, o eixo central (vertical) da Mesa já se encontra operacional, enquanto o projeto detalhado do segundo eixo (horizontal) entra em fase de finalização. A previsão é ter o conjunto com dois eixos ativos em operação no início de 1988.

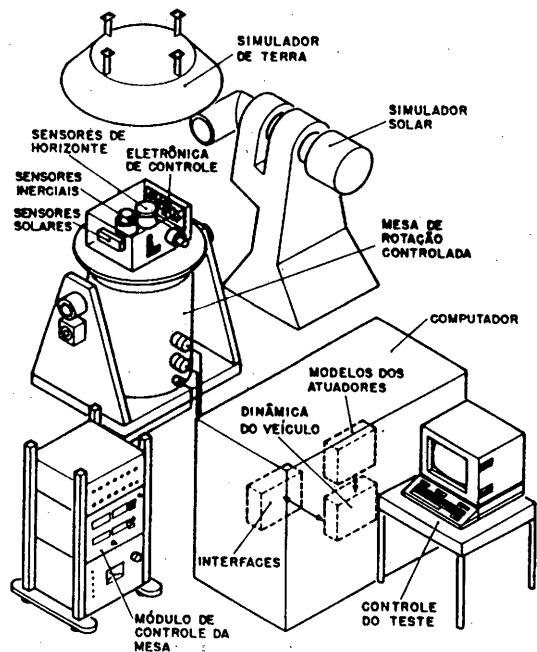


Fig. 2 - Esquema dos testes com simuladores dinâmicos.

### 3. DESENVOLVIMENTO DE UMA MESA DE ROTAÇÃO CONTROLADA

Os principais aspectos de desenvolvimento da Mesa de Rotação Controlada são discutidos a seguir.

#### 3.1 - FILOSOFIA DE PROJETO

Ao propor a tarefa de desenvolver uma Mesa de Rotação Controlada tinha-se em mente atingir, simultaneamente, com prioridades não necessariamente na ordem apresentada, os seguintes objetivos:

- tornar disponível um equipamento que permitisse trabalhar nas diversas fases do projeto de um SCAO até a sua pré-qualificação, quando, obrigatoriamente, dever-se-ia passar à utilização de dispositivos mais sofisticados.

- projetar um equipamento com desempenho compatível com os similares estrangeiros,

- utilizar, sempre que possível, componentes nacionais de prateleira,

- utilizar, sempre que possível, recursos simples de fabricação para permitir sua reprodução por eventuais entidades interessadas,

- permitir interfaceamento com computadores digitais para integração do equipamento com a malha de teste,

- ter custo menor que os similares estrangeiros.

As razões da escolha dos critérios acima residem principalmente no alto custo dos equipamentos estrangeiros destinados ao mesmo fim, na dificuldade de compra desses equipamentos e na dificuldade de sua manutenção devido à ausência de bases instaladas no País. Deve ser também considerado, além destas razões técnicas, o fator certamente motivante de envolver uma equipe num projeto de alto grau tecnológico que engloba tarefas de integração bastante parecidas com as que serão necessárias ao desenvolvimento dos SCAOs dos satélites.

### 3.2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Para atingir os objetivos delineados, as especificações técnicas foram definidas da seguinte maneira:

- Requisitos mecânicos para o eixo central:
  - rotação que varia continuamente entre 0,017 e 100 rpm;
  - controle de velocidade dentro de 1%,
  - acelerações angulares maiores que  $500^\circ/s^2$ ,
  - plataforma com diâmetro útil de 500 mm,
  - capacidade de 50 kg de carga com excentricidade de 60 mm em relação ao eixo de giro,
  - vida mínima de 1000 horas,
  - possibilidade de montagem com inclinação de  $20^\circ$  do eixo em relação à vertical (motorização),
  - lubrificação após longos períodos de tempo.
- Requisitos mecânicos para o segundo eixo:
  - rotação que varia continuamente entre 0,03 e 5 rpm,
  - limitação de posicionamento angular entre  $\pm 20^\circ$  em relação à vertical.

- capacidade de carga e precisão de velocidade nos mesmos níveis definidos para o primeiro eixo.

- Requisitos eletrônicos:

- vinte ou mais canais de acesso para potência e sinais;
- sensor de rotação e posição angular no eixo de saída;
- sinal de referência de velocidade gerado externamente;
- eletrônica organizada em "rack".

### 3.3 - SOLUÇÕES ADOTADAS

A obtenção dos requisitos propostos deve ser dar ao nível de disponibilidade de componentes nacionais para os dois eixos ativos da Mesa de Rotação Controlada. Dessa maneira, o ponto de partida do projeto é o sistema de acionamento, visto que são poucos os modelos fabricados no País que podem ser utilizados para aplicação na Mesa.

#### 3.3.1 - MOTOR

Por razões de disponibilidade de torque e operação contínua, a quase totalidade dos simuladores fabricados emprega motores de corrente contínua para acionamento. Como forma de manter o objetivo de utilizar equipamentos de prateleira, a escolha do motor recaiu sobre um modelo SIEMENS de 600W, com tacogerador incorporado ao eixo (tipo 054-OAFO1). Para este motor amplamente empregado na confecção de máquinas-ferramenta, foi adotada uma faixa de trabalho entre 50 e 2000 rpm, onde a estabilidade é da ordem de 0,1%. A alimentação e o controle são feitos por um conversor estático de 6 pulsos em ligação antiparalela sem corrente de intercirculação, também fabricado pela SIEMENS (MÓDULO PAC-C). Este conversor é bidirecional, o que permite à plataforma girar nos dois sentidos, e dispõe de frenagem regenerativa em ponte antiparalela, o que possibilita a comutação rápida de motor para gerador ( $< 10ms$ ). O controle de velocidade pode ser resumido como um regulador PID de ganhos ajustáveis. O sistema escolhido é plenamente satisfatório para as necessidades atuais do projeto.

#### 3.3.2 - CONCEPÇÃO DO EIXO CENTRAL DA MESA

O problema enfrentado a partir da definição do sistema de acionamento é o de converter a faixa de rotações do motor na faixa de rotações desejada na plataforma. A adoção dessa faixa, entre 0,017 rpm e 100 rpm, o que indica uma relação de 1:6000, tornou necessária a adoção de reduções diferentes, comandadas por embreagens eletromagnéticas. A divisão das partes específicas da Mesa resultou em dois módulos, denominados Redutor e "Rack", como indicados na Figura 3.

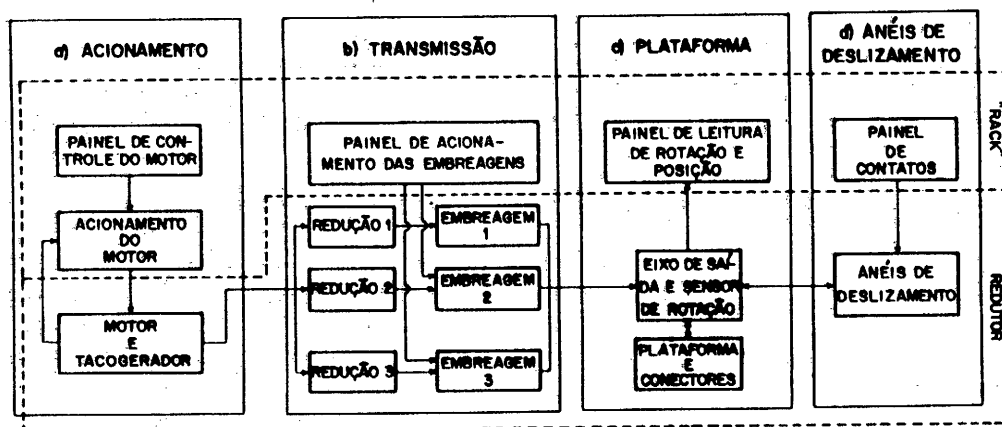


Fig. 3 - Diagrama das partes do eixo central.

### 3.3.3 - RELAÇÕES DE TRANSMISSÃO

O redutor do eixo central da Mesa em prega 3 relações de redução: 3156,39:1; 162,37:1 e 19,44:1. Essas reduções são obtidas através de cinco pares engrenados e dois redutores planetários. A precisão de engrenagens e redutores planetários deve ser alta para não comprometer a transmissão. Os redutores escolhidos, do tipo 5RP e com relação 19,44:1, são fabricados pela YOK (Curitiba). As engrenagens utilizadas têm módulo 1, qualidade DIN 7 a 8 e número de dentes entre 57 e 164. Foram cortadas pelo IPT (São Paulo). Devido à existência de testes com reversão do torque atuante na plataforma, foi desenvolvido um dispositivo antifolga ("antibacklash"). Este dispositivo consiste em uma engrenagem que opera em conjunto com a engrenagem de saída, ligando-se a esta última por meio de molas. A tensão destas molas introduz uma pré-carga no sistema o que exige que os dois flancos dos dentes trabalhem simultaneamente (Fleury et al., 1987).

### 3.3.4 - EMBREAGENS

As embreagens eletromagnéticas são comandadas a partir de um painel externo, permitindo engrenamentos bastante rápidos na ordem crescente das marchas (~ 12 ms). Para engrenamento em ordem decrescente, foi colocado um circuito de segurança para que a passagem de terceira para segunda ou primeira marchas só ocorra em velocidades abaixo de 10 rpm, o que evita sobre-carga e, em consequência, possíveis danos às engrenagens. O modelo adotado é o SFC400, 24V, fabricado pela Warner Electric do Brasil. Seu acionamento eletromagnético é feito sem anéis de leitores e permite transmitir torques até 31 Nm.

### 3.3.5 - ANÉIS DE DESLIZAMENTO ("SLIP-RINGS")

Anéis de deslizamento são utilizados para permitir a ligação entre a plataforma e o laboratório. Através desses anéis trans-

mite-se a potência para acionamento dos instrumentos sobre a plataforma e recebe-se, no laboratório, os sinais gerados por esses instrumentos. Trata-se do único componente importado incorporado à Mesa de Rotação Controlada, já que não houve como obter esse dispositivo no mercado interno. O modelo adotado é fabricado pela Wendon Co, dos Estados Unidos, sob o código WSD-1750-24. Os 24 canais disponíveis ligam diretamente a plataforma ao "rack" eletrônico.

O longo tempo despendido na importação dos anéis de deslizamento fez com que se conseguisse desenvolver um protótipo, cuja concepção é bastante simples, com 12 canais, no DMC/INPE. Este protótipo demonstrou resultados bastante bons e poderá ser usado em futuras versões da Mesa.

### 3.3.6 - CARCAÇA

O projeto da carcaça é de importância fundamental para o bom desempenho do equipamento, pois dela dependem todos os estreitos ajustes internos do redutor. A carcaça é constituída por três módulos usinados a partir de tubos de aço calandrado com costura. Estes módulos têm tampas de aço soldadas e nos seus perímetros são abertas janelas para permitir a montagem dos componentes internos e a realização de manutenção dos mesmos componentes.

### 3.3.7 - PLATAFORMA

A plataforma de suporte aos equipamentos em teste da Mesa de Rotação Controlada deve ter o menor peso possível, pois faz parte do conjunto suspenso. Para satisfazer esse requisito, a plataforma de 500 mm de diâmetro é fabricada em liga de alumínio B57S-H34, o que resulta em uma massa em torno de 5 kg. A plataforma, de formato anular, é engastada no eixo de saída para tornar o conjunto mais rígido.

### 3.3.8 - SENSOR DE POSIÇÃO E ROTAÇÃO

Para atender os requisitos de precisão a Mesa de Rotação Controlada dispõe de um codificador ótico-incremental de 5000 traços por volta. O modelo adotado é o ROD-450, comercializado pela DIADUR S/A e amplamente utilizado em máquinas-ferramenta.

Para medidas de posição é possível utilizar um circuito eletrônico que eleva o número de pulsos para 100.000 por volta. Com isso, a incerteza de leitura correspondente é reduzida a 13 segundos de arco. Isto é realizado através de um módulo de leitura do tipo U22173B, também da DIADUR S/A.

As medidas de velocidade dentro da faixa especificada são facilmente atendidas a partir dos dados de posição, quando as velocidades envolvidas são de médias para altas, pois nesses casos podem ser obtidas dividindo o número de pulsos pelo intervalo de tempo. No caso das baixas velocidades, torna-se necessário medir o período de rotação, em vez da velocidade, para manter a precisão. O período é medido pelo intervalo entre pulsos e permite reduzir o erro máximo de velocidade, que é de 0,6% a 1 rph, a cada 6s, no caso de medida de velocidade, para  $3,0 \times 10^{-2}\%$  a cada 60 ms pela leitura do período. A eletrônica para medida de velocidade ou período com grande precisão foi desenvolvida no INPE, juntamente com circuitos para saídas analógicas de velocidade ou período para permitir registros externos.

### 3.3.9 - CIRCUITOS DE ACIONAMENTO, PROTEÇÃO E SEGURANÇA

Para completar o conjunto e garantir o funcionamento seguro do eixo central da Mesa de Rotação Controlada, foram desenvolvidos circuitos para acionamento e proteção do motor, circuito para proteção das embreagens eletromagnéticas e circuito para parada de emergência.

### 3.3.10 - CONJUNTOS RESULTANTES

As partes descritas nas seções anteriores foram, como já observado, acondicionadas em dois conjuntos. A Figura 4 mostra um corte transversal do redutor, enquanto a Figura 5 apresenta o Módulo de Controle da Mesa, contido pelos módulos de Acionamento, de Entradas e Saídas e de Monitoramento.

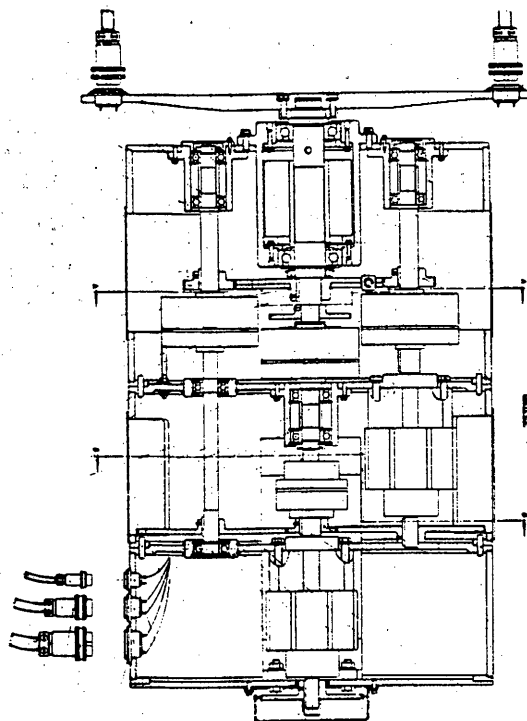


Fig. 4 - Corte transversal do redutor.

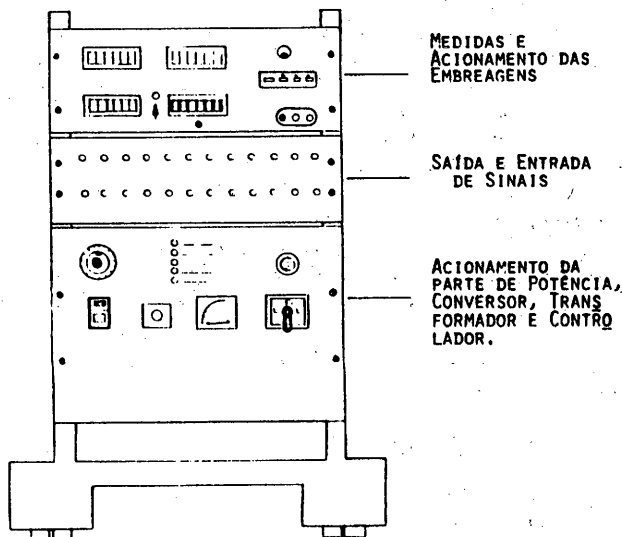


Fig. 5 - Módulo de controle do eixo central.

### 3.3.11 - REGIÃO DE OPERAÇÃO DO EIXO CENTRAL

Para ilustrar graficamente o comportamento do conjunto obtido após a integração, é possível traçar uma malha que representa a máxima aceleração desenvolvida pela Mesa em função de:

- massa do experimento, que compreende a plataforma e os dispositivos em teste fixos à plataforma;
- excentricidade de montagem do experimento;
- momento de inércia do experimento em torno do eixo de rotação;

- inclinação da plataforma em relação à vertical.

A Figura 6 mostra essa região de operação. Na Figura representa-se o caso de um experimento com 35 Kg de massa ( $m$ ), montado com excentricidade ( $\epsilon$ ) de 60 mm em relação ao eixo central e inclinado de um ângulo ( $\alpha$ ) de  $10^\circ$  em relação à horizontal. Se o momento de inércia do experimento ( $I_x$ ) é de  $3 \text{ Kg m}^2$ , a aceleração máxima da plataforma ( $\ddot{\theta}_{\text{MÁX}}$ ) será de  $520 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ .

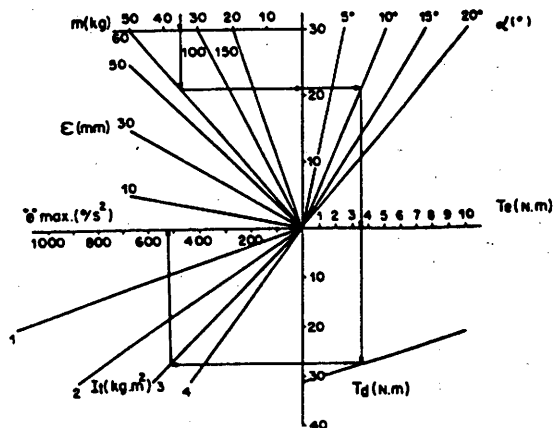


Fig. 6 - Região de operação.

Os resultados obtidos a partir da análise da região de operação situam-se na faixa dos parâmetros de desempenho fornecidos por fabricantes internacionais, sendo comparáveis, por exemplo, às acelerações desenvolvidas pelo eixo central de um Simulador Dinâmico Contraves (Contraves, 1983; Fleury et al. 1984).

### 3.3.12 - ANTEPROJETO DO SEGUNDO EIXO

Os resultados altamente motivantes obtidos com o desenvolvimento do eixo central da Mesa de Rotação Controlada levaram à proposição da construção de um segundo eixo ativo, montado horizontalmente. Para atender às especificações técnicas apresentadas na Seção 3.2 foi concebida a configuração preliminar que é mostrada nas Figuras 7 e 8.

O desenvolvimento do eixo horizontal se encontra atualmente no detalhamento do projeto. Esse eixo será acionado por um motor de corrente contínua servocontrolado de mesmo modelo que o utilizado para o eixo central. A transmissão será feita do motor por correia dentada até a entrada de um redutor planetário (YOK, de relação 1:100) ligado diretamente ao eixo de giro. A redução total será de 1:300. O eixo horizontal estará apoiado em mancais de rolamento e deverá contar ainda com freio manual, ajuste fino de posição manual, trava com referência de zero, batentes com chaves de final de curso e um sensor de posição angular. Este sensor é um codificador ótico também idêntico ao utilizado no eixo central. Todas

estas partes estão distribuídas nas extremidades do eixo horizontal e apoiadas em uma base contruída com chapas de aço soldadas. Esta base será rigidamente fixada a um bloco sísmico por meio de pés niveladores e chumbadores. Os módulos eletrônicos necessários para o segundo eixo são o módulo de Acionamento do motor e o módulo de Monitoramento, já desenvolvidos para o eixo central, que serão repetidos para o eixo horizontal e acondicionados também em "rack" padrão 19".

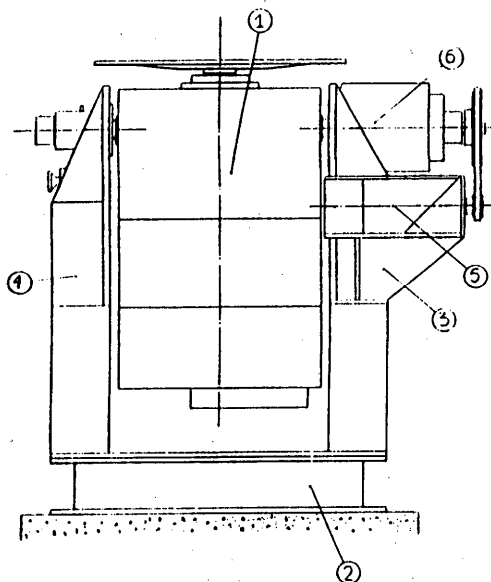


Fig. 7 - Vista frontal da MRC com dois eixos ativos.

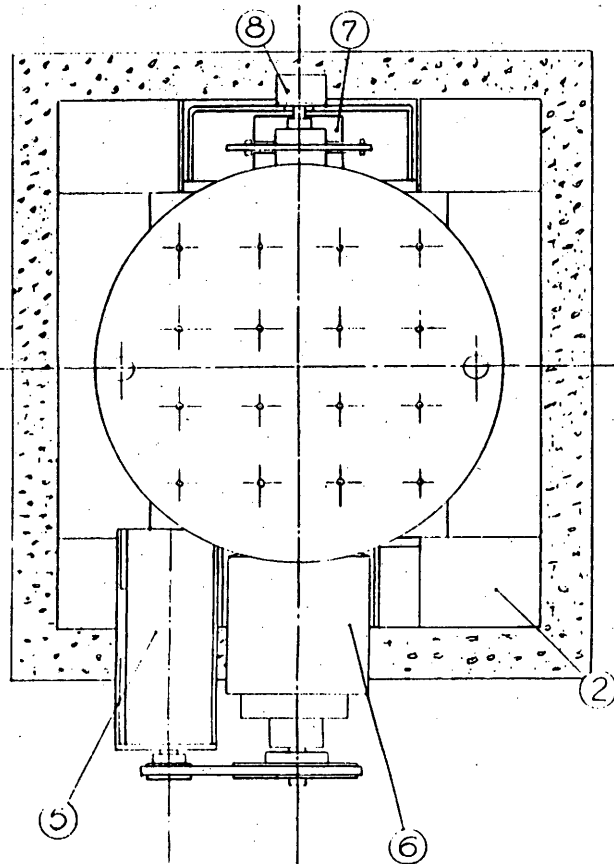


Fig. 8 - Vista de topo da MRC com dois eixos ativos.

#### 4. TESTES DO EIXO CENTRAL

O eixo central da Mesa de Rotação Controlada foi submetido a uma extensa bateria de testes que visam a verificação do atingimento das especificações propostas e a determinação de parâmetros de interesse para o uso do equipamento. Os testes realizados foram os seguintes:

- verificação dos dispositivos elétricos de segurança;
- verificação da precisão de giro ("wobble");
- verificação das faixas de velocidade;
- verificação de margens de velocidade máxima e mínima;
- verificação dos anéis de deslizamento ("slip-rings");
- verificação da estabilidade de rotação.

Os resultados obtidos demonstram que os requisitos iniciais de projeto foram superados com ampla folga (Fleury et al. 1987). A caracterização de outros parâmetros de desempenho também trouxe resultados bastante satisfatórios. Assim, a precisão de giro levada, considerando a planicidade da plataforma como fator de segunda ordem, apontou valores da ordem de um minuto de arco (1'), o que pode ser considerado compatível com o emprego que se pretende dar ao equipamento e perfeitamente dentro da faixa esperada de precisão para o processo da fabricação empregado. Nos testes de verificação dos anéis de deslizamento, procura-se caracterizar a interferência dos anéis sobre os sinais e os circuitos de potência transmitidos entre a plataforma e o laboratório e vice-versa. Essa interferência é dada pela variação da resistência elétrica ao longo do movimento da plataforma, que, portanto, deve ser a menor possível para não introduzir ruídos no experimento. Os valores obtidos nos ensaios mostram que a variação dinâmica de resistência é sempre menor que 20 miliohms, o que pode ser considerado um resultado muito bom.

Para verificação das margens de velocidade máxima e mínima, foram especificadas rotações 10% acima da velocidade máxima de projeto (110 rpm) e 10% abaixo da velocidade mínima (0,015 rpm). Esses valores foram atingidos sem maiores problemas. No caso de velocidade mínima, onde se concentra o interesse maior para testes de Sistemas de Controle de Atitude pela possibilidade de simular as velocidades de rotação orbitais e as velocidades de rotação residuais, quase sempre muito baixas, é possível obter estabilidade com velocidades da ordem de 1 rotação por dia (0,0416 rph ou 0,000694 rpm).

Finalmente, nos testes de verificação da estabilidade de rotação, o eixo central da Mesa de Rotação Controlada foi acionado em diversos valores de velocidade e manteve-se cada uma dessas velocidades durante tempo não inferior a 15 minutos. Durante esse tempo registrou-se o sinal analógico de velocidade de rotação da plataforma para cada velocidade preestabelecida.

As Figuras 9 e 10 apresentam os registros para as velocidades de 1 rph e 20 rpm, respectivamente. As pequenas oscilações nos sinais registrados são decorrentes da conversão do sinal digital adquirido do codificador para analógico.

Verifica-se que, nestes casos, a velocidade de rotação da plataforma é mantida com precisão melhor que 0,1% da velocidade de referência. Este resultado, melhor do que o requisito inicial de 1% de precisão, demonstra que a Mesa de Rotação Controlada está capacitada para atender as finalidades para as quais foi contruída.

#### 5. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Entendidas as dificuldades existentes na implantação e operacionalização de um Laboratório de Simulação de Sistemas de Controle de Atitude, que, no caso, vão muito além das necessidades de teste destes sistemas, a conclusão do eixo central da Mesa de Rotação Controlada representa um marco importante para as atividades do Laboratório. Um projeto com as características do desenvolvido para Mesa, a par de representar um grande passo na capacitação da equipe para projetos de precisão e integração de sistemas complexos, demonstra que podem ser realizados equipamentos de grande sofisticação tecnológica no País, com extensa utilização de componentes nacionais de prateleira e com custos relativamente baixos. Não são poucas as dificuldades para atingir esses objetivos, e deve ser citado, no caso apresentado, o distanciamento entre o final do projeto na prancheta e o início de operação do equipamento, que foi de cerca de dois anos. Vários motivos contribuíram para essa demora, e os principais foram as enormes dificuldades de localizar fornecedores dos componentes no mercado brasileiro, devido ao pequeno intercâmbio de informações, e conseguir realizar serviços externos (usinagem, por exemplo), devido aos lotes sempre muito reduzidos e às peças de estreitas tolerâncias que são características dos projetos da área aeroespacial.

Os resultados, por outro lado, são extremamente compensadores e motivam a busca de objetivos ainda mais amplos. No caso da Mesa de Rotação Controlada, o objetivo mais próximo é incluir o segundo eixo controlado, que ampliará significativamente as possibilidades do equipamento.



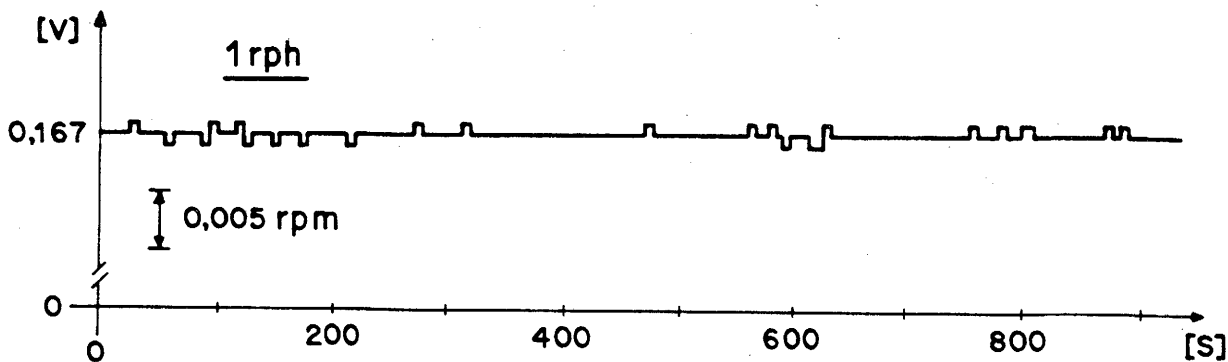


Fig. 9 - Verificação da estabilidade de rotação a 1 rph.

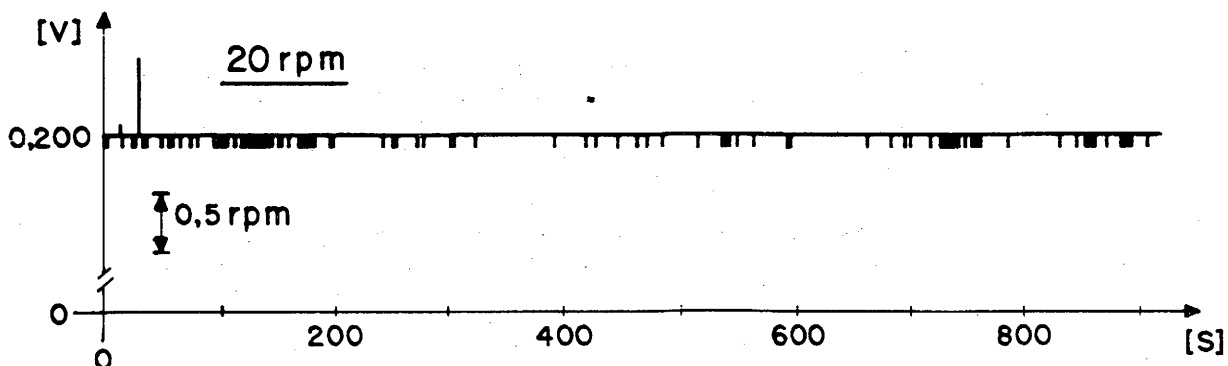


Fig. 10 - Verificação da estabilidade de rotação a 20 rpm.

Atualmente, o eixo central da Mesa de Rotação Controlada está montado sobre um suporte que permite inclinação do eixo entre 0 e 90° em relação à vertical. Esta configuração permitirá a realização de testes do Amortecedor de Nutação, atuador passivo que está em desenvolvimento no DMC/INPE, o qual será utilizado nos satélites de Coleta de Dados da MECB.

#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam deixar registrados seus agradecimentos à Financiadora de Estudos e Projetos, FINEP/MCT, pelo financiamento concedido ao projeto da Mesa de Rotação Controlada, através do PADCT (Convênio FINEP 5.2.85.0169.00). Desejam também agradecer aos colegas Mário C. Ricci, Luiz Victor C. Cardieri, Sebastião E.C. Varotto, Luiz Alípio A. Candez, Carlos E. Oliveira e Eleasar M. Marins pela decisiva participação no desenvolvimento do projeto. Finalmente, um agradecimento especial ao Dr. Atair Rios Neto pela criteriosa revisão deste trabalho e pelo apoio constante durante o projeto.

#### 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cardieri, L.V.C. (1986). "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/Mecânica Orbital, São José dos Campos, INPE.
- Contraves Goerz (1983) Proposal for a SCD-2 Satellite Control Facility, P-13550, Pittsburgh, PA.
- Fleury, A.T.; Rios Neto, A. (1984). "Control Systems Dynamic Verifications", SPAR Report RML-009-84-24, SPAR Aerospace Ltd, Sainte-Anne de Bellevue, Quebec, Canada.
- Fleury, A.T.; Orlando, V.; Oliveira Filho, O.B. (1984). "Objetivos, Atividades e Necessidades dos Laboratórios de Simulação Digital, Simulação Física de Sistemas de Controle de Atitude e de Órbita, e de Controle Térmico do Departamento de Mecânica Espacial e Controle", São José dos Campos, SP, INPE (INPE-3174-RPE/459).
- Fleury, A.T.; Souza, P.N.; Ferraresi, V.A.; Trivelato, G.C.; Ribeiro, J.F. (1987). "Projeto, Construção e Testes de Uma Mesa de Rotação Controlada", Relatório Final Apresentado à FINEP/PADCT, São José dos Campos, SP, INPE.
- Souza, P.N. (1986). "Análise, Projeto, Construção e Testes de um Modelo de Roda de Reação para Aplicações Espaciais", Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Mecânica Orbital. São José dos Campos, SP, INPE.