

**TESTES PARA VALIDAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SENSORES  
INERCIAIS**

Gilberto Gandelman  
Otavio Durão

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE  
DEM - VCG - CP 515  
12201 São José dos Campos - SP - Brasil

**RESUMO**

Este trabalho descreve uma série de testes efetuados em giroscópios sintonizados SFIM modelo DG2A50P. São descritos os ambientes de testes, os testes em si, suas metodologias e finalidades, com o intuito não só didático e de validação das plataformas, mas também visando a criação de uma bancada de testes onde diferentes leis de controle e componentes da eletrônica possam também ser avaliados.

**ABSTRACT**

This paper describes a series of tests performed on SFIM dry tuned gyros, model DG2A50P. The test environments are described as well as the tests themselves, its methodologies and objectives, aiming not only to increase experience with the equipment and validate the platforms, but also to create a test bench where different control laws and electronic components may be tested.

Keywords: inertial measurement units; gyroscopes; aerospace; attitude control.

**1. INTRODUÇÃO**

Sensores inerciais são equipamentos fundamentais para atividades aeroespaciais; tanto o satélite quanto o lançador requerem o uso de tais sensores para uma estabilização de atitude mais fina. Outras aplicações desses sensores (aviação civil e militar, plataformas marítimas, antenas e radares embarcados e indústria bélica - mísseis e tanques) fazem com que um desenvolvimento para a área aeroespacial preveja, seguramente, também produtos para estas outras.

O Departamento de Mecânica do INPE possui em andamento um projeto que objetiva criar uma infra estrutura para testes de qualificação e de desenvolvimento de plataformas inerciais. A primeira fase do projeto desenvolve uma série de testes em 6 giros marca SFIM, modelo DG2A50P. Estes testes visam uma validação dos giros e também possuem um caráter didático, para a equipe envolvida, para as fases seguintes. Parte desses testes estão sendo desenvolvidos com as placas eletrônicas de potên-

cia e controle em aberto, o que permite o acesso a vários componentes, aumentando a flexibilidade para os testes possíveis de serem aplicados.

**2. CONFIGURAÇÃO DOS AMBIENTES DE TESTES**

**2.1. MESA DE ROTAÇÃO CONTROLADA DE 1 EIXO**

Para uma primeira avaliação, antes de se passar a um ambiente mais completo, foram realizados alguns testes em uma mesa de um eixo de rotação controlada. Estes testes, que serão descritos adiante neste trabalho, foram:

- determinação da estabilidade da deriva,
- determinação do fator de escala e não linearidade,
- Repetibilidade "turn on to turn on"

A mesa de rotação controlada foi desenvolvida no próprio INPE e faz parte do Laboratório de Simulação Física do

Dep. de Mecânica, possuindo as seguintes especificações de projeto: rotação entre 0,02 e 100 rpm, controle de velocidade dentro de 1%, acelerações angulares maiores que 500 graus por segundo quadrado e diâmetro útil da plataforma de 500 mm.

Para aquisição e processamento dos dados foram utilizados: multímetro Fluke 8520A, interface GPIB, microcomputador IBM XT e multiprogramador STD (cartões E/S digital e conversor D/A)

## 2.2. SIMULADOR DE 3 EIXOS

A segunda fase do trabalho está sendo desenvolvida no Laboratório de Integração e Testes - LIT, prédio inaugurado em 1987 e onde serão integrados e testados os futuros satélites brasileiros. Neste prédio, o Dep. de Mecânica possui um simulador dinâmico de 3 eixos de alta precisão fabricado pela Contraves, modelo 53M-2B, um VAX 780, um processador matricial FPS-5410 e interfaces dedicadas para aquisição de dados e controle. Como complementação a este hardware foi desenvolvida uma caixa de acrílico. Nesta caixa foram colocadas régua para medição e tomadas de pontos específicos. Também foi desenvolvido um "rack" possibilitando a excitação e medição, com consequente armazenamento em disco no VAX, de vários dados dos giros. As figuras 1 e 2 mostram o ambiente de testes.

Existem duas configurações básicas de teste na mesa de 3 eixos. Na primeira configuração, as eletrônicas de potência e controle do giro se encontram acondicionadas em uma caixa ("eletrônica fechada"). Só existe acesso aos sinais de velocidade angular e pontos de teste para tensões DC. Com esta configuração só é possível a execução de testes a nível de sistema giro-eletrônica.

Na segunda configuração ("eletrônica aberta"), as ligações entre as placas de potência e controle e o giroscópio, foram realizadas por uma cablagem dedicada. Ao contrário da primeira configuração, as placas da eletrônica se encontram longe do sensor, no rack. Há possibilidade de monitoramento e/ou excitação de todos os sinais entre o giro e a eletrônica através das reguas dispostas na caixa de acrílico e no rack. Além de informação de velocidade angular em dois eixos, os seguintes sinais podem ser monitorados:

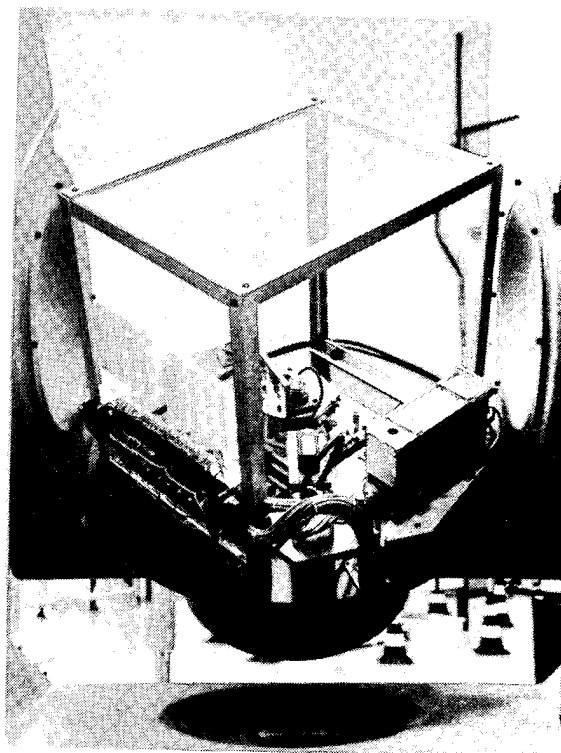


Fig.1: Detalhe do experimento no simulador de 3 eixos

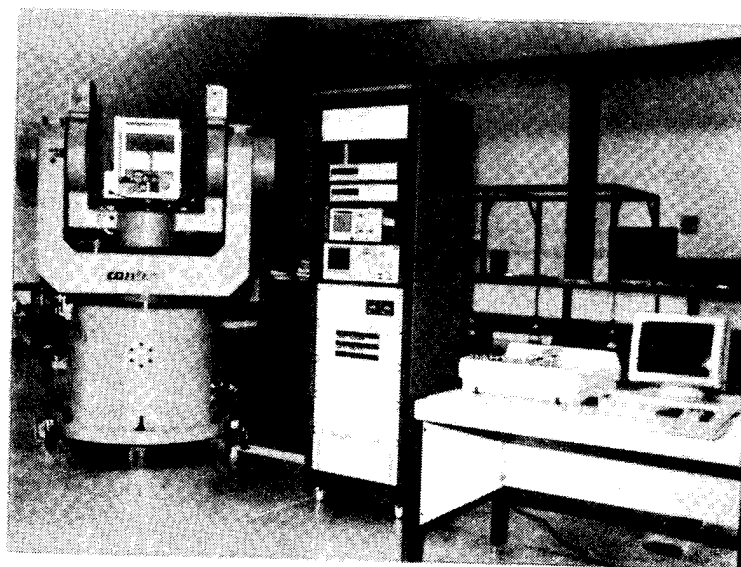


Fig.2: Ambiente de testes com o Simulador de 3 eixos.

- Excitação do motor de spin (3 fases)
- Excitação do pick-off (2 eixos)
- Sinal de temperatura
- Saída modulada do pick-off (2 eixos)
- corrente fornecida para a bobina de torque (2 eixos)

Esta configuração ainda permite que alguns componentes da eletrônica sejam substituídos por outros, como será visto adiante.

O "rack" contém todas as ligações necessárias para as medições, além das interfaces com o simulador, por cabo específico, e com o VAX, por GPIB. As placas de controle e potência também foram nele acondicionadas; os outros equipamentos montados são: horímetros para medida de vida dos giros, multímetro Fluke (capacidade para 3), analisador de espectro, osciloscópio, 2 fontes para alimentação dos giros e régua para monitoramento. O sistema é capaz de operar com 2 giros simultaneamente e, portanto, 4 eixos. O suporte para a colocação dos giros foi especificado no INPE e fabricado externamente.

Espera-se que essa configuração possibilite o teste de diferentes leis de controle e componentes da eletrônica que executem funções existentes nas placa de potência e controle.

### 3. DESCRIÇÃO E METODOLOGIA DOS TESTES

O programa de testes visa não somente qualificar o bloco inercial no que diz respeito a desempenho como também de identificar alguns parâmetros referentes ao giro, importantes no futuro desenvolvimento de uma eletrônica. A metodologia dos testes se encontra disponível na literatura (Sinkewitz, 1974) e foi adaptada para o Hardware disponível.

#### 3.1. ALINHAMENTO BLOCO-MESA

Este Procedimento só pode ser executado na mesa de 3 eixos onde existe alinhamento do eixo x com o norte local. O giro é montado sobre o bloco de alinhamento com possibilidade de ajuste fino azimutal e em inclinação em 2 eixos. O giro deve estar preferencialmente com a malha de rebalanceamento desligada (configuração 2), embora seja possível a execução do teste com a malha de rebalanceamento ligada (configuração 1 ou 2) as custas de uma menor precisão no alinhamento.

O alinhamento pode ser dividido em duas fases. Na primeira, o eixo de spin é alinhado com a vertical local e na segunda um dos eixos sensitivos do giro é alinhado com o norte.

Para o alinhamento do eixo de spin, a mesa é comandada com uma velocidade nominalmente coincidente com o eixo de spin. Se não houver desalinhamento, a saída demodulada do pick-off (para o caso da configuração 2) será oscilatória devido a componente norte da velocidade da terra. Caso contrário, o sinal do pick-off aumentará com o aumento da velocidade da mesa até atingir o nível de saturação. Deve-se portanto ajustar os micrômetros de inclinação até o sinal do pick-off ficar invariante à velocidade da mesa. Este procedimento pode ser efetuado para a malha de rebalanceamento ligada, monitorando-se o sinal de velocidade do giro, sendo a sensibilidade, porém, menor.

O alinhamento em relação ao norte, baseia-se no fato da projeção da velocidade da terra no eixo leste-oeste ser nula. Portanto, com a mesa a uma velocidade nula, a direção leste-oeste é encontrada se para uma rotação de 180 graus em relação ao eixo de azimute, a leitura do giro permanecer inalterada (esta leitura é a derivada inerente ao giro). Outra opção é buscar a leitura máxima ficando então definida a direção norte. Este procedimento deve ser feito com a malha de rebalanceamento ligada.

O sinal de saída em ambos os procedimentos pode ser monitorado através de um registrador x-t.

#### 3.2. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE SINTONIA

Este teste deve ser realizado impreterivelmente com a configuração 2, uma vez que a malha de rebalanceamento deve estar desligada. Devem ser monitorados os sinais demodulados do pick-off, sendo portanto necessário o desenvolvimento de um demodulador. O método baseia-se no fato de que quando é atingida a velocidade de sintonia, os deslocamentos transversais do rotor (medidos pelo pick-off) tem comportamento não oscilatório. Este fato pode ser observado matematicamente através do modelo dos deslocamentos transversais (Sinkewitz, 1974) nas direções x e z não forçados de um rotor girando a uma velocidade N:

$$(A+An/2) \ddot{\theta}_x + (C+An) N \dot{\theta}_y + 2(k-(An-Cn/2) N) \theta_x = 0 \quad (1)$$

$$(A+An/2) \ddot{\theta}_y + (C+An) N \dot{\theta}_x + 2(k-(An-Cn/2) N) \theta_y = 0 \quad (2)$$

onde A, An e C são valores de inércia do rotor-gímbal, k é a constante da mola de torsão. Na condição de sintonia, o efeito dinâmico de rotação anula o efeito da mola de torsão, ou seja:

$$k - (A_n - C_n/2) \cdot N = 0 \quad (3)$$

Logo, na condição de sintonia, os termos de oscilação ( $\theta_x$  e  $\theta_y$ ) nas equações (1) e (2) se anularão. É necessário um gerador trifásico com frequência variável, substituindo este mesmo componente com frequência fixa na eletrônica do giro. Deve-se portan-to registrar os sinais do pick-off ( $\theta_x, \theta_y$ ) para cada frequência do gerador, até a obtenção de uma resposta sem oscilação.

### 3.3. CONSTANTE DE TEMPO

A constante de tempo é um parâmetro característico de sistemas não oscilatórios. Existem vários métodos para sua obtenção. O método adotado consiste em gerar uma oscilação na resposta do rotor com a malha de torqueamento desligada. Como vimos anteriormente, a oscilação pode ser provocada através da excitação do motor trifásico com uma velocidade diferente da velocidade de sintonia. A oscilação permite uma medida mais precisa através dos picos. O sinal demodulado do pick-off pode ser monitorado através de um registrador x-t. A constante de tempo é dada por:

$$\tau = (\ln A_1 - \ln A_2) / (t_2 - t_1) \quad (4)$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são as amplitudes de dois picos consecutivos, enquanto que  $t_1$  e  $t_2$  são os instantes em que os picos são atingidos.

Este teste só pode ser executado com a configuração 2.

### 3.4. FIGURA DE MÉRITO

A figura de mérito é definida como a relação entre inércias do rotor e do gimbal dada por:

$$F_m = (C + A_n) / (A_n + B_n - C_n) \quad (5)$$

Em relação ao desempenho do giro, pode-se afirmar que quanto maior  $F_m$ , o sensor é menos sensível a não sintonia, ou seja a deriva causada devido a condição de não sintonia é pequena.

A figura de mérito pode ser obtida experimentalmente através da seguinte expressão:

$$F_m = T_1 \cdot T_2 \cdot (\Delta N_1 - \Delta N_2) / (2 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_2)) \quad (6)$$

onde:

$T_1, T_2$  - Período de oscilação quando o rotor do giro é colocado em duas velocidades  $N_1$  e  $N_2$  diferentes da velocidade de sintonia (segundo)

$\Delta N_1, \Delta N_2$  - Desvio das velocidades  $N_1$  e  $N_2$  em relação a velocidade de sintonia (Hz)

A instrumentação necessária para a execução deste teste é a mesma dos testes 3.3 e 3.2, e a configuração 2 deve ser usada impreterivelmente.

### 3.5. TESTES COM O FATOR DE ESCALA

Estes testes são a nível de sistema (giro+eletrônica) e podem ser realizados em ambas configurações (1) e (2). O ensaio pode ser realizado também na mesa de 1 eixo onde não há alinhamento fino do bloco.

#### 3.5.1. Valor Nominal

O valor nominal é dado em volt/o/seg. A mesa é comandada em diversas velocidades e a saída do giro é adquirida através de um multímetro fluke interfaceado com o micro (mesa de 1 eixo) ou Vax 780 (mesa de 3 eixos) através da interface GPIB. O fator de escala é obtido através do método dos mínimos quadrados.

#### 3.5.2. Não Linearidade

A não linearidade é definida como o desvio máximo em relação a reta obtida no item anterior. Este valor é adimensionalizado em relação ao fundo de escala.

#### 3.5.3. Estabilidade

Para uma velocidade de entrada alta, é registrada a história da saída do giro para longos períodos (da ordem de 8 horas). É necessário que o equipamento de teste seja bastante estável para a detecção das variações devido ao sensor inercial somente.

#### 3.5.4. Repetibilidade:

O fator de escala é obtido para sucessivas operações de liga-desliga

### 3.6. TESTES COM O PICK-OFF

Estão previstos testes de ajustes do pick-off (equilibrar os off-sets elétricos e mecânicos), determinação dos ângulos de off-set e determinação do fator de escala (volt/mrad) Os testes são realizados com a malha de torqueamento ligada, porém com velocidades diferentes da velocidade de sintonia, devendo ser usada a configuração 2. A instrumentação necessária é a mesma dos testes 3.2, 3.3, 3.4.

### 3.7. TESTE DE MÚLTIPLAS POSIÇÕES:

O teste de múltiplas posições é o mais importante a nível de qualificação do sistema. Neste teste são identificados termos da deriva constante, dependente de  $g$  e  $g^2$ , bem como desalinhamentos e fator

de escala. O modelo de erro de um canal do giro (eixo x) é dado por:

$$\begin{aligned} Kx.Vx = & Wx + Kxy.Wy + Kxs.Ws + D(x)f \\ & + D(x)x.ax + D(x)y.ay + D(x)s.as \\ & + D(x)xx.ax^2 + D(x)yy.ay^2 + D(x)ss.as^2 \\ & + D(x)xy.ax.ay + D(x)xs.ax.as \\ & + D(x)ys.ay.as \end{aligned} \quad (7)$$

onde:

Wx - velocidade real de entrada  
Kx - fator de escala  
Vx - saída do bloco girométrico  
Kxy, Kxz - desalinhamentos  
D(x)f - deriva não sensível a aceleração  
D(x)x, D(x)y, D(x)s - deriva sensível a aceleração nos eixos x, y e de spin  
D(x)xx, D(x)yy, D(x)ss - deriva sensível a aceleração ao quadrado nos eixos x, y e de spin.  
D(x)xy, D(x)xs, D(x)ys - termos cruzados

A equação 7 possui 12 termos a serem estimados. A solução para o problema consiste em excitar o sensor com velocidades angulares e acelerações distintas de modo a constituir um sistema de equações algébricas cujas incógnitas são os parâmetros a serem estimados.

Optou-se por um teste estático, onde as velocidades angulares são provenientes das projeções da velocidade da terra nos eixos x, y e de spin, e as acelerações são as projeções da aceleração da gravidade nos eixos x, y, s. Para facilitar a resolução do sistema, foram selecionadas 24 posições diferentes da mesa de 3 eixos, onde somente 2 eixos são comandados (interno e intermediário). Dentre as posições selecionadas 8 são polares, ou seja, o eixo de spin está alinhado com o eixo norte-sul (eixo de rotação) da terra.

Para cada posição i, são conhecidos os parâmetros axi, ayi, azi, Wxi, Wyi, Wzi e é adquirida através do multímetro, a tensão de saída do bloco girométrico, Vxi. O comando da mesa de 3 eixos é feito remotamente através do VAX-780 e GPIB. Devido a geometria do teste, o parâmetro D(x)yy não pode ser estimado.

É importante notar que alguns parâmetros (Kx e Kxy) são identificados em outros testes (3.5 e 3.6) sendo portanto de grande importância para a validação da metodologia de teste. Este ensaio pode ser efetuado com as configurações 1 e 2.

### 3.8. ESTABILIDADE DA DERIVA

Um aspecto bastante importante a ser analisado em sensores inerciais é a quantificação da estabilidade da deriva. Este fenômeno se manifesta para tempos de navegação longos. É importante a previsão do valor da deriva constante após um dado

tempo de voo. A deriva de longa duração pode ser modelada como um termo determinístico de rampa que depende somente das condições de teste (não é característica inerente ao giro), um termo estocástico de "random walk" e um ruído de alta frequência modelado como ruído branco dentro da frequência de amostragem. A equação do erro devido a variação do valor nominal da deriva é dado por:

$$e = sw.n(t) + \int_0^t sr.m(u).du + R.t \quad (8)$$

onde sw é o desvio padrão do ruído branco, sr é o desvio padrão do ruído branco que integrado gera o processo de "random walk" e R é a inclinação do termo de rampa. As funções m(t) e n(t) são os processos de ruído branco Gaussiano não correlacionados com média nula e variância unitária,

O teste consiste em adquirir o sinal de saída do sensor por um longo tempo, com a mesa em repouso e sem necessidade de alinhamento. Foi desenvolvido um algoritmo (Gandelman & Ribeiro, 1989) para o processamento dos dados do giro, estimando os parâmetros sw, sr e R.

Este teste pode ser realizado com as duas configurações e nas mesas de 1 ou 3 eixos.

### 3.9. REPETIBILIDADE DA DERIVA EM RELAÇÃO A SUCESSIVAS OPERAÇÕES DE LIGA E DESLIGA

Este parâmetro é bastante importante quando é necessário desligar e ligar o sensor em voo. O sensor é ligado e depois da estabilização do rotor na velocidade de sintonia, é adquirido o sinal de saída e a média das leituras é computada (no caso, o próprio multímetro dispõe deste recurso, não sendo necessário a interface com o computador). O giro é então desligado. O processo é repetido várias vezes e a variação máxima entre as leituras é registrada. Este teste pode ser realizado nas duas configurações e na mesa de 1 ou 3 eixos.

### 3.10. IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORÍTMOS DE CONTROLE DE REBALANCEAMENTO

Uma das finalidades do sistema de testes é a possibilidade da implementação de diversos algoritmos de controle substituindo o existente na placa de controle. Existem vários algoritmos de controle da malha de rebalanceamento (e.g. Ribeiro, 1987), bem como diferentes opções para implementação (e.g. Ribeiro, 1988). Existe ainda a possibilidade da implementação das leis de controle em software no VAX assistido por um processador matricial com interface paralela. Para a implementação das leis de controle é necessário um demodula-

dor e um driver de corrente para cada eixo.

#### 4. RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS

Até o momento, foram realizados somente testes na mesa de um eixo (Gandelman & Durão, 1989). O sistema de testes para a mesa de 3 eixos já foi testado para a configuração 1, com os testes sendo iniciados brevemente.

Foram realizados na mesa de 1 eixo, testes de fator de escala, não linearidade, estabilidade e repetibilidade da deriva.

No teste de fator de escala e não linearidade, uma dificuldade adicional, se deveu ao fato da mesa de 1 eixo não operar em malha fechada. Logo, a velocidade angular média foi medida através da derivação numérica da leitura de um codificador ótico incremental de 100.000 pontos/volta. Apesar da imprecisão da velocidade instantânea, a velocidade média pode ser considerada bastante confiável. Obtiveram-se valores para o fator de escala e não linearidade dentro dos limites especificados pelo fabricante.

Para a identificação da estabilidade da deriva, foi realizado um teste estático de 24 horas com taxa de amostragem de 0.2 Hz. A história do teste é mostrada na figura 3. Pode-se observar que o ruído branco está superposto a um outro processo lento, que caracteriza a instabilidade da deriva. O processamento dos dados pelo algoritmo de estimação forneceu os seguintes parâmetros:

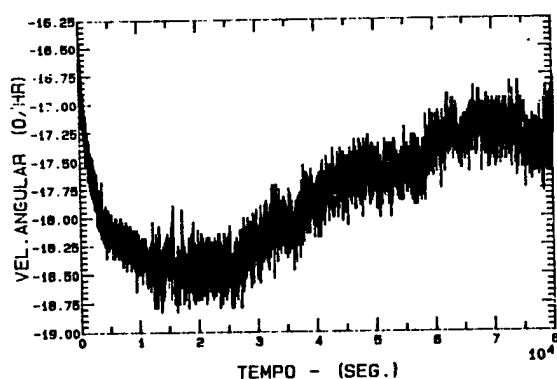


Fig. 3: História do teste estático de 24 horas

sw = 0,11 o/hora

-3

sr = 1,23.10 o/hora/seg

O valor obtido para o ruído branco se encontra dentro do estabelecido pelo fabricante. O valor do desvio padrão do "random walk" (sr) para sensores com qualificação espacial se situa na ordem de  $10^{-5}$  o/hora/seg (Wertz, 1978), de modo que o valor encontrado é razoável por se tratar de um sensor com qualificação militar, onde o tempo de navegação exigido é bem menor.

O teste de repetibilidade da deriva forneceu um valor 0,9 o/hora como variação máxima entre operações de liga-desliga.

#### 5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvida uma infra-estrutura e metodologia de testes para sensores inerciais. Os testes tem a finalidade não somente de identificar parâmetros referentes ao desempenho da plataforma, (cuja importância é prever o comportamento e compensar a priori alguns erros), mas também de identificar parâmetros inerentes ao giro (sem a eletrônica). A bancada de testes apesar de desenvolvida para os giros da SFIM existentes no departamento, pode com pequenas modificações ser aplicada em outros giros. Foram realizados alguns testes na mesa de 1 eixo com resultados satisfatórios

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gandelman, G., Ribeiro, J.F., "Modelagem e Estimação de Parâmetros em Sensores Inerciais", Anais do X COBEM, Rio de Janeiro, 1989.
- Gandelman, G., Durão, O.S.C., "Testes com Giroscópios em Mesa de Rotação Controlada", Relatório interno do DEM-INPE, 1989
- Ribeiro, J.F., "AS Diferentes Opções para a Malha de Rebalanceamento Eletrônico de um Giroscópio tipo "Floated" Usado em uma Plataforma "Strapdown", INPE-NTI-004/88, 1988
- Ribeiro, J.F., "Um Regulador LQG para os Deslocamentos Angulares do Rotor de um Giroscópio Sintonizado", Anais do IX COBEM, Florianópolis, 1987
- Sinkewitz, J.S., Feldman, J; Lory, C.B., "Evaluation of Selected Strapdown Inertial Instruments and Pulse Torque Loops", NASA, GR 120427, 1974
- Wertz, J.R., Spacecraft Attitude Determination and Control, London, D. Reidel, 1978