

Caracterização e Testes de Giroscópios para Satélites Artificiais

Carlos Alberto Santoro

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos – S. P.
santoro@dem.inpe.br

Paulo Giacomio Milani

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos – S. P.
milani@dem.inpe.br

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais São José dos Campos – S. P.
marcelo@dem.inpe.br

Resumo. O propósito deste trabalho é apresentar um sistema de testes e caracterização de giroscópios para aplicações em navegação inercial. A metodologia usada será adaptada de testes já consagrados pelo uso das normas internacionais do IEEE e baseada em um sistema já implantado no passado recente no INPE. Atualmente em andamento, o trabalho está no início de sua fase de implementação.

Palavras chave : Giroscópios, Caracterização e Testes, Guiagem Inercial.

1. Introdução

O objetivo deste trabalho é implementar um sistema de testes de caracterização de giroscópios, seguindo normas e a infraestrutura disponível na Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC do INPE. A justificativa para este reside na necessidade de implementar e disseminar métodos de caracterização e testes de giroscópios para satélites artificiais no Brasil e, em particular, na DMC, para eventual uso em plataformas de navegação inercial, em satélites artificiais e em plataformas de microgravidade.

Um giroscópio pode ser definido como um instrumento sensível à mudança na orientação de seu momento angular em relação a um referencial inercial. O seu funcionamento obedece às leis de Newton para a mecânica de rotação. Na sua forma mais simples, consiste de um rotor girando em alta velocidade cujo eixo é montado em mancais livres de atrito permitindo ao eixo de rotação manter-se estacionário em relação a um referencial inercial enquanto o veículo ao qual o mancal externo está fixado move-se livremente.

Alguns giroscópios existem na natureza, tais como a Terra girando em torno de seu próprio eixo e o “halteres”, um par de massas vibrantes que lembram um diapasão, comum em muitos insetos voadores.

Em 1774 (Cochin, 1963) o giroscópio já servia como um horizonte artificial que permitia aos navegadores o uso do sextante mesmo quando não era possível visualizar o horizonte. Em 1852 (Wrigley, 1969), Léon Foucault construiu um aparelho, um pêndulo com 67 m de comprimento e com 28 kg de massa, resultando em um período de oscilação de cerca de 15 segundos, sensível o bastante para demonstrar a rotação da Terra. Também foi Foucault quem cunhou (Lawrence, 1993) a palavra *giroscópio*, do grego “*gyros*” (rotação) e “*skopein*” (ver); em 1896 um giroscópio foi pela primeira vez usado para guiagem em um torpedo por Obry. Em 1911 Elmer Sperry aperfeiçoou o *gyrocompass*, um aparelho que se posiciona em ângulos retos com o eixo de rotação da Terra. Desde então, novos tipos de suspensão e a redução de perturbações internas têm melhorado o desempenho dos giroscópios por várias ordens de grandeza.

Atualmente, os giroscópios encontram aplicações sempre que for necessário conhecer os ângulos descritos pela rotação de um veículo ou plataforma (navegação inercial).

2. Conceitos Básicos

Giroscópio: Instrumento ou aparelho que fixado à uma base (ou veículo), permite conhecer o ângulo descrito pela rotação desta base (ou veículo) em relação ao espaço inercial.

Espaço Inercial: Um sistema de referência que está imóvel relativamente às estrelas no firmamento. Um giroscópio mantém sua orientação ou fornece uma medida da sua rotação, sempre em relação a um sistema de referência inercial. Como a rotação da Terra não pode ser negligenciada na maioria dos casos de interesse, esta não pode ser considerada como um referencial inercial nestes casos.

Drift ou Deriva Giroscópica: É o desvio (indesejado) do eixo de *momentum* da sua posição de referência.

Pickoff: Instrumento de medição que permite medir ângulos de rotação.

Fator de Escala: Razão entre a variação do sinal de saída pela variação do sinal de entrada (Lawrence, 1993), usualmente expresso como na Eq. (1).

$$K = S/I$$

(1)

onde K representa o fator de escala, S o sinal de saída e I o sinal de entrada.

Meru ou *Mili Earth Rate Unit*: É uma unidade comumente usada para se medir a deriva giroscópica. Equivale a um milésimo da velocidade de rotação Terrestre (aproximadamente 0,015 °/h).

3. Tipos de Giroscópios

Existem diversos tipos de giroscópios (segundo Cochin, 1963; Lawrence, 1993 e Wrigley, Hollister e Denhard, 1969), cada um deles encontrando uma aplicação particular. Diversas classificações são possíveis conforme o **elemento de momentum**, o **número de eixos** ou o **tipo de suporte**.

Quanto aos giroscópios usados em aplicações espaciais, podemos citar o **SDFG** (*Single Degree of Freedom Gyroscope*), o **DTG** (*Dynamically Tuned Gyroscope*), o **RIG** (*Rate Integrating Gyroscope*), o **FG** (*Float Gyroscope*) e o **FOG** (*Fiber Optic Gyroscope*).

3.1 Giroscópio SDFG

O *Single Degree of Freedom Gyroscope* (Fig. 1) possui um de seus graus de liberdade deliberadamente suprimido. Há dois tipos a considerar: o *rate gyro* ou giroscópio de velocidade e o *rate integrating gyro* ou giroscópio integrador. O primeiro tem como saída um ângulo proporcional à velocidade que lhe impõem em seu eixo de entrada. Já o segundo responde com um deslocamento em torno de seu eixo de saída quando se aplica um deslocamento angular em torno de seu eixo de entrada.

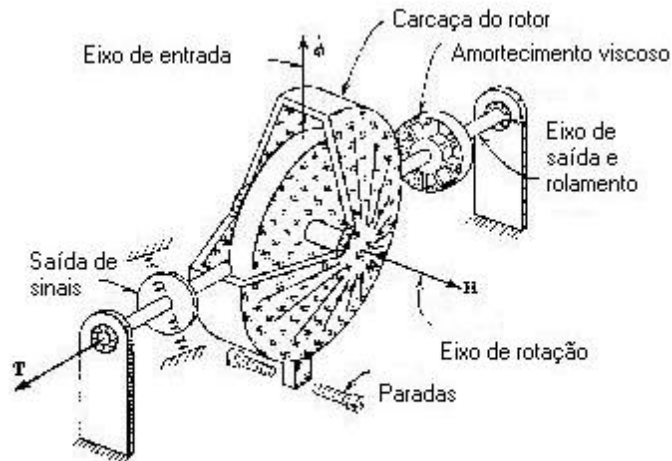
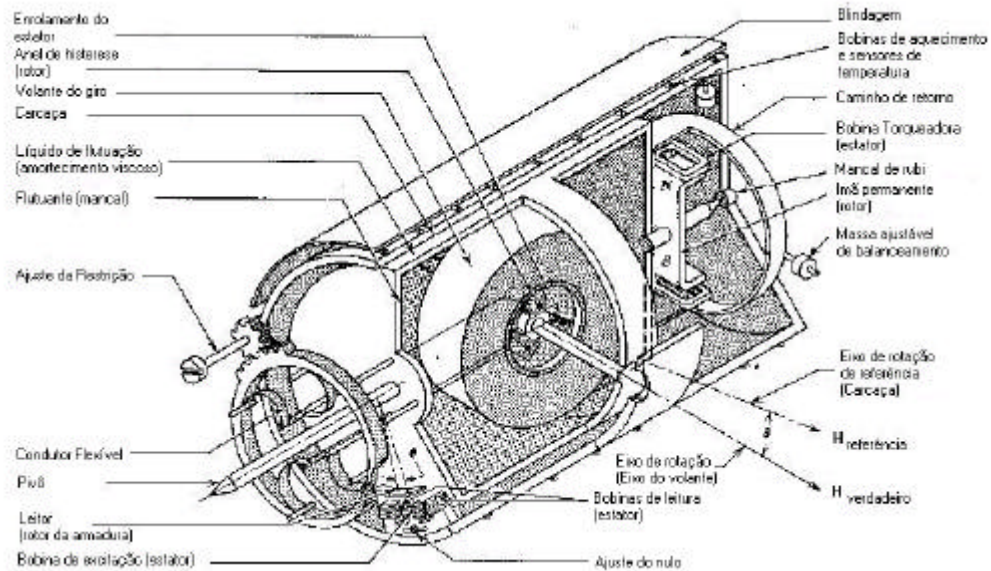


Figura 1. Giroscópio com um grau de liberdade (Cochin, 1963).

3.2 Float Gyroscope

É basicamente a mesma montagem do SDFG mas com o conjunto imerso num fluido. Devido ao empuxo, a carga sobre o eixo de saída é reduzida a um valor muito pequeno (Fig. 2).

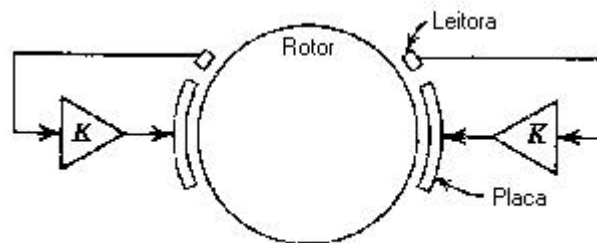
Neste caso, os mancais do *gimbal* podem ser substituídos por *pivots* bem menores. O líquido e o pequeno diâmetro dos *pivots* reduzem drasticamente o torque de fricção sobre o eixo de saída. O líquido flutuante é um óleo com uma alta viscosidade que preenche completamente o espaço entre a armadura e o corpo flutuante do giroscópio. A densidade do fluido é alta o suficiente para contrabalançar o peso estático do flutuante, desta forma deixando os mancais de saída livres de quaisquer reações produzidas por fricção senão aquelas necessárias para orientar o giroscópio. Usa-se um óleo altamente estável com uma alta viscosidade. É desejável que as suas densidade e viscosidade não variem muito com a temperatura. O fluido ainda serve para proteger a montagem contra choques e vibrações além de diminuir seu tempo de resposta. O rotor é uma parte integrante do motor e sua massa pode variar de 90 gramas até 2 Kg. Essa massa é concentrada principalmente no exterior do rotor. A potência para o motor é fornecida através de condutores flexíveis na forma de fitas curvadas, chamadas *flex leads*. A armadura é um cilindro hermeticamente selado feito de um material com alta condutividade térmica. Sensores são usados para controlar a temperatura do giroscópio.



EMBEDFigura 2. Giroscópio Flutuante (Cochin, 1963).

3.3 Giroscópio em Suspensão Eletrostática

Outro tipo de suspensão bastante usada em embarcações navais (submarinos) onde potência elétrica não é uma restrição, é a **suspensão eletrostática** que faz uso da força de atração entre corpos carregados eletricamente. O rotor e a sua proximidade do estator formam as placas de um capacitor através do qual é aplicado uma alta voltagem AC. Cargas elétricas iguais e de sinais contrários nas duas placas provocam o aparecimento de uma força de atração entre as placas que mantém o rotor suspenso, centrado e livre de atrito (Fig. 3).



EMBEDFigura 3. Rotor Suspenso Eletrostaticamente (Cochin, 1963).

3.4 Giroscópio de Fibra Óptica

O *Interferometric Fiber Optics Gyroscope* ou **IFOG** (segundo Lawrence, 1993) tem seu princípio de funcionamento baseado no interferômetro de Sagnac. A luz proveniente de uma fonte (Fig. 4) é dividida em dois feixes que percorrem uma fibra óptica em forma de bobina em direções opostas.

Quando os feixes de luz são recombinados e espalhados, uma parte volta para a fonte e outra parte passa por um detector que medirá sua intensidade. Essa intensidade será uma medida da interferência entre os feixes e portanto da velocidade de rotação da bobina neste plano. Cuidados especiais devem ser tomados pois a intensidade do feixe pode variar devido a outros fatores (tais como uma variação da intensidade da fonte de luz devida, por exemplo, à variação de temperatura).

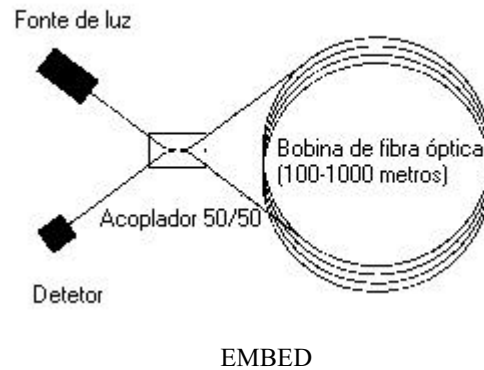


Figura 4. Princípio de funcionamento do Giroscópio de Fibra Óptica (Lawrence, 1993).

3.5 Giroscópio Sintonizado Dinamicamente (*Dynamically Tuned Gyroscope*)

Também chamado de *Dry Tuned Gyro* ou simplesmente **DTG**, tem sua origem nos anos 40 (Lawrence, 1993) na Escócia, quando foi projetado um giro que usava um volante montado sobre uma junta universal. O giro mostrou-se surpreendentemente instável. Mais tarde isto foi demonstrado (Howe e Savet, 1964) ser devido ao efeito da dinâmica do *gimbal* na junta universal.

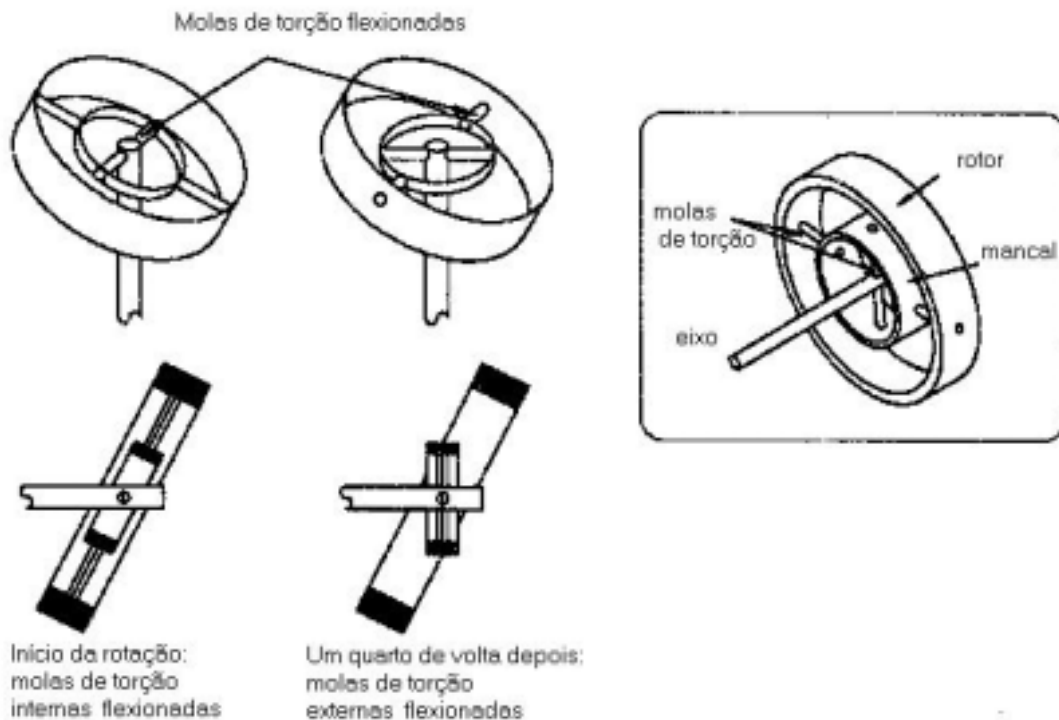


Figura. 5. Giroscópio DTG (Lawrence, 1993).

A Figura 5 mostra as partes rotativas de um DTG consistindo de um rotor, molas de torção, um *gimbal* e um eixo acionado por um rotor. Os parâmetros principais são: a rigidez da mola de torção, momento de inércia do *gimbal* e a velocidade de rotação. O *gimbal* não precisa necessariamente ser um anel. Suponha-se que o momento de inércia do rotor seja muito maior que o do *gimbal*, como ocorre de fato na prática. Se o eixo de rotação estiver alinhado com o seu eixo de acionamento, conforme o conjunto do rotor girar (acionado por um motor através do eixo) o *gimbal* irá girar sem retorcer as molas de torção. Entretanto, se o rotor for deslocado de tal forma que o eixo de rotação esteja a um ângulo fixo em relação ao seu eixo de acionamento, o *gimbal* irá cambalear (oscilar) pois está ligado a ambos, rotor e eixo de acionamento, por molas de torção que podem se retorcer, mas não podem curvar. Deste modo, em uma posição o plano do *gimbal* é forçado a ser normal ao eixo de acionamento enquanto que, um quarto de volta mais tarde é forçado a estar no plano do rotor (Fig. 5). O efeito deste cambaleio é duplo: a) torce as molas de torção e produz um torque devido à sua constante de mola positiva; b) Fornece velocidade angular ao *gimbal* que, devido ao momentum angular

que o mesmo possui de sua inércia polar e *rotação*, gera torques de precessão giroscópica. Esses torques, por sua vez, agem como uma mola negativa sobre os eixos do *pivot*, cancelando o torque devido à mola de torção na velocidade de sintonia (*tuned speed*). As equações para as condições de sintonia foram descritas por Howe e Savet (1964), Craig (1972) entre outros.

Os DTGs, por serem “secos”, apresentam bom desempenho em uma faixa de temperatura mais ampla que a coberta pelos SDFGs, apesar destes terem menor quantidade de fontes de erro e menor deriva. A eletrônica para um DTG é mais complicada que a de um SDFG, fato cada vez menos importante com o desenvolvimento da eletrônica nas últimas décadas.

4. Testes

4.1 Objetivo dos testes

Segundo Cochlin (1963) os testes têm por finalidade fornecer dados que serão típicos para toda vida útil do giroscópio. Os testes precisam ser extensivos o suficiente para fornecer dados confiáveis, sem entretanto comprometer demasiadamente a vida útil do giro no processo.

4.2 Tipos de Testes

Os testes para giroscópios podem estar sujeitos a diversas classificações: **Testes Anti-Falhas:** Durante a fabricação, erros grosseiros são encontrados e corrigidos, ajustes são feitos e o instrumento é preparado para a montagem final. **Calibração:** Ajustes finos, polarização, o fator de escala do torqueador e outros dados são determinados. **Testes de Desempenho:** O giro é avaliado por seu desempenho simulando-se condições de uso.

4.2.1 Testes para IFOGs

Para giroscópios a laser com eixo único, temos os seguintes testes descritos pelo *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*:

- Exame mecânico do produto;
- Resistências de isolamento;
- Impedâncias;
- Teste de vazamentos;
- Tempo de ativação;
- Tempo de aquecimento;
- Polaridade;
- Série de testes para fator de escala do giro;
- Testes de velocidade de entrada;
- Polarização (*Bias*);
- Velocidade de deriva aleatória;
- Desalinhamento.

4.2.2 Testes para DTGs

Para os DTGs, os testes de aceitação, segundo normas do *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* são:

- Exame do produto do ponto de vista mecânico;
- Exame do produto do ponto de vista elétrico;
- Teste de vazamentos;
- Polaridade;
- Temperatura de operação;
- Testes de *pickoff*;
- Testes do torqueador;
- Deteção da rotação do rotor;
- Rotação* do motor;
- Alinhamento dos eixos;
- Parada limite;
- Constante de tempo dinâmica do giro;
- Velocidade de sintonia;
- Aceleração;
- Aceleração quadrática;
- Velocidade de deriva aleatória;
- Ruído de saída.

Os giroscópios DTGs, diferentemente dos SDFGs, possuem dois eixos de entrada aos quais respondem. Entretanto, seus procedimentos de testes são muito similares. Para obter os coeficientes de deriva parte-se do modelo do *IEEE* e escreve-se (Eq. 2) um modelo simplificado para erro estático para os eixos x e y em termos dos fatores de escala K_x e K_y e os sinais de saída S_x e S_y :

$$\begin{aligned} S_x/K_x &= \Omega_x + B_x + D_{xx}a_x + D_{xy}a_y \\ S_y/K_y &= \Omega_y + B_y + D_{yy}a_y + D_{yx}a_x \end{aligned} \quad (2)$$

Onde Ω_x , Ω_y representam a velocidade de rotação inercial; B_x , B_y representam polarizações (*biases*), não sensíveis gravimetricamente; $D_{xx}a_x$, $D_{yy}a_y$ representam desbalanceamentos de massas e $D_{xy}a_y$, $D_{yx}a_x$ estão representando a quadratura dos desbalanceamentos de massas. Os termos D_{ab} devem ser lidos como: “a deriva sobre o eixo a causado por uma aceleração unitária ao longo do eixo b ”. As acelerações a_x e a_y incluem a da gravidade. Podemos medir estes coeficientes do modelo usando o teste de oito posições descrito a seguir. Repetindo-se o teste periodicamente pode-se ter informações sobre a estabilidade do giro.

4.2.2 A Influência da Orientação nos Testes

Rotação da Terra: A Terra gira em torno de seu próprio eixo em um dia sideral, equivalente a 23 horas, 56 minutos e 4,1 segundos. A velocidade de rotação sideral é portanto dado pela Eq. 3.

$$\omega_e = 360^\circ / (23\text{h } 56\text{min } 4,1\text{s}) \cong 15,041^\circ/\text{h} \quad (3)$$

Se λ representa a latitude do local de realização dos testes, as componentes da rotação da Terra serão conforme a Fig. 6. e as Eqs. 4.1 e 4.2.

$$\omega_{eh} = \omega_e \cos \lambda \quad (\text{Componente Norte}) \quad (4.1)$$

$$\omega_{ev} = \omega_e \sin \lambda \quad (\text{Componente Vertical}) \quad (4.2)$$

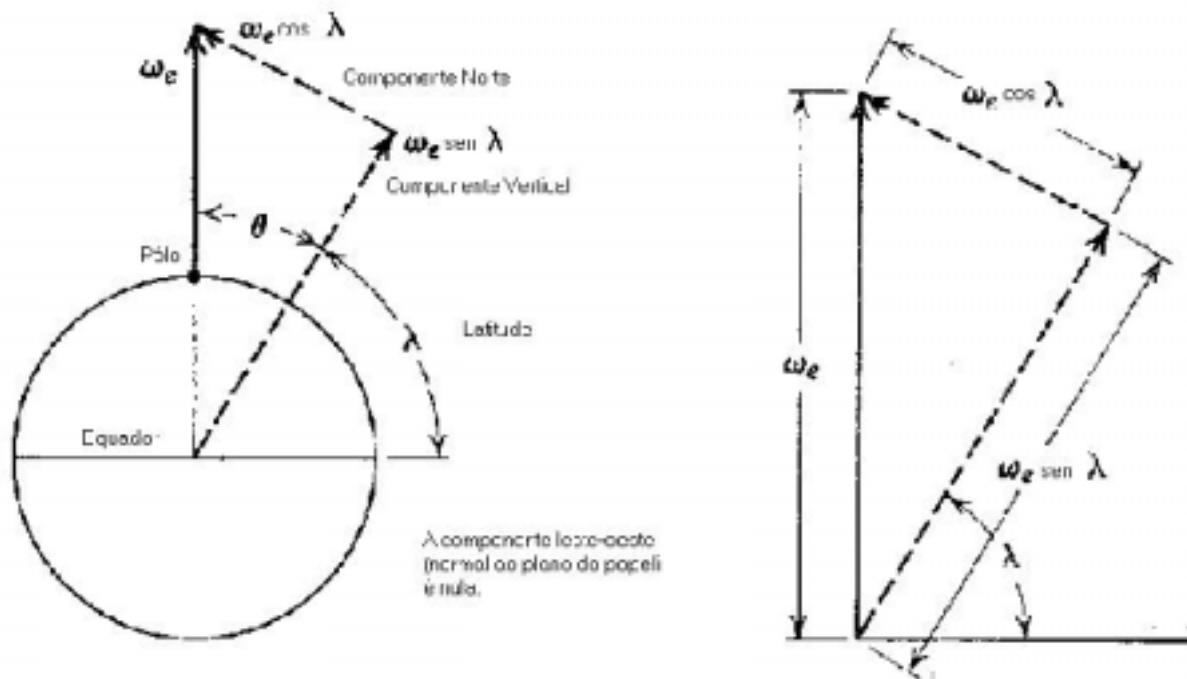


Figura 6. Componentes da Rotação Terrestre (Cochin, 1963).

Rotação da Terra como uma entrada de velocidade angular: A velocidade de rotação da Terra pode funcionar como uma entrada de velocidade angular quando o conjunto do giroscópio é preso ao solo e, portanto, gira junto com a Terra (Figura 7). A saída w em torno do eixo de saída Q é portanto dada pela Eq. 5, onde H representa o momentum angular do giro, D representa o coeficiente de amortecimento e f a velocidade angular de entrada.

$$w = (H/D) f \cos \alpha \quad (5)$$

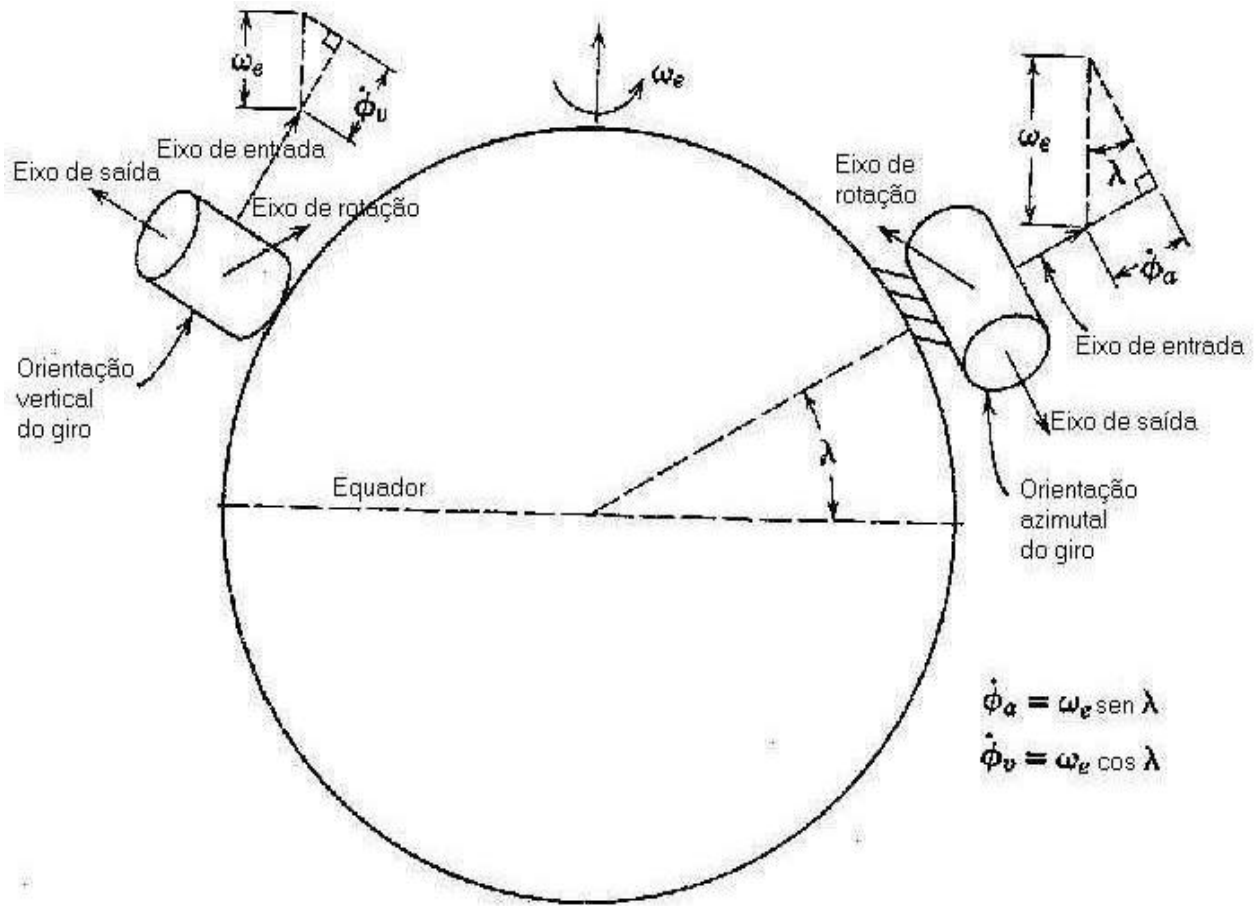


Figura 7. A Rotação da Terra como uma entrada angular (Cochin, 1963).

Para a orientação azimuthal, a componente da rotação da Terra presente no eixo de entrada do giro $\bar{f}_a$ será dada pela Eq. 6 e, portanto, a saída Q_t será como dado na Eq. 7.

$$\bar{f}_a = \omega_e \sin \lambda \quad (6)$$

$$Q_t @ (H/D) \omega_e \sin \lambda \quad (7)$$

Onde Q é geralmente pequeno de forma que $\cos Q \cong 1$. Pelo mesmo motivo, para a orientação vertical, com o eixo de entrada apontando para o norte, o giro estará sujeito à orientação Norte-Sul da rotação da Terra (Eq. 8).

$$Q @ (H/D) \omega_e \cos \lambda \quad (8)$$

Giroscópio Rotativo sobre a Terra

Se um giro for montado em uma mesa livre de fricção, ele manterá sua orientação em relação a um **referencial inercial**, e portanto **aparentará** girar em relação à Terra. Esta **deriva aparente** será dada pela componente da rotação da Terra ao longo do eixo de entrada do giro.

4.2.2 Teste de Oito Posições

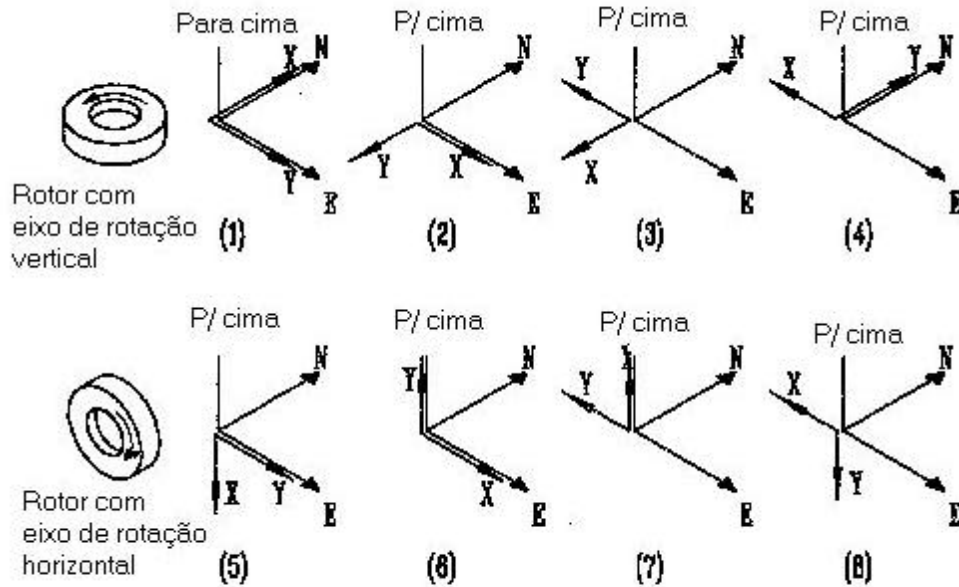


Figura 8. Teste das Oito Posições (Lawrence, 1993).

No teste estático, o giroscópio é movido através de oito posições e as leituras das saídas x e y são tomadas em cada posição. As oito posições são ilustradas na Figura 8.

EMBEDOs testes são agrupados em dois grupos de quatro. No primeiro grupo o giro é posicionado com o eixo de rotação (SA) para cima e os dados são tomados com o eixo x apontando consecutivamente para Norte, Leste, Sul e Oeste. Em seguida o giroscópio é girado de forma que seu SA aponte para o Sul e o eixo x então é apontado para baixo, para Leste, para cima e para Oeste. Esta sequência é escolhida de forma que o giroscópio não esteja sujeito a rotações em torno do IA (que não a rotação da Terra) durante o teste, exceto quando movendo da posição 4 para a posição 5, que deve ser feito cuidadosamente para não exceder os limites da velocidade de entrada do servo. Os tempos de aquisição de dados em cada posição devem ser selecionados para se obter uma precisão suficiente nos coeficientes a serem determinados, que dependerão do ruído aleatório do giro e da largura de banda da malha. Tipicamente são suficientes dois minutos em cada posição. Este teste tem a característica de separar os termos que dependem e os que não dependem da gravidade. Assim, nas quatro primeiras posições os eixos x ou y não apontam para cima ou para baixo. Desta forma, tem-se um *bias* e um fator de escala de baixa velocidade (usando-se a rotação da Terra como uma entrada) para as 4 primeiras posições. Das últimas 4 posições tem-se outra leitura de *bias* e os desbalanceamentos de massas. Os dados podem ainda servir para acusar os desalinhamentos de eixos. Precisa-se também corrigir o valor da aceleração gravitacional local caso se esteja medindo coeficientes de desbalanceamento de massas com maior precisão.

Assumimos por simplicidade que os eixos do giro são ortogonais e alinhados à mesa de testes, que por sua vez está nivelada e alinhada com o Norte verdadeiro. Escrevendo os sinais de saída x e y nas posições n (x_n, y_n) como função das velocidades de entrada, teremos o conjunto de equações mostrado na Tab.1.

Tabela 1: Conjunto das equações para o Teste das 8 Posições

Posição 1	$K_x x_1 = B_x + \Omega_{eh}$	$K_y y_1 = B_y$
Posição 2	$K_x x_2 = B_x$	$K_y y_2 = B_y - \Omega_{eh}$
Posição 3	$K_x x_3 = B_x - \Omega_{eh}$	$K_y y_3 = B_y$
Posição 4	$K_x x_4 = B_x$	$K_y y_4 = B_y + \Omega_{eh}$
Posição 5	$K_x x_5 = B_x + D_{xx} - \Omega_{ev}$	$K_y y_5 = B_y + D_{yx}$
Posição 6	$K_x x_6 = B_x - D_{xy}$	$K_y y_6 = B_y - D_{yy} + \Omega_{ev}$
Posição 7	$K_x x_7 = B_x - D_{xx} + \Omega_{ev}$	$K_y y_7 = B_y - D_{yx}$
Posição 8	$K_x x_8 = B_x + D_{xy}$	$K_y y_8 = B_y + D_{yy} - \Omega_{ev}$

Por simples manipulação algébrica, podemos chegar aos dados mostrados na Tab. 2.

Tabela 2: Equações para o Teste das 8 Posições.

$K_x = 2 \Omega_{ch} / (x_1 - x_3)$
$K_y = 2 \Omega_{ch} / (y_4 - y_2)$
$B_x = \frac{1}{2} K (x_1 + x_3) = \frac{1}{2} K (x_2 + x_4) = \frac{1}{2} K (x_5 + x_7) = \frac{1}{2} K (x_6 + x_8)$
$B_y = \frac{1}{2} K (y_1 + y_3) = \frac{1}{2} K (y_2 + y_4) = \frac{1}{2} K (y_5 + y_7) = \frac{1}{2} K (y_6 + y_8)$
$D_{xx} = \Omega_{cv} - \frac{1}{2} K (x_7 - x_5)$
$D_{yy} = \Omega_{cv} - \frac{1}{2} K (y_6 - y_8)$
$D_{xy} = \frac{1}{2} K (x_8 - x_6)$
$D_{yx} = \frac{1}{2} K (y_5 - y_7)$

5. Infraestrutura de Testes

Para a realização destes testes dispõe-se de vários equipamentos e/ ou facilidades existentes no Laboratório de Simulação (LabSim), tais como: sistema de aquisição de dados, eletrônica (ou bancada) de acionamento de giroscópios, simulador de movimentos rotativos, cubo de testes para giroscópios, geradores de sinais de precisão e analisador de espectro. Desses equipamentos apresentam-se os principais a seguir.

5.1 Simulador de Movimentos

O Simulador é de fundamental importância na infra-estrutura de testes. No presente caso, dispõe-se de um simulador de movimento em três eixos manufaturado pela *Contraves Goerz Corporation* modelo 53M2-30H e adquirido pelo INPE em 1985. Trata-se basicamente de um simulador com três graus de liberdade, com controle de posição angular e velocidade de rotação em torno de seus três eixos com precisão de posicionamento de 10^{-4} graus. O controlador para o Simulador permite que ele seja operado em malha aberta (a) ou em malha fechada (b):

(a) Em malha aberta, a plataforma de testes pode ser comandada em posição ou em velocidade; através do teclado do console de controle.

(b) Em malha fechada, o servo-módulo da plataforma pode ser usado para escravizar esta última a um sinal de comando externo. No caso de testes com giroscópios a plataforma é escravizada ao próprio sinal de saída do giro. Também é possível usar o sinal de saída para alimentar uma malha de controle que forneça correntes restauradoras ao torqueador do giroscópio.

A faixa de velocidades angulares de interesse para alguns testes de giroscópios é extremamente baixa, bem abaixo da velocidade de rotação da Terra. Como consequência, já que o giroscópio é um instrumento sensível à rotação, sua orientação em relação ao eixo de rotação terrestre precisa ser conhecida precisamente em todos os instantes. A plataforma de testes do simulador de movimentos deve ser alinhada cuidadosamente com o eixo de rotação da Terra. O eixo de azimute é alinhado com a vertical local e o eixo de elevação é alinhado horizontalmente com a direção Leste-Oeste. Este arranjo permite que uma rotação em torno do eixo de elevação mova o eixo de Azimute no plano vertical Norte-Sul. Testar o giro nas três orientações (0° , 45° , 90°) fornece dados para determinar todas as três componentes da deriva fixa de um giroscópio, entretanto a componente apropriada da rotação da Terra precisa ser levada em conta em cada orientação.

5.2 Cubo de Testes

Trata-se de um dispositivo na forma de uma estrutura cúbica com as arestas perfeitamente ortogonais onde pode ser montado o giro sob testes. Além de permitir o alinhamento preciso dos eixos do sensor, sua construção permite o controle de temperatura do giroscópio.

5.3 Eletrônica (ou Bancada) de Acionamento de Giroscópios

Este equipamento consiste de um *rack* com diversos equipamentos para acionamento do motor do giro na sua frequência de sintonia (DTG), assim como uma eletrônica dedicada que permite o fechamento da malha de controle do giro. Essa eletrônica é de propósito geral e serve para diversos tipos de giros diferentes.

5.4 Requisitos de Alinhamento

Pelos motivos já citados de dependência da orientação com o eixo de rotação da Terra no funcionamento dos giroscópios, é necessário conhecer com a maior precisão possível a orientação Norte-Sul no local de realização dos testes. Para tanto, o INPE dispõe de marcos geodésicos que permitem orientar o simulador segundo essa direção. A direção para o alinhamento é obtida no exterior do prédio, referenciando-se a marcos geodésicos pré existentes e às estrelas e, então é transferida para o interior do prédio para onde o simulador de movimentos se encontra, local onde efetivamente serão realizados os testes.

6. Trabalhos Desenvolvidos/Estado Atual

Cabe ressaltar que o INPE já possuiu um sistema de caracterização de giros mas que foi desativado em passado recente. Esse sistema utilizava um computador Vax 11/780 e multímetros de precisão para a coleta de dados, além do simulador referido anteriormente. No momento se estão desenvolvendo novos programas de controle do simulador e de aquisição de dados de acordo com os procedimentos apresentados neste trabalho. Esse desenvolvimento permitirá obter um sistema de caracterização em uma arquitetura mais barata e, ainda assim atual, utilizando para isso um computador IBM-PC de última geração, uma interface em hardware para controle do simulador, uma interface em software para acionamento da interface e um conjunto de programas em linguagem tipo MATLAB a serem executados em ambiente OCTAVE ou equivalente

7. Referências

- Cochin, Ira. “**Analysis and Design of the Gyroscope for Inertial Guidance**”, *John Wiley and Sons, Inc., New York – London, 1963.*
- Lawrence, Anthony; “**Modern Inertial Technology**”, *Springer-Verlag New York, Inc., EUA, 1993.*
- Wrigley, W.; Hollister, W. M.; Denhard, W. G.; “**Gyroscopic Theory, Design and Instrumentation**”, *The M.I.T. Press, Cambridge, EUA, 1969.*
- Wiesel, William E.; “**Spaceflight Dynamics**”, *The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, EUA, 1995.*
- Wertz, James R. *et alli*; “**Spacecraft Attitude Determination and Control**”, *D. Reidel Publishing Company, Inc., Dordrecht, Holanda, 1978.*
- Howe, Edwin W. and Savet, Paul H.; “**The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro**”, *Control Engineering, June 1964, pp 67-72.*
- Craig, Robert J. G.; “**Theory of Operation of an Elastically Supported, Tuned Gyroscope**”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, May 1972, pp 280-288.*
- Craig, Robert J. G.; “**Theory of Errors of a Multigimbal, Elastically Supported, Tuned Gyroscope**”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, May 1972, pp 289-297.*
- IEEE STD 293-1969 “**Test Procedure for Single-Degree-of-Freedom Spring Restrained Rate Gyros**”.
- IEEE STD 517-1974 “**Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Degree-of-Freedom Rate-Integrating Gyros**”.
- IEEE STD 813-1988 “**Specification Format Guide and Test Procedure for Two-Degree-of-Freedom Dynamically Tuned Gyros**”.
- IEEE STD 647-1981 “**Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Laser Gyros**”.

Characterization and Tests of Gyroscopes for Artificial Satellites

Carlos Alberto Santoro

INPE – National Institute of Space Research - São José dos Campos – S. P., Brazil
santoro@dem.inpe.br

Paulo Giácomo Milani

INPE – National Institute of Space Research - São José dos Campos – S. P., Brazil
milani@dem.inpe.br

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

INPE – National Institute of Space Research - São José dos Campos – S. P., Brazil
marcelo@dem.inpe.br

Abstract: *The objective of this work is to present a characterization and test system for gyroscopes for application in inertial navigation sensors. The methodology used will be adapted from tests already established by the use of the international norms from IEEE and based on a system already implemented in the recent past at INPE. Nowadays this work is in its implementation phase.*

Keywords: *Gyroscopes, Characterization and Tests, Inertial Guidance.*