Verificação Experimental de Deriva de Unidade Tetraédrica de Giros GFO

Ulisses Thadeu Vieira Guedes
Hélio Koiti Kuga
Rafael Henrique Siqueira

Resumo **O artigo apresenta um procedimento utilizado para a verificação experimental da deriva de uma unidade tetraédrica de Giros de Fibra Ótica (GFO), fabricado pela OptSensys, submetido a uma rotação constante. Apresentam-se as condições da realização do teste, as equações de conversão entre valores medidos e rotação, remoção da rotação da Terra, análise dos dados obtidos, e as derivas de cada eixo do sistema de coordenadas tri-ortogonal de referência. O artigo inclui os coeficientes das equações das curvas ajustadas das amostras e das rotações no sistema de referencia adotado.**

Palavras-Chave **Aquisição de dados, caracterização de giro, giros com eixos redundante.**

Abstract **This article shows a procedure to check experimentally the drift of a tetrahedron unit of Fiber Optic Gyros (FOG), manufactured by OptSensys, submitted to a constant rotation. One shows the experiment conditions, gyro measurements and rotation speed conversion equations, Earth rotation removal and the drift values on each axis of a tri-orthogonal reference frame. The article includes the coefficients and fitted curve equations of the samples and rotations of the adopted reference system.**

Keywords **Data acquisition, gyro characterization, redundant axes gyros.**

I. INTRODUÇÃO

A unidade tetraédrica de giros GFO, fornecida pela Optsensys [1] , contém 4 eixos não ortogonais (ver Apêndice A). As amostras de cada giro são lidas a uma taxa de 128 Hz, sendo que cada uma delas consiste de 4 octetos enviados mediante um pulso de estímulo com duração de 10 microssegundos. Uma eletrônica customizada baseada em microprocessador Arduíno recebe um byte de estímulo do computador de aquisição na frequência amostral e distribui, simultaneamente, aquele estímulo elétrico para os 4 giros. O software responsável pelo envio do byte estimulador utiliza interrupções programáveis do RTC (Relógio de Tempo Real), mantendo a estabilidade e sincronismo das amostras. O carimbo de tempo considera os atrasos devido a comunicação, e processamento tanto do estimulador quanto do microprocessador embarcado na eletrônica do Giro.

Este ensaio específico foi realizado instalando a estrutura do giro em uma mesa de 3-eixos de precisão da Contraves (modelo 53M-2/30H) girando um único eixo em rotação constante de 0.06°/s, por um período de 100 minutos. Tais valores equivalem a uma rotação completa do corpo de um satélite numa órbita de aproximadamente 760Km, que emulam como a unidade seria estimulada em órbita. O objetivo do ensaio é identificar a deriva resultante em cada um dos eixos tri-ortogonais, considerando parâmetros característicos de experimento anterior [2], tais como biases, fatores de escala, e matriz de rotação que leva o sistema de eixos tetraédrico para um sistema retangular tri-ortogonalmente alinhados. Usando o procedimento em [2] sob condições ambientais de temperatura controlada e máxima taxa de amostragem (128Hz), os valores de calibração obtidos são apresentados nas Tabelas 1 a 3 (Apêndice B).

Em seguida apresentam-se o tratamento e processamento das medidas, o conjunto de equações, os resultados brutos da aquisição, suavização dos dados, e análises com o valor da deriva junto com o erro acumulado em um período orbital típico.

Ulisses Thadeu Vieira Guedes, Hélio Koiti Kuga e Rafael Henrique Siqueira. Divisão de Mecânica Espacial e Controle, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, E-mails: utvguedes@dem.inpe.br, hkk@dem.inpe.br e rafaelflegma@gmail.com. Projeto SIA (INPE, FINEP)

II. FUNDAMENTOS

A conversão dos valores adquiridos dos giros para a velocidade de rotação consiste na remoção de valores de deslocamentos fixos, devido a calibração interna da eletrônica do sensor, e na aplicação de um coeficiente de conversão (fator de escala), para cada elemento sensor.

$$M_i = \frac{(m_i - B_i)}{C_i} \quad , i=1 \text{ a } 4 \tag{1}$$

onde:

m_i amostras adquiridas de cada eixo em Volts,
B_i *bias* de cada giro em Volts (Tabela 3);
C_i fator de conversão em Volts/ (°/s) (Tabela 2);
M_i valores das amostras em º/s.

A conversão daqueles valores para um sistema de coordenadas retangulares ortogonal, xyz, é:

$$\vec{\Omega}_{xyz} = [H] \; \vec{M}$$
$$\vec{M} = \{M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_4\}^T \tag{2}$$

Onde:

$[H]_{3x4}$ matriz de transformação, dada no Apêndice A,
$\vec{M}$ vetor de medidas;

Os valores de $[\boldsymbol{H}]$, $\boldsymbol{B_i}$ e $\boldsymbol{C_i}$ são fornecidos nas Tabelas 1 a 3, do Apêndice B, obtidos através do procedimento em [2].

Uma vez que o giro tem sensibilidade suficiente para detectar a rotação terrestre, $\dot{\theta}_{Terra}$, deve-se remover a parcela daquela rotação, o que exige uma sequência de rotações para levar o vetor rotação da Terra para o sistema de eixos dos giros (Figura 1).

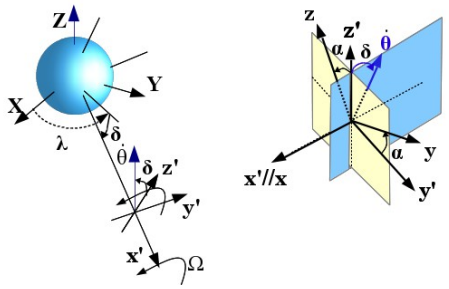

Fig. 1: Sistemas de Referência.

Identificam-se os sistemas: inercial (XYZ), o sistema local da mesa (x' y' z') e o sistema girante (xyz). Destacam-se o ângulo da latitude δ, pertencente ao plano x'z', e ângulo percorrido α, devido à rotação constante, Ω = 0.06 °/s, da mesa de precisão. A sequência de rotações Z(λ), Y'(δ) e x'(α), leva o vetor de rotação da Terra, $\vec{\dot{\theta}}_{Terra}$,em **XYZ** para **xyz**, resultando em:

$$\vec{\dot{\theta}}_{Terra} = \begin{Bmatrix} -\dot{\theta}_{Terra}\, sen(\delta) \\ \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\, sen(\alpha) \\ \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\cos(\alpha) \end{Bmatrix}_{xyz} \tag{3}$$

$$\alpha = \|\vec{\Omega}\|_{real}\,\Delta t \tag{4}$$

onde:

δ Valor da latitude do local de ensaio (23.21132308°);

$\dot{\theta}_{Terra}$ Rotação da Terra = 7.2921151467 x 10^{-5} rad/s.

α ângulo percorrido pelo eixo norte da mesa no período, Δt considerando a rotação real (0.06°/s).

Teoricamente, subtraindo-se das medidas, (Equação 2), as componentes da rotação da Terra , resulta:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega_x + \dot{\theta}_{Terra}\, sen(\delta) \\ \omega_y &= \Omega_y - \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\, sen(\alpha) \\ \omega_z &= \Omega_z - \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\cos(\alpha) \end{aligned} \tag{5}$$

Os eixos dos giros compõem um triedo não ortogonal, tendo um ângulo de 120° entre projeções dos eixos (Apêndice A) no plano yz (Figura 2).

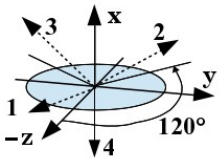

Fig. 2: Eixos dos Giros em e o sistema de referência xyz.

A deriva do conjunto de giros em relação ao sistema xyz é calculada através da integração das componentes da rotação ω no período no ensaio. Teoricamente, define-se deriva como a variação da medida com o tempo devido a fatores não modelados. Por outro lado e por definição, o *bias* desloca a curva ao longo da sua escala sem alterar a variação daquela curva com o tempo.

III. Condições do Ensaio

A mesa foi acionada com uma rotação de 0.06°/s na direção x vertical tendo o eixo 1 apontado para o norte. Contudo, devido a montagem dos GFO, durante a aquisição foi utilizado um coeficiente multiplicador negativo na conversão do número gerado pelo conversor AD para o valor de tensão, o que altera as Equações 5 para:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \Omega_x + \dot{\theta}_{Terra}\, sen(\delta) \\ \omega_y &= \Omega_y - \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\, sen(\alpha) \\ \omega_z &= \Omega_z + \dot{\theta}_{Terra}\cos(\delta)\cos(\alpha) \end{aligned} \tag{6}$$

Os dados brutos de cada giro são mostrados nas Figuras 3 a 6 que, para efeito didático, apresentam as curvas de valores médios das medidas que são reprodutíveis com os coeficientes $\boldsymbol{a}_i$, $\boldsymbol{b}_i$, $\boldsymbol{c}_i$, $\boldsymbol{d}_i$,e $\boldsymbol{e}_i$ da Tabela 4 através das equações:

$$m_i = a_i + b_i\, sen(\beta_i) + e_i\, t \tag{7}$$

$$\beta_i = c_i\, t + d_i \tag{8}$$

Aqueles coeficientes foram obtidos através de filtro Escalonado de Levenberg-Marquart (estimador não-linear de parâmetros), implementado na ferramenta de software QtiPlot [3], a partir dos valores medidos. O filtro é uma solução numérica iterativa para a suavização de dados onde, para um conjunto de pares de valores (x_i,y_i), otimiza-se um parâmetro φ do modelo da curva f(x,φ) tal que a soma dos quadrados dos desvios, S(φ), é mínima localmente., ou seja:

$$S(\varphi) = \sum_{i=1}^{m} [\, y_i - f(x_i, \varphi)]^2 \tag{9}$$

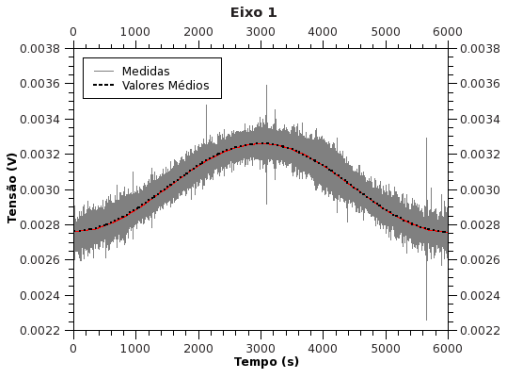

Fig. 3: Dados adquiridos do Eixo 1 e a curva de valores médios.

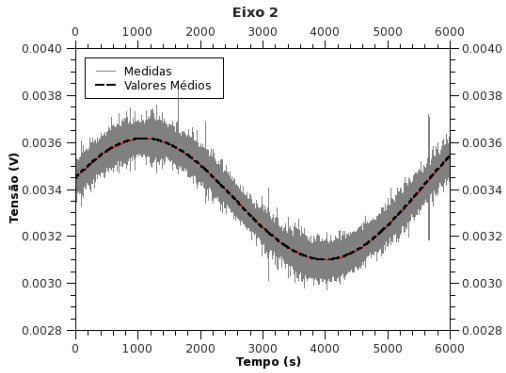

Fig. 4: Dados adquiridos do Eixo 2 e a curva dos valores médios.

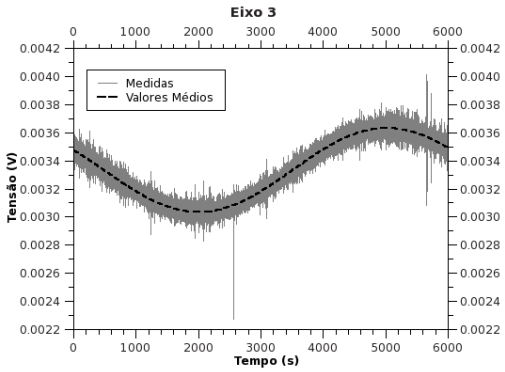

Fig. 5: Dados adquiridos do Eixo 3 e a curva dos valores médios.

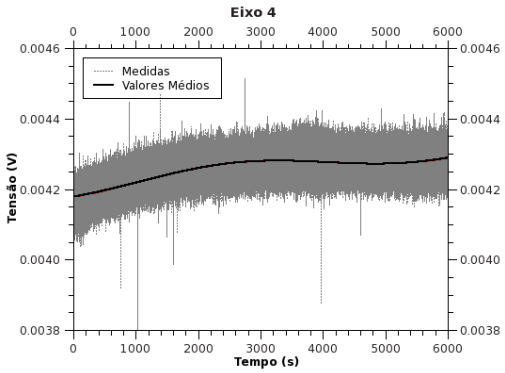

Fig. 6: Dados adquiridos do Eixo 4 e a curva dos valores médios.

As Equações de 1 a 6 (exceto a 5) foram implementadas em linguagem C, compiladas em GNU/C em Sistema Operacional GNU/Linux, utilizando o conjunto de medidas e os valores das Tabelas 1 a 3.

Somente os registros onde todos os eixos apresentaram valores lidos nos 4 eixos foram processados. A ausência de CRC ("Check Sum") nas amostras, uma limitação do software embarcado na eletrônica dos giros, justifica o aparecimento de valores espúrios em instantes aleatórios, embora a leitura dos 4 eixos seja realizada. Observando as figuras dos Eixos 1 a 3 (Figuras 3 a 5) nos instantes finais, entre 5600 e 5800 segundos notam-se instabilidades nos valores, o que não é perceptível no Giro do Eixo 4 (Figura 6).

Os resultados do processamento, as componentes da rotação projetada nos eixos xyz, são mostrados nas Figuras 7 a 9, incluindo os valores médios dos eixos convertidos e o ajuste no deslocamento para a obtenção do erro acumulado.

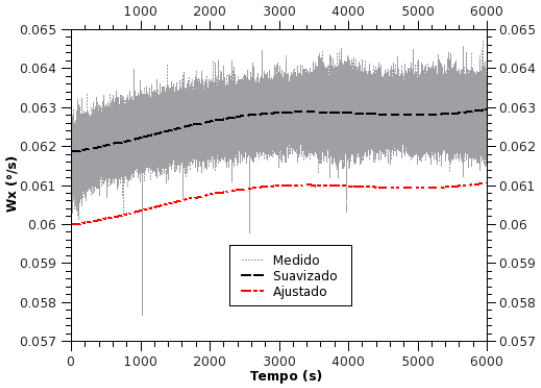

Fig. 7: Rotação na Direção x

Aplicam-se a equação 7 e os coeficientes da Tabela 5 para calcular as curvas de suavização. As curvas ajustadas são obtidas alterando os coeficientes a_i tal que os valores iniciais sejam (0.06, 0, 0) °/s, nos eixos x, y e z respectivamente, que são os valores nominais esperados, após a compensação da rotação da Terra. Os ruídos (*bias*) das medidas observadas anteriormente são transferidos para os valores das rotações, o que indica alguma limitação quanto ao conjunto de amostras a serem adquiridas por um computador de bordo (AOCS e/ou OBDH), para obter um valor médio confiável mesmo operando com alta taxa de amostragem.

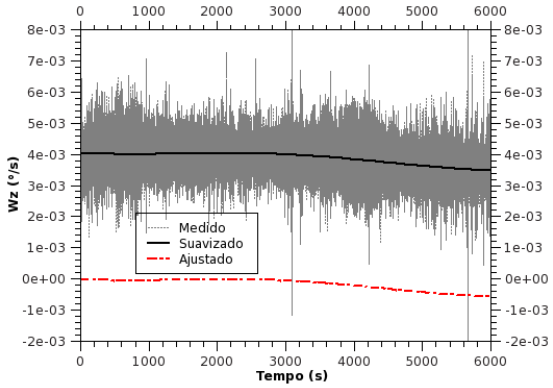

Fig. 9: Rotacão na Direcão z.

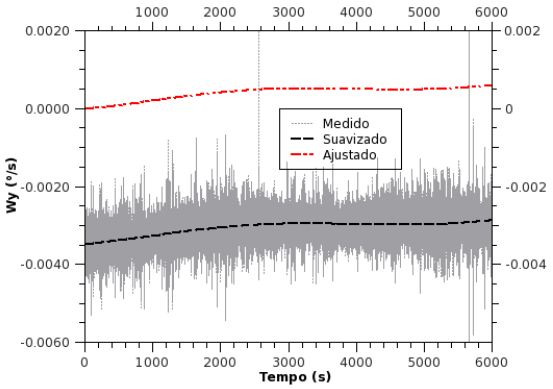

Fig. 8: Rotação na Direção y.

IV. Resultados

A integração da rotação (soma dos ângulos incrementais do período) fornece o comportamento das derivas da unidade correspondente aos eixos xyz, conforme as Figuras 10 a 13.

Uma vez que a rotação é aplicada somente sobre o eixo x, o resultado da acumulação de erros é observado nos instantes finais da integração, chegando ao valor 364,61°. A diferença (4,61°, valor numérico obtido) corresponde a uma deriva equivalente de cerca de 2,8 °/hora, uma vez que a posição do ângulo do eixo girante da mesa é de exatos 360° no final daquele período.

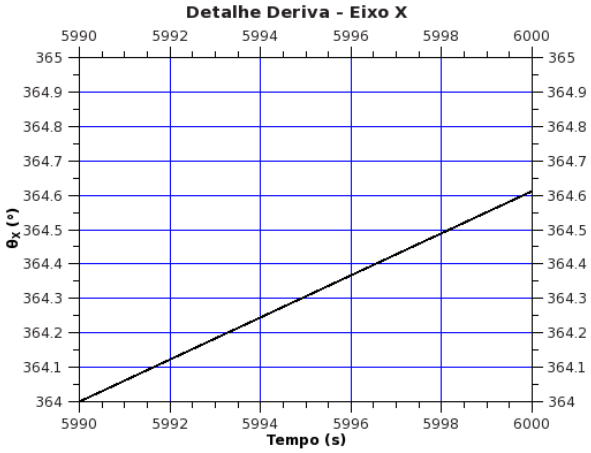

Fig. 10: Variação da deriva no plano yz nos instantes finais.

A curva da Figura 11 equivale à integração dos dados na direção x quando é removido a parcela da rotação de ensaio (0.06°/hora). O objetivo é mostrar que o perfil da curva é coerente com as curvas dos outros eixos virtuais. A curva apresenta uma linearidade aparente a partir de 2500 segundos. Contudo, a função que mais se aproxima dos dados médios corresponde a integração da equação 7. Ao final tem-se os mesmos 4.61° obtidos a partir da Figura 10.

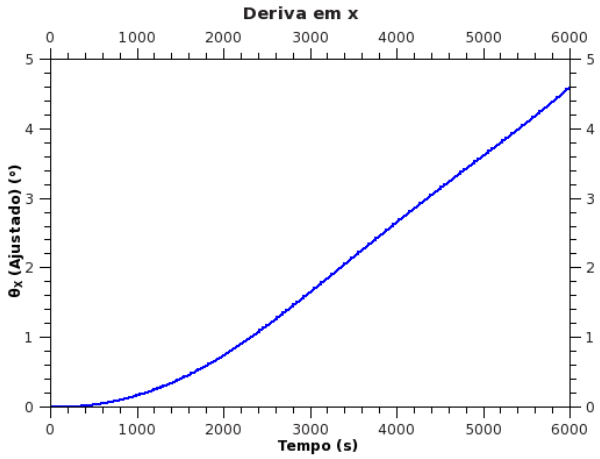

Fig. 11: Variação da Deriva Ajustada no plano yz.

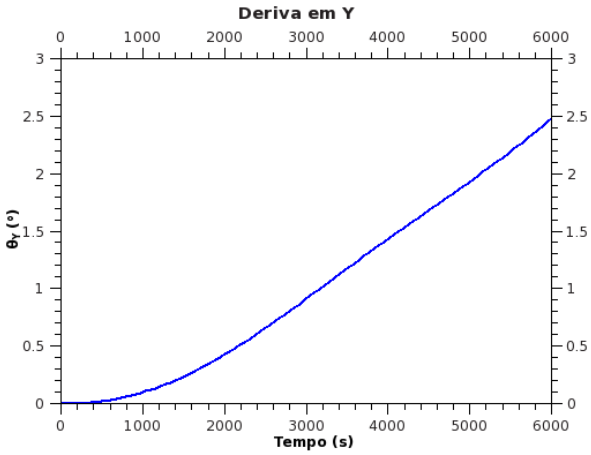

Fig. 12: Variação da deriva no plano xz.

Com a mesma aparência e instante de linearidade aparente, a curva integrada resultante na direção y (Figura 12) nos primeiros 2500 segundos termina com uma deriva final da ordem de 1,5°/hora.

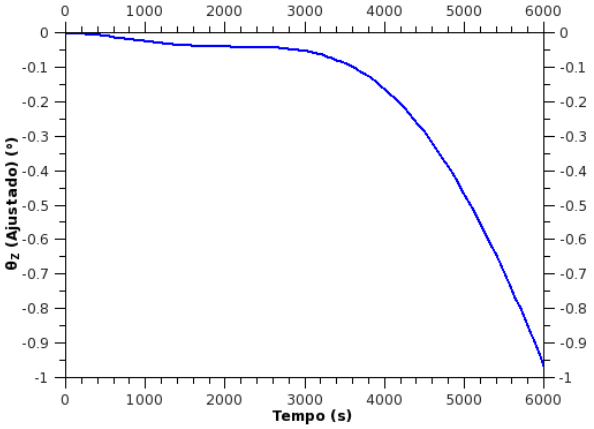

Fig. 13: Variação da Deriva no plano xy com o tempo.

Com uma linearidade bem mais acentuada que as demais, a deriva do eixo z (Figura 13) apresenta uma tendência em sentido oposto, atingindo a ordem de -0.6 °/hora, porém a partir de 4500s.

Assim, nas condições de ensaio, as derivas residuais observadas são:

Direção	**x**	**y**	**z**
Deriva (°/h)	2.8	1.5	-0.6

Durante o processamento dos dados observou-se que os resultados são influenciados pela precisão numérica dos coeficientes de conversão, ruído e da matriz de transformação *H* (Equação 2).

A diferença de valores pode ser atribuída ao nível de rotação percebida pelos giros durante o ensaio, quando submetidos à matriz de transformação *H*, uma vez que o maior estímulo de rotação está na direção do eixo x da mesa, o que caracteriza uma região de calibração diferente dos demais sensores[2].

V CONCLUSÕES

Os gráficos (Figuras 11 a 13) mostraram um comportamento não linear das derivas individuais para um sistema de referência virtual (xyz), principalmente das componentes que não estão sob a ação direta do eixo da rotação estimulante (mesa). Atribui-se a grande diferença entre as derivas à ponderação implícita da matriz de transformação *H* entre os sistemas de eixos (giros e xyz), além do fato de um dos giros ser de uma série de produção diferente dos demais (3 SDs e 1 LME). Cabe notar que houve um tempo longo para "warm-up" e após temperatura ambiente estabilizada, foram realizadas as aquisições do experimento por 100 minutos. Futuras repetições do ensaio envolvendo a aquisição combinada de temperatura da eletrônica e dos elementos

sensores assim como a repetição do ensaio considerando um maior período de estabilização térmica poderão indicar regiões de operação mais estáveis. Até então, a observação de não linearidade é restrita ao tempo do ensaio.

Dada a sensibilidade do giro, as interferências no ensaio, tais como temperatura ambiente, magnitude da rotação empregada e movimentações externas (mesmo sob uma plataforma inercial isolada sismicamente onde a mesa de 3-eixos está instalada), podem interferir nas medidas pois as parcelas de ruído são transferidas para elas [4]. Contudo, a existência de blocos de dados com ruídos elevados não gerou alterações visíveis nas derivas. Pretende-se averiguar os comportamentos ao incluir os blocos de dados onde as amostras apresentam deficiência de dados (ausência de amostras de um ou mais giros), uma vez o procedimento atual considera amostras com todos os eixos lidos.

Ensaios com a mesma rotação sendo aplicada em outros 3 eixos e o comportamento das derivas serão comparadas em trabalhos futuros, bem como o desempenho perante uma falha simples.

VI AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Optisensys Ltd. através do Dr. Osni Lisboa que gentilmente disponibilizou a unidade tetraédrica de 4 giros de fibra ótica; o Dr. P. G. Milani e o MSc. Eng. W. Einwoegerer pelo auxílio em laboratório com os comandos da plataforma da mesa de 3 eixos; a FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) por proporcionar os recursos financeiros e materiais através do Projeto SIA (Sistemas Inerciais para Aplicações Aeroespaciais).

VII BIBLIOGRAFIA

[1] Lisboa, O., "Relatório Técnico FUNDEP-SIA/2007". São José dos Campos, Brazil, 2007, Optsensys Instrumentação óptica e eletrônica Ltda.

[2] Kuga, H.K.; Siqueira, R. H.; Carrara, V. "On ground calibration of tetrahedron gyro package for attitude determination." 1st IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems DyCoSS-2012, Porto, Portugal, 2012. Paper IAA-AAS-DyCoSS1-04-07.

[3] QtiPlot Reference Manual, http://prdownload.berlios.de/qtiplot/qtiplot-manual-en.pdf, último acesso em 08/2012.

[4] Wertz, J; Spacecraft Attitude Determination and Control, 1978.

VIII APÊNDICE A

A Fig. A1 mostra a unidade tetraédrica ensaiada. A caixa da eletrônica está acima da estrutura e cada giro GFO fornece dados através de uma saída serial RS 422.

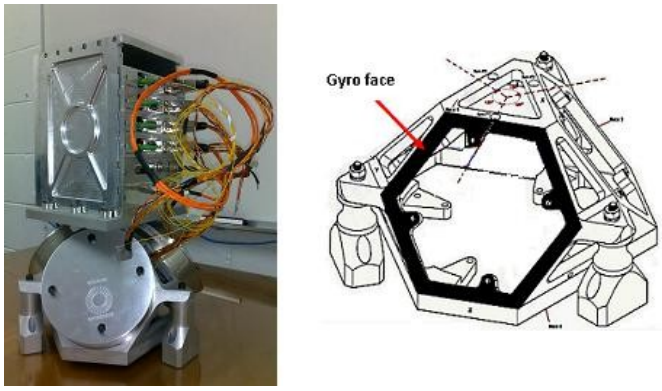

Fig. A1: Unidade tetraédrica de giros GFO.

A Fig. A2 mostra a configuração geométrica dos eixos da unidade tetraédrica em relação a um triedro XYZ, com Z apontando para o norte, Y no plano horizontal, e X na vertical. O ângulo α vale 54,736°.

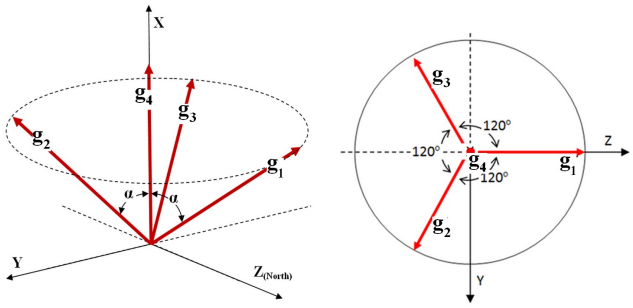

Fig. A2: Orientação dos eixos em termos de XYZ.

IX APÊNDICE B

Tabela 1: Matriz de Transformação do sistema de eixos dos Giros para xyz.

H(*i* , *j*)		*j*			
		0	**1**	**2**	**3**
i	**0**	2.891714702786278e-01	2.892335095117639e-01	2.876136426324943e-01	5.017305804843861e-01
	1	-4.639681532136366e-03	7.052669198527741e-01	-7.041214018909228e-01	-1.744579996672102e-03
	2	8.144462476125298e-01	-4.097230037870795e-01	-4.108263813061506e-01	-8.696722162293962e-04

Tabela 2: Fator de Conversão de unidades entre Volts e graus/s

C V/(°/s)	**0**	**1**	**2**	**3**
	7.522908422043020e-02	8.964439238881419e-02	9.189284391406990e-02	7.455121778844402e-02

Tabela 3: Vetor de Desvios de Medida em Volts.

B (V)	**0**	**1**	**2**	**3**
	1.906346716594093e-04	6.398748539807179e-04	1.716324447569210e-04	-4.157957857055158e-04

Tabela 4: Coeficientes da Curva Média dos Eixos dos Giros (Tensão=a+b sin(c t + d) + e t)

Eixos \ Parâmetros	**1**	**2**	**3**	**4**
a	3.0145608885319e-03	-3.3202372735903e-03	3.3255925499732e-03	4.2030584689672e-03
Δa	± 1.1216842846562e-07	± 8.4787838609453e-08	± 9.9391037526045e-08	± 1.0255050681064e-07
b	2.4941349978130e-04	2.8105837834706e-04	2.9499913608135e-04	2.5720794013645e-05
Δb	± 5.4013774969571e-08	± 6.0722039251218e-08	± 7.0212455993882e-08	± 5.6635037554389e-08
c	0.001047197551197 (0.06°/s)			
d	4.7153004445657e+00	3.6211165526360e+00	2.6108358094789e+00	-1.1046410170906e+00
Δd	± 3.4541462982546e-04	± 1.6766451507779e-04	± 1.9140672355502e-04	± 2.8662216118657e-03
e	-8.0924928027562e-10	-1.5720038834579e-08	2.7528190375688e-09	1.8418978744009e-08
Δe	± 3.5123121114346e-11	± 2.6549480710252e-11	± 3.1122157085080e-11	± 3.2111476669938e-11

Tabela 5: Coeficientes da Curva Média das Rotações - Sistema xyz (Rotação=a+b sin(c t + d) + e t)

Eixos \ Parâmetros	**x**	**y**	**z**
a	6.2105507269056e-02	-3.3612694209393e-03	4.1687152680458e-03
Δa	± 1.2307610248560e-06	± 9.8109484069710e-07	± 1.5849701946751e-06
b	-2.4458719149183e-04	1.2949589133770e-04	1.2018215639015e-04
Δb	± 6.5376654277018e-07	± 5.7523199532715e-07	± 7.6819910833630e-07
c	0.001047197551197 (0.06°/s)		
d	1.9402958511762e+00	-9.8994748030405e-01	4.7491196471456e+00
Δd	± 3.7152842297495e-03	± 5.2682521964595e-03	± 1.0150394867683e-02
e	1.8026515727242e-07	1.0205799414829e-07	-9.3555976012266e-08
Δe	± 3.8540258680183e-10	± 3.0722169635110e-10	± 4.9632024413871e-10