OS EXPERIMENTOS TECNOLÓGICOS DA PLATAFORMA SUBORBITAL 1 - PSO1

Paulo Giácomo Milani, M.Sc.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (SJC)
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC
End. eletrônico: milani@dem.inpe.br

1. INTRODUÇÃO

O Programa Plataforma Sub-Orbital surgiu de um acordo de cooperação entre os atuais Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE com o objetivo de utilizar os foguetes de sondagem Sonda III para a realização de experimentos científicos voltados para a área de micro-gravidade.

Desde o início desse acordo o INPE vem acumulando esforços no sentido de desenvolver, testar, integrar, qualificar e viabilizar uma arquitetura para a plataforma tal que seja possível a realização desses experimentos.

De forma a viabilizar essa arquitetura considerou-se, em diversos momentos, a utilização de tecnologias mais modernas (GPS, por ex.) assim como aquelas já dominadas no INPE (leis de controle, din. da trajetória, etc.) e no IAE (pára-quedas, reservatórios para líquidos sob pressão, etc.).

Este trabalho proocura apresentar os subsistemas da PSO1 e os experimentos tecnológicos gerados a partir dos estudos das suas concepções e as soluções que foram ou estão sendo adotadas, procurando enfatizar os aspectos de engenharia inercial, sempre que possível.

2. DESCRIÇÃO DA MISSÃO

Ela começa no instante em que termina a queima do segundo estágio do veículo lançador, após a separação, momento em que é necessário a redução da velocidade de rotação, em torno do eixo de rolamento, de 300 rpm para a velocidade de 0.1°/s. Para essa operação o Computador de Bordo (CB) lê as velocidades angulares fornecidas pelo Bloco Girométrico (BG) e calcula, por meio da lei de controle, quais os propulsores que devem ser acionados a cada instante de tempo até se atingir a velocidade angular desejada. Note-se que o sistema proposto permite que se estabilize a plataforma nos

seus três eixos caso alguma pertubação altere o comportamento previsto, e a partir de qualquer atitude inicial. Isso pode ser visto em Silva e Souza, 1994 e Souza, 1995.

Ao fim da queima do segundo estágio, as operações de desrotação acima são realizadas, ao mesmo tempo que a PSO1 percorre uma trajetória parabólica onde a resultante das forças aplicadas à plataforma é nula.

Um Codificador de PCM coleta dados de toda a missão desde instantes antes do lançamento. Todos os subsistemas enviam dados pela telemetria através desse codificador. Esses dados são armazenados em Terra para posterior análise.

3. O BLOCO GIROMÉTRICO

Dentre os subsistemas da PSO1 este é, certamente, o subsistema mais interessante do ponto de vista de sistemas de controle e guiagem. Ele permite que se faça, pela primeira vez na DMC, uma malha de controle em tempo real para a estabilização inercial de um sistema. A lei de controle a ser utilizada foi apresentada por Silva e Souza (1994) e Souza (1995) e será mostrada em outra sessão deste trabalho.

A utilização dos sensores giroscópicos GAM-1G da SFIM foi necessária devido à não disponibilidade de outros, de projeto do INPE, no decorrer do andamento do Projeto PSO1. Ainda assim, de forma a acomodar a eletrônica daqueles sensores ao padrão e ao tamanho disponível na baia do veículo lançador, assim como ao ambiente (vibrações, acelerações, temperaturas e interferências eletro-magnéticas) do mesmo, estão sendo desenvolvidas algumas das placas de circuito impresso para substituição daquelas que foram fornecidas pelo fabricante. Todo o projeto dessas novas placas está sendo feito pelo INPE/DMC.

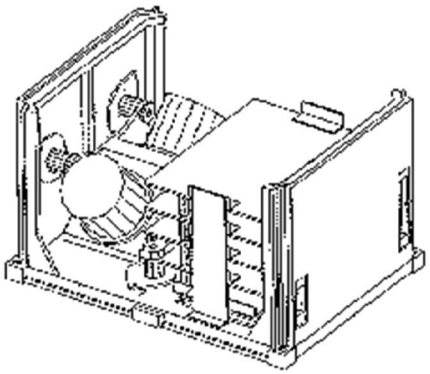


Fig. 1: Vista geral do Bloco Girométrico

O módulo do BG é composto de dois sensores girocópicos de dois eixos GAM-1G da SFIM, alinhados segundo ângulos conhecidos com os eixos principais de inércia do veículo, das respectivas eletrônicas de tratamento de seus sinais e de uma suspensão para amortecimento das vibrações. A figura 1 apresenta uma visão geral do conjunto do Bloco Girométrico. Pode-se notar à esquerda o Bloco da suspensão com os sensores e à

direita as placas de PCB da eletrônica. De baixo para cima, as placas são: a dos conversores DC/DC, a da excitação dos detetores, a da malha de torqueamento e a da excitação do motor de acionamento.

Uma característica particular deste projeto é a inclinação dos dois sensores a 45° com o eixo vertical, o eixo de rolamento do veículo lançador, de forma a poupar (pelo menos parcialmente) os sensores da elevada aceleração durante a fase propulsada.

As saídas dos sinais de velocidades angulares são na forma de pares diferenciais para +/- 5V de excursão, correspondendo aos +/- 50°/s da resposta do sensor. A forma diferencial da saida foi escolhida devido à sua maior imunidade a ruidos. Os sinais de Status, uma vez que são sinais digitais, são desacoplados oticamente.

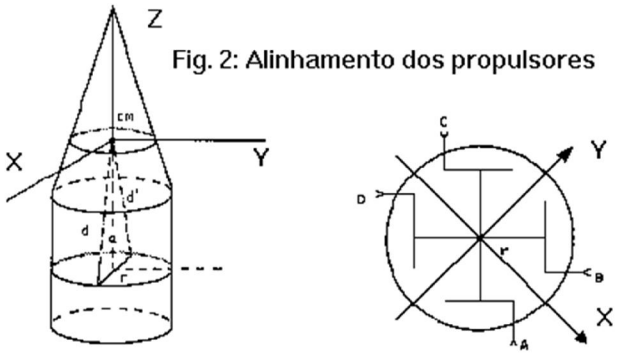
Estão programados alguns testes de calibração e de desempenho do BG em simulador Contraves 53M2-30H (3 eixos). Esses testes permitirão primeiramente verificar o correto funcionamento dos sensores utilizando as eletrônicas atualmente em desenvolvimento na DMC, além do levantamento de todas as suas caracteristicas.

Depois serão necessários testes que verificarão o desempenho do conjunto de dois sensores, que formam o BG. Finalmente vai-se levantar a matriz de rotação que fornecerá os desvios reais dos sensores em relação aos eixos ideais em que se supõe estejam montados.

4. OS PROPULSORES

O sistema propulsivo da PSO1 tem como um de seus componentes os mesmos tipos de propulsores que serão usados nos satélites da Missão Espacial Completa Brasileira - MECB. Assim, um dos principais objetivos de sua inclusão neste Projeto, é a sua qualificação em vôo.

Estes são propulsores de hidrazina (N_2H_4) com empuxo de 2N cada um, num total de quatro propulsores. Eles estão alinhados segundo a fig. 2, o que permite o controle em 6 graus de liberdade, o que pode ser visto na seção de Lei de Controle deste trabalho. De modo a se ter um custo mais baixo, idealizou-se um reservatório cilíndrico pressurizado com pistão. Este último empurra o combustível devido à pressão do gás N_2 comprimido no extremo oposto do reservatório ao do combustível. Para o desenvolvimento deste reservatório têm-se baseado o projeto do reservatório em tecnologia já desenvolvida pelo IAE para vasos de pressão de óleo.



Uma arquitetura alternativa para este sistema incluiria um reservatório separado de nitrogênio e uma válvula reguladora de pressão. Isso garantiria uma pressão constante no pistão, o que possibilitaria uma vazão constante de hidrazina, resultando em um empuxo também constante, o que não ocorre na solução adotada.

Uma vez que o mesmo reservatório é usado para hidrazina (N_2H_4) e para nitrogênio (N_2), conforme se consome aquela primeira, o pistão se desloca e a pressão do segundo cai. Assim, ao fim da estabilização da plataforma, estima-se que a pressão caia do valor inicial de 22 bares para em torno da metade desse valor.

Essa solução adotada, apesar de simples, apresenta uma vantagem sobre a alternativa. No início da missão, quando os torques e forças necessários à estabilização da plataforma são maiores, então a pressão está alta e o empuxo resultante é maior. Já ao fim da estabilização, quando uma boa parte da hidrazina já tiver sido consumida, a pressão estará menor e o empuxo também, resultando em um controle mais fino e mais preciso. O custo a pagar por isso é o maior tempo necessário para obter a estabilização da PSO1.

5. OS ACELERÔMETROS

Estes sensores serão montados ao longo dos eixos principais de inércia do veículo. São sensores SUNDSTRAND do tipo QA 2000. Devido ao fator de escala do mesmo e às caracteristicas da missão, será necessário trabalhar com duas faixas de medida. A primeira, para a fase de lançamento, quando se medirá acelerações de até 15gs , é a parte da trajetória em que se terá grandes forças agindo sobre a PSO1. Já para a fase de micro-gravidade será necessária toda a sensibilidade do sensor para monitorar os resultados obtidos. Assim optou-se pelo chaveamento, durante a missão, de um fator de escala para outro mais adequado a cada fase.

Inclui-se no projeto destes sensores a correção para o “bias” e para erros de retificação. Depois o sinal é filtrado e amplificado, até atingir o limite $\pm$ 5V padronizado para a PSO1.

Durante a fase de estabilização, para efeitos de estudos para futuras missões, pretende-se analisar as acelerações atuantes sobre a PSO1 no momento de sua separação segundo os procedimentos apresentados por Souza, 1984, visando a viabilidade de utilização do dispositivo Ioiô. Aquele trabalho, no entanto, considera o veículo em órbita circular, onde as acelerações devido à trajetória seriam constantes. Esse não é o caso deste experimento, mas acredita-se que se possa filtrar as frequências de interesse devido à rotação da PSO1 ser bastante elevada, principalmente no início das manobras.

6. A LEI DE CONTROLE

A Lei de Controle é simples e, ao mesmo tempo, eficiente. Conforme foi apresentado por Silva e Souza, 1994, é possível a redução das velocidades angulares, nos três eixos do veículo, para valores em torno de zero. Na simulação parte-se de uma rotação de Wz=120 rpm, no eixo de rolamento, e de até 300 rpm no caso da PSO1. Wx e Wy são consideradas inicialmente iguais a 1 rpm. Conforme os jatos de gás são acionados e devido aos acomplamentos entre eixos, acoplamentos esses modelados pelas equações de Euler, as componentes das velocidades angulares nos eixos x e y variam de amplitude e de direção, enquanto que a do eixo z reduz-se linearmente até próximo de zero.

A Lei de Controle aplica um torque em sentido inverso ao da rotação do veículo, e proporcionais ao braço da alavanca **a** e ao módulo da força de empuxo do propulsor **F**, o que no caso da PSO1 (fig. 2) resulta nas seguintes equações para os torques aplicados:

$$T_i = -\left(\frac{a F \square 2}{2}\right) \text{sign}(W_i) \qquad i = x, y, z$$

Ainda de acordo com Silva e Souza (1994) e Souza (1995) a substituição das equações acima nas equações de Euler resultam nas seguintes equações para a dinâmica do veículo:

$$W_x = (T_x - (I_z - I_y)\, W_y\, W_z) / I_x$$

$$W_y = (T_y - (I_x - I_Z)\, W_x\, W_z) / I_y$$

$$W_z = (T_z - (I_y - I_x)\, W_x\, W_y) / I_z$$

onde Ix, Iy e Iz são os momentos principais de inércia nos eixos x, y e z, respectivamente. A aplicação dessa estratégia de controle leva à um ciclo limite de amplitude de 3 x 10^{-3} rad/s (ou 0.17°/s) nos três eixos.

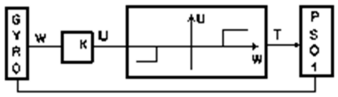


fig 3: Malha de controle da PSO1

Esse valor de amplitude para o ciclo limite é uma função do tamanho (largura) mínima do pulso do jato do propulsor e da sua amplitude: o Impulso "bit" ou I-bit em [Ns]. Quando menores estas grandezas forem, tanto mais estreita é essa largura do ciclo limite, sendo que não se consegue melhor resultado com aqueles atuadores empregados (2N). No entanto, no caso da PSO1, com o decréscimo da pressão ao longo da manobra de estabilização, o empuxo de um propulsor cai de 2 N para até 0.6 N, o que corresponde a velocidades residuais no ciclo limite caindo de 0.17°/s para 0.05°/s.

7. SENSOR GPS

De forma a aproveitar ao máximo possível a oportunidade de um vôo no foguete Sonda III, incluiu-se um experimento com un sensor GPS que pretende acompanhar a trajetória da PSO1 durante todo o seu vôo.

Sensores ou receptores GPS que funcionem a altitudes maiores do que 18 km ou velocidades maiores do que 1.000 milhas náuticas por hora não são disponíveis no mercado, a não ser com autorização do governo norte americano. Sensores e receptores com essas limitações embutidas são, por outro lado, muito fáceis de serem adquiridos e custam muito pouco. A idéia deste experimento consiste em procurar enviar os seus dados brutos por telemetria para Terra para posterior processamento "off-line".

Com relação ao software de vôo, vai-se gravar na memória do Computador de Bordo uma trajetória simulada para um foguete do tipo utilizado. Depois, em intervalos de tempo regulares, o CB envia para o sensor a provável posição do veículo e recebe de volta algumas estimativas de posição medidas pelo sensor. Dessa forma o sensor deve convergir mais rapidamente para uma solução do que se deixado por conta própria. Cada uma das posições recebidas pelo CB é enviada pela telemetria para posterior processamento em tempo não real.

Junto à Base de Lançamento de Alcântara vai-se ter um sensor GPS do mesmo tipo a ser enviado na missão, do qual se coletará dados para posterior correção daqueles obtidos em vôo. Através de um procedimento de correção diferencial é possível melhorar a precisão da determinação da trajetória. Finalmente, os dados obtidos de vôo serão usados em outras simulações que permitirão contornar algumas das limitações impostas aos usuários dos sensores e receptores civis de GPS.

8. O COMPUTADOR DE BORDO

Utiliza um micro-controlador 8031, um conversor A/D com multiplexador analógico e um conjunto de portas de E/S digitais. Tem um temporizador "watch-dog" e responde a 4 interrupções diferentes.

9. O CODIFICADOR DE PCM

O Codificador de PCM (Pulse Coded Modulation) que é utilizado na PSO1 é um projeto já utilizado in INPE há muitos anos pelo pessoal das Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do INPE, assim como apresentado por Eras (1992). Na configuração a ser usada na PS01, o codificador tem 40 canais analógicos de entrada e 40 bits de sinais digitais. Além disso fornece uma palavra de sincronismo de 10 bits e um sinal de relógio de 20 bits. Todos esses dados são serializados na codificação NRZ (No Return to Zero), e então codificados em NRZ-Bi-phase e, a seguir, limitados em frequência por um filtro do tipo Bessel.

10. O MAGNETÔMETRO

Será usado um magnetômetro de dois eixos, pelo pessoal do veículo lançador, o que permitirá monitorar as rotações do foguete.

11. O PÁRA-QUEDAS

Este subsistema é o que permitirá a recuperação da PSO1 no mar. Tentou-se um conjunto de alternativas que possibilitariam diminuir os custos de recuperação, incluindo a recuperação em terra. Esta última não foi possível devido à ocupação populacional nas direções desejadas, mesmo as menos populosas (sudoeste, por ex.) em torno da base de lançamento. A região de Lençóis Maranhenses seria uma excelente alternativa, não fosse tão próxima de Alcântara e o Sonda III estabilizado passivamente,

apenas. A melhor solução encontrada foi o lançamento paralelo ao Equador, de forma a que a recuperação pudesse se dar próximo da costa, de 50 a 100 Km da mesma.

12. CONCLUSÕES

O Programa PSO1 tem apresentado uma série de necessidades que têm exigido a experiência desenvolvida, e por vezes esquecida, no passado, quanto a criatividade e capacitação para a introdução de novas soluções e tecnologias. Têm-se procurado utilizar ao máximo as possibilidades de exploração de um evento desse tipo através da realização de um grande número de diferentes experimentos tecnológicos simultâneos. Todos os resultados obtidos serão usados para melhorar o desempenho e baixar os custos de futuros vôos semelhantes. A estabilização inercial mostra-se como tecnologia necessária para projetos deste tipo.

13. BIBLIOGRAFIA

Belletti, C.L.C.M.; "Especificação Ambiental para Equipamentos da PSO1 - Parte A - Ambiente Mecânico" Relatório interno do Projeto PSO1. INPE, S.J. Campos, SP, 05/05/95.

Belletti, C.L.C.M.; "Projeto da Suspensão do Bloco Girométrico." Relatório interno do Projeto PSO1. INPE, S.J.Campos, SP, 17/07/95.

Eras, A.; Comutador de PCM para Carga Útil de Foguete - Características Técnicas Básicas. Relatório interno do DAE/Laboratório Laser.

IAE; "Especificação e Desenhos do Acumulador de Óleo Modelo A1-590-26-2084-2-5" Material fornecido pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE do Centro Técnico Aeroespacial - CTA, S. José dos Campos, SP.

Silva, W.C.C.; Souza, L.C.G.; "Spin Reduction of Space Vehicles Using Gas Jets". Artigo apresentado no "The Fourth Pan American Congress of Applied Mechanics" (PACAM IV), Buenos Aires, Argentina, January 3-6, 1995.

Souza, P.N.; “Determinação do Movimento do Conjunto Satélite-Cone de Acoplamento-Terceiro Estágio Antes da Soltura do Ioiô, por Meio de Acelerômetros”, INPE-3154-RPI/101, S.J. Campos, SP, Junho de 1994.

Souza, C.T.; “Análise de Atitude de uma Plataforma Sub-Orbital Efetuando a Desrotação por Meio de Propulsores”. Tese de Mestrado apresentada em 29 de Setembro de 1995 no INPE. São José dos Campos, SP. No prelo.