

SISTEMA PROPULSIVO DA PLATAFORMA SUB-ORBITAL

José Nivaldo Hinckel

Sebastião Eduardo Corsatto Varotto

INPE/DMC

Cx. P. 515 – 12201-970 – São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo. Este trabalho descreve a concepção, a construção e o funcionamento do sistema propulsivo usado para o controle de atitude da Plataforma Sub-Orbital (PSO). A PSO é uma plataforma experimental com massa de aproximadamente 110 kg, lançada em vôo balístico por um foguete de sondagem de dois estágios da série Sonda III. Ao final da fase impulsiva a plataforma é separada do segundo estágio do foguete, com velocidade angular de 130 rpm e segue uma trajetória balística, atingindo altitude máxima de 400 km. Após a separação, tem início a fase de estabilização, na qual o computador de bordo, utilizando uma estratégia de controle apropriada, comanda o sistema propulsivo para obter os torques necessários e anular o movimento rotacional em torno do centro de massa da PSO. A velocidade angular residual em torno dos três eixos, após a estabilização, deverá ser inferior a 0.033 rpm, com acelerações em qualquer ponto da plataforma inferiores a $10^{-6} g_0$, caracterizando o ambiente de micro-gravidade. A fase de estabilização dura aproximadamente 3 minutos. Após a estabilização a plataforma segue em queda livre por aproximadamente 7 minutos, durante os quais são efetuados experimentos de micro-gravidade.

O sistema propulsivo é composto de um tanque de propelente com capacidade de 900 ml, um transdutor de pressão, duas válvulas de enchimento e dreno e quatro propulsores monopropelentes a hidrazina com empuxo nominal de 2 N.

O tanque de propelente é cilíndrico com calotas elípticas. A pressurização é feita por nitrogênio e a separação do propelente e pressurizante é feita por um pistão que corre livre no interior do cilindro. O sistema opera em regime de “blowdown” com razão de pressão de 4:1.

Palavras-chave: Sistema propulsivo, Micro-gravidade, Sistema de controle

1. INTRODUÇÃO

Plataformas espaciais e satélites, em trajetórias acima da atmosfera densa, requerem em geral sistemas que operem via ejeção de massa para o fornecimento de impulsos e torques necessários para mudanças de velocidade linear e angular. Mudanças de velocidade angular podem também ser obtidas através da interação de atuadores magnéticos com o campo geo-

magnético. Entretanto, como os torques obtidos desta forma são de magnitude muito baixa, as manobras realizadas com este tipo de atuadores são de longa duração.

No caso de algumas manobras específicas, como por exemplo, a eliminação do movimento de rotação em torno de um eixo, mecanismos como o iô-iô podem também ser usados. Uma descrição detalhada das diferentes técnicas de controle e atuadores utilizados em manutenção de órbita e atitude e manobras orbitais é apresentada por Wertz (1991).

No caso da PSO os quatro propulsores a hidrazina constituem o meio utilizado para fornecer impulsos e torques após a separação do foguete de sondagem. Desta forma o menor “bit” de impulso fornecido pelos propulsores determina o movimento residual da plataforma ao final das manobras de frenagem e estabilização.

A PSO é constituída por tubos cilíndricos com diâmetro de 40 cm e um comprimento total de 280 cm, incluindo o sistema de recuperação e a ogiva cônica. Internamente a esta casca cilíndrica existe uma estrutura tipo treliça, cilíndrica, constituída por longarinas e “pratos” onde são montados os equipamentos, a instrumentação e carga útil, conforme ilustrado na Fig. 1 e na Fig. 2. A massa total da plataforma é de aproximadamente 110 kg. e os momentos principais de inércia são de 1,7 kg.m² no eixo de rolamento e de 47,5 kg.m² nos eixos transversais. Dados sobre o consumo de propelente, taxa de redução de rotação e tempo gasto para estabilização da plataforma são apresentados por Silva (1994).

No primeiro vôo da PSO o objetivo principal é testar e qualificar a plataforma e seus equipamentos. A plataforma dispõe de um sistema inercial, composto de dois giroscópios e três acelerômetros, que fornece as informações necessárias para a determinação a bordo e em tempo real do vetor de estado da plataforma (atitude e velocidade angular). O computador de bordo, utilizando as informações fornecidas pelo sistema inercial e aplicando uma lei de controle apropriada, comanda o sistema propulsivo para obter os torques necessários e anular o movimento de rotação em torno do centro de massa. A velocidade de rotação residual em torno de qualquer eixo deverá ser menor que 0,2 graus/s resultando em acelerações máxima de 10⁻⁶ g₀ (aceleração da gravidade ao nível do mar), caracterizando ambiente de micro-gravidade. O valor da velocidade de rotação residual em torno de cada eixo é função do momento de inércia em relação a este eixo e dos torques fornecidos pelos propulsores. Uma descrição detalhada do algoritmo de controle é apresentada em Silva (1994).

Todos os equipamentos que integram o sistema propulsivo estão montados em um único prato, constituindo um módulo bastante compacto.

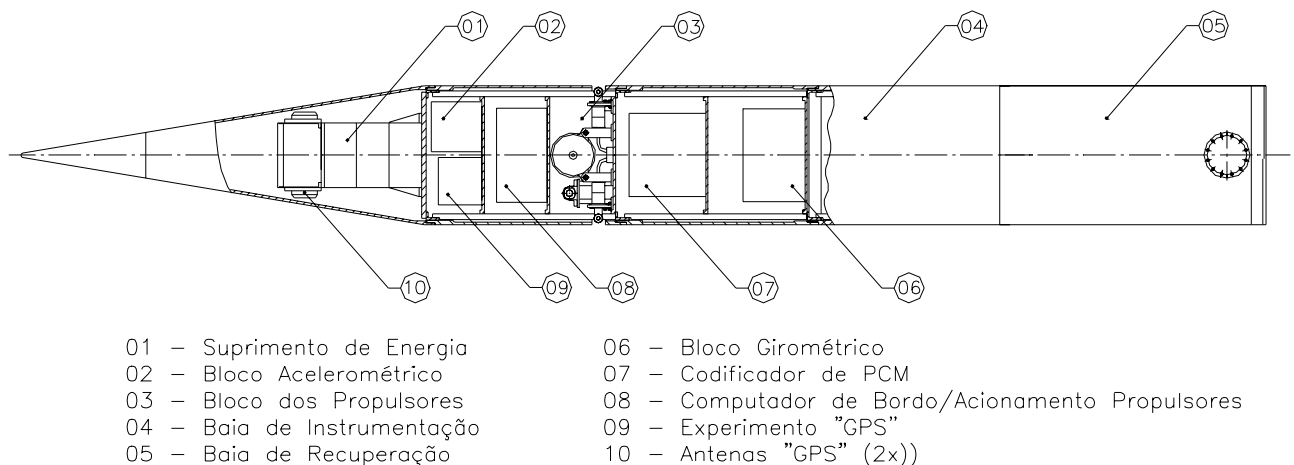


Figura 1 - Vista longitudinal da PSO (corte parcial)

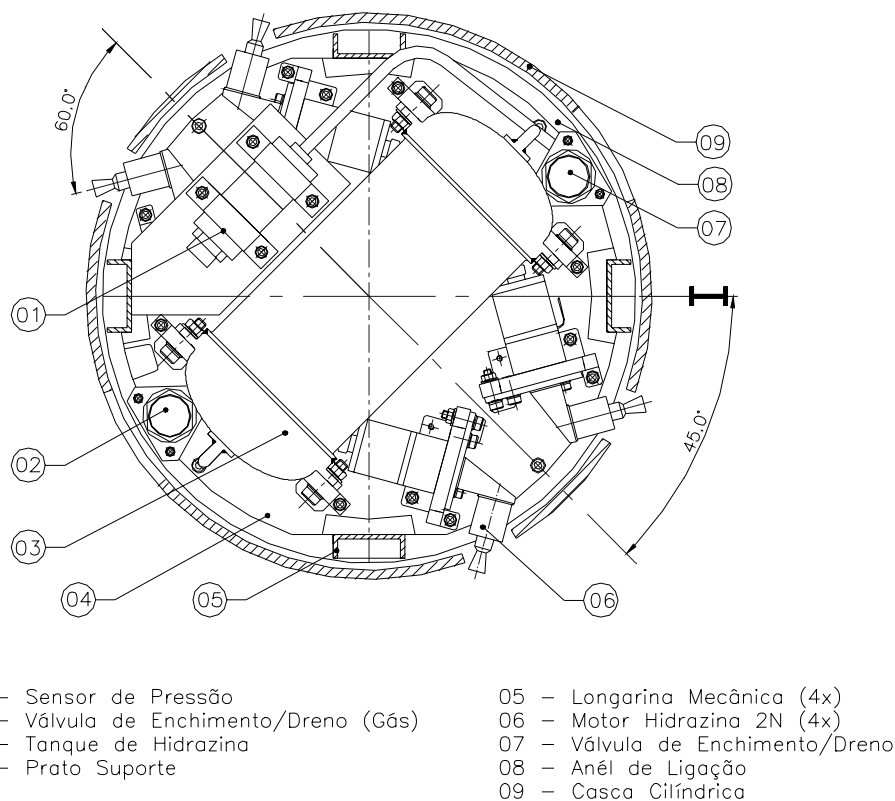


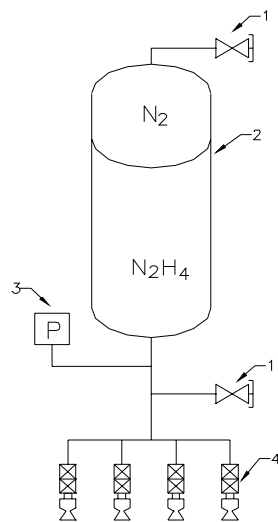
Figura 2 - Vista em planta do Bloco dos Propulsores

O prato de montagem do subsistema propulsivo está localizado aproximadamente 30 cm à frente do centro de massa da plataforma. A disposição dos propulsores no prato de suporte é mostrada na Fig. 2. Os eixos de empuxo dos quatro propulsores encontram-se todos em um mesmo plano, paralelo ao prato de suporte. O ângulo formado pelo vetor de empuxo com a direção radial é de 60 graus. Com esta disposição dos eixos de empuxo dos propulsores é possível aplicar torques nos três eixos da plataforma. Torques nos sentidos positivo e negativo de rolamento são obtidos com o acionamento simultâneo de dois propulsores alternados opostos. Torques nos eixos perpendiculares ao eixo de rolamento são obtidos com o acionamento simultâneo de dois propulsores localizados de um mesmo lado do cilindro. Os torques gerados pelo acionamento simultâneo de propulsores alternados opostos são puros, enquanto os torques gerados pelo acionamento de dois propulsores localizados do mesmo lado da plataforma, alteram também a velocidade do centro de massa da plataforma. Esta disposição do bloco propulsivo em relação ao centro de massa da PSO, possibilita a estratégia de controle em três eixos utilizando um número mínimo de atuadores (4).

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema propulsivo é composto de um tanque de propelente, duas válvulas de enchimento e dreno (uma para o propelente e uma para o gás de pressurização) um transdutor de pressão e quatro propulsores catalíticos a hidrazina com empuxo nominal de 2 N. Uma descrição detalhada do funcionamento de cada componente é apresentada em Hinckel (1991). O esquema de montagem dos componentes é mostrado na Fig. 3.

A alimentação da hidrazina para os propulsores é feita por gás pressurizado operando em regime de “blowdown” com razão de 4:1. A pressão inicial do tanque é de 22 bar e a pressão final de 5,5 bar. A operação em regime de “blowdown”, simplifica bastante o sistema de



1. Válvula de enchimento
2. Tanque de propelente
3. Medidor de pressão
4. Propulsor

Figura 3 – Esquema de montagem do sistema propulsivo

alimentação, não havendo necessidade de um regulador de pressão e de um tanque separado para o gás de pressurização.

O propelente e o gás de pressurização são armazenados em um único tanque. Para garantir que apenas o propelente se apresente à saída do tanque, este deve dispor de um dispositivo que separe o propelente do gás de pressurização. Este dispositivo pode ser uma bexiga, uma membrana impermeável, uma tela de retenção capilar ou um pistão (dispositivo usado na PSO). Em qualquer um destes é importante garantir elevada eficiência de expulsão (> 97%). É importante também que o sistema funcione na ausência de gravidade quando não é trivial garantir que o propelente se acumule junto à saída.

À medida que o propelente é expulso do tanque e a pressão de alimentação é reduzida, o empuxo dos motores também decresce, caindo de um valor inicial de 2 N a uma pressão de alimentação de 22 bar para 0.6 N para pressão

de alimentação de 5,5 bar. O impulso específico entretanto é muito pouco afetado por esta redução do empuxo.

2.1 O tanque de propelente

O tanque de propelente é constituído de um corpo cilíndrico com diâmetro interno de 77 mm e duas calotas elípticas que foram usinados separadamente em aço inoxidável e soldados com solda TIG (Tungsten Inert Gas). As conexões para o propelente e para o gás de pressurização estão localizadas nos polos das calotas elípticas. Um pistão, com uma seção cilíndrica de 30 mm de comprimento e uma calota cilíndrica com a mesma geometria da calota do tanque separa o propelente do gás de pressurização. O corpo do pistão foi usinado em uma única peça de PTFE (teflon). A espessura da parede do pistão é de aproximadamente 3 mm. A seção de vedação do pistão está localizada próxima à junção da parte cilíndrica com a calota elíptica. A diferença de pressão necessária para mover o pistão em ambos os sentidos é inferior a 0,12 bar. A vedação do pistão com o cilindro suporta uma diferença de pressão de no mínimo 0,5 bar. O volume interno do tanque é de 1200 ml, sendo que a capacidade máxima de propelente carregada de 900 ml.

2.2 Os propulsores

Os propulsores utilizados são do tipo monopropelente catalíticos a hidrazina. Este tipo de propulsores possui algumas características que os tornam bastante atraentes para utilização como atuadores em sistemas de controle reativos (i.e. com ejeção de massa). Estas características são listadas abaixo:

- **Robustez e simplicidade de operação.** A operação do propulsor monopropelente a hidrazina é efetuada através de comandos de abertura e fechamento da válvula do propulsor, não havendo necessidade de sistemas de pressurização, reguladores de

pressão ou controladores de razão de mistura. Isto torna a operação do sistema bastante simples minimizando os pontos de falha, aumentando a confiabilidade.

- **Desempenho.** Propulsores catalíticos a hidrazina com um bocal de razão de áreas de 50:1 operando no vácuo em regime estacionário, fornecem impulso específico de aproximadamente 230 s. Em regime pulsado, quando os transitórios de início e final de pulso são comparáveis com a largura do pulso, o impulso específico cai para valores entre 180 e 210 s. Entretanto esta queda é bem menos acentuada do que no caso de motores bipropelentes operando no mesmo ciclo de trabalho. Do ponto de vista global do sistema, a melhor medida do desempenho é a razão entre o impulso total embarcado e o peso total do subsistema. Avaliado com este critério, o desempenho do sistema catalítico a hidrazina supera o de sistemas bipropelentes para impulso total inferior a 10^5 Ns.
- **Versatilidade.** A possibilidade de operação em modo contínuo, regime pulsado e modulação inversa (“off modulation”) permite uma variação do empuxo efetivo numa faixa ampla de 2 a 100% do empuxo nominal, proporcionando maior flexibilidade ao algoritmo de controle.

Cada conjunto propulsor é constituído de uma válvula dupla, um capilar de injeção e uma câmara de empuxo. A válvula e o corpo do motor são acoplados através de uma flange com vedação por anéis de teflon. A flange é conectada à câmara catalítica através de uma estrutura de baixa condutância térmica para minimizar o fluxo de calor para o corpo da válvula. O eixo da câmara de empuxo é perpendicular ao eixo da válvula, caracterizando uma montagem em “L”, mais conveniente para a PSO. A válvula dupla consiste de duas válvulas montadas em série com atuação independente. Este arranjo permite uma maior segurança durante as operações de preparação do lançamento, durante o próprio lançamento e fornece também proteção redundante quanto à falha em aberto provocada pelo alojamento de alguma partícula no assento da válvula.

Durante a operação do motor a primeira válvula, localizada a montante, permanece aberta; a modulação do empuxo do motor é feita pela segunda válvula, localizada a jusante.

O catalisador utilizado para o carregamento da câmara catalítica foi sintetizado e impregnado com irídio no Laboratório de Combustão e Propulsão do Centro Espacial de Cachoeira Paulista

Cada conjunto propulsor é submetido a um teste de aceitação antes de ser integrado ao sistema. Nestes teste são determinados os seguintes parâmetros referentes à válvula: tempos de abertura e fechamento e tensão mínima para abertura, nível de vazamento de cada sede de vedação, operação nos limites máximo e mínimo da temperatura ambiente. Com relação ao propulsor, o teste consiste de uma série de tiros para determinar as características de operação do motor em todo o envelope de pressão de alimentação e ciclo de trabalho. Os níveis de pressão de alimentação testados são o valor máximo (22 bar) um valor intermediário (10 bar) e o valor mínimo (5,5 bar). Para cada um dos níveis de pressão de alimentação são realizados tiros contínuos e sequências de tiros pulsados com diferentes ciclos de trabalho: 2%, 10%, 20% e 50%, sendo a duração de cada ciclo de 1 segundo. A modulação inversa é testada com sequência de tiros pulsados e ciclo de trabalho de 87,5%.

2.3 As válvulas de enchimento e dreno

As válvulas de enchimento e dreno contém as conexões de acoplamento com os sistemas de solo para o carregamento do propelente e pressurização do tanque. Para garantir a segurança e a confiabilidade do sistema, os requisitos de estanqueidade destas válvulas são bastante severos. Para satisfazer estes requisitos cada válvula possui três sedes de vedação em série. A primeira sede de vedação é interna; o assento é de teflon e o êmbolo metálico. Esta

vedação poder ser aberta e fechada com o sistema conectado ao equipamento de solo. Após o sistema ser desconectado do equipamento de solo, duas vedações são adicionadas, em série com a vedação interna.

2.4 Transdutor de pressão

O transdutor de pressão utilizado é o Modelo 213-76-430-10 da Paine Corp. O transdutor tem eletrônica de condicionamento de sinal e amplificação embutidos. O transdutor é alimentado com uma tensão de 28 Vcc e fornece um sinal de saída de 0 a 5 Vcc. A faixa de trabalho do medidor é de 0 a 500 psi absoluto.

2.5 Sistema de solo

Equipamentos dedicados para o enchimento e a pressurização do tanque de hidrazina foram projetados e montados. O sistema de enchimento permite a transferência de uma quantidade controlada de hidrazina para o tanque de propelente. O sistema de pressurização é usado para pressurizar o tanque de propelente quando a plataforma já se encontra acoplada ao foguete, na fase final de preparação para o lançamento.

3 Conclusão e comentários finais

O sistema propulsivo da PSO, utilizando propulsores catalíticos a hidrazina com empuxo de 2 N, foi inteiramente projetado, fabricado e integrado nas instalações do INPE e empresas nacionais. Os componentes individuais do sistema foram submetidos a programas de testes cobrindo todo o envelope operacional e condições ambientais especificadas para o subsistema. Os resultados dos testes demonstraram o cumprimento de todos os requisitos de operação e especificações de desempenho e ambientais. A montagem final e os testes funcionais do sistema integrado foram estão concluídos, aguardando-se apenas a integração final com a plataforma e preparação para lançamento, programado para o final de 1999.

Agradecimentos

A montagem, limpeza e testes do bloco propulsivo colocaram à prova a engenhosidade e persistência dos técnicos Alice Ueda e José Godoi do INPE e Jaime de Souza do IAE/CTA. Os testes contaram com a colaboração de Carlos E. Migueis do LCP. A fabricação dos equipamentos foi coordenada pela Equatorial Sistemas e contou com os serviços da Digicon, LEG Tecnologia e CTM/SP.

REFERÊNCIAS

- Hinckel, J.N., Trava-Airoldi, V.J., Corat, E.J. and Bressan, C., 1991. *Propulsion Subsystem Component Development Program for the MECB/RSS Satellite*. AIAA/SAE/ASME 27TH Joint Propulsion Conference. June 24-26, 1991. Sacramento, CA.
- Silva, W.C.S. and Souza, L.C.G., 1994. *Spin and Angular Velocity Reduction of a Sub-Orbital Platform (PSO) Using Gas Jets* 2nd Brazilian Symposium on Aerospace Technology, 17-21 October, 1994. São José dos Campos, SP.
- Wertz, J.R. and Larson, W.J., Space Mission Analysis and Design (Cap. 11. Guidance, Navigation and Control). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991.

THE PROPULSION SUBSYSTEM OF THE SUB-ORBITAL PLATFORM

Abstract. This paper describes the design, fabrication and operation of the propulsion subsystem used for attitude control of the Sub-Orbital platform (PSO). The PSO is an experimental platform with a mass of approximately 110 kg, which is launched by a two stage sounding rocket, the Sonda III. At the end of the propulsive phase, the platform is separated from the last stage of the rocket, with an angular speed of 130 rpm and follows a parabolic trajectory with apogee of 400 km. Stabilization of the platform begins immediately after separation. During this phase the onboard computer, using a pre-loaded control strategy, commands the firing of the thrusters to obtain the torques required to reduce the rotational movement of the platform. The angular velocity in the three axes, at the end of the stabilization phase must be less than 0.033 rpm and the acceleration in every location on the platform must be less than $10^{-6} g_0$, characterizing a micro-gravity environment. The stabilization phase lasts approximately 3 minutes, after which the platform follows a parabolic flight path for approximately 7 minutes, during which micro-gravity experiments may be run.

The propulsion subsystem comprises a propellant tank with capacity of 900 ml of propellant, a pressure transducer, two fill and drain valves and four hydrazine monopropellant thrusters with nominal thrust of 2 N.

The propellant tank has a cylindrical body with elliptical cap ends. The pressurizing agent is gaseous and it is separated from the propellant by a free piston inside the cylindrical body. The system operates in blowdown with ratio of 4:1.

keywords: *Propulsive system, Micro-gravity, Control system*