



CONCEPÇÃO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA INJETORES UTILIZANDO FLUIDOS SUPERAQUECIDOS

Luiz Fernando dos Santos Souza¹ – luiz03fernando11@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina¹
Rua Presidente Prudente de Moraes, 406, Bairro Santo Antônio
89218-000 – Joinville – Santa Catarina

Arthur Deyna¹ – arthurdeyna@gmail.com

Viviane L. Soethe¹ – viviane.soethe@gmail.com

Heitor P. Junior² – heitor@dem.inpe.br
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais²
Avenida dos Astronautas, 1758, Bairro Jardim da Granja
12223-010 – São José dos Campos – São Paulo

José Nivaldo Hinckel² – hinckel@dem.inpe.br

Resumo: *Considerando a necessidade do Programa Espacial Brasileiro em desenvolver tecnologia nacional para seus satélites, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem trabalhado no desenvolvimento de uma bancada de teste para placas injetoras bi e monopropelentes utilizando fluidos em condições críticas de superaquecimento. Neste contexto, o presente artigo, parte de um projeto de iniciação científica vinculado ao programa PIBIC/INPE, e apresenta as etapas de concepção do projeto desta bancada assim como suas principais utilidades para o auxílio do desenvolvimento de pesquisas no setor de propulsão aeroespacial. Neste artigo é apresentado o conceito do sistema, a importância de testes em injetores de propelentes líquidos, assim como os resultados que a bancada poderá produzir e sua importância para o ensino do funcionamento de sistemas de propulsão líquida. Sendo um projeto cooperativo entre INPE e o Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM), o desenvolvimento de um equipamento deste tipo torna-se fundamental para a formação de engenheiros do curso de Engenharia Aeroespacial do CEM, que em virtude de sua recente instalação, necessita de infraestrutura de que possibilitem ao estudante a visualização, na prática, de conceitos estudados em sala de aula.*

Palavras-chave: *Bancada de testes, Propulsão aeroespacial, Ensino de engenharia.*



1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade do programa espacial brasileiro em desenvolver tecnologia nacional para seus satélites o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) observou a necessidade do desenvolvimento de uma bancada de testes para placas injetoras bi e monopropelente, utilizando fluidos em condições críticas de superaquecimento.

Este equipamento possui como principal objetivo fornecer condições adequadas para a caracterização de placas injetoras de propelente, condicionando o fluido de trabalho para condições similares as condições críticas de e adquirindo informações a cerca de temperatura, pressão, vazão e forma do jato de saída. Tal equipamento foi concebido de forma que sua utilização seja a mais didática possível, visando demonstrar como ocorre o funcionamento de um sistema de injeção para propulsores líquidos.

Sistemas como o apresentado neste artigo são de suma importância para a construção do conhecimento de estudantes de todos os níveis, pois com seu manuseio é possível averiguar todos os processos do sistema em estudo, e com os dados fornecidos pelo equipamento, modelos computacionais e teóricos aplicados a este estudo podem ser verificados e validados. Desta forma o equipamento cumpre funções de ensino e pesquisa no setor de propulsão aeroespacial.

Devido ao campus de Engenharia da Mobilidade ter iniciado suas atividades recentemente, a infraestrutura de laboratório para o ensino específico para os diferentes cursos de engenharia do centro, precisa ser adequada. Neste sentido, considerando-se as necessidades do curso de Aeroespacial, buscou-se realizar uma parceria institucional com o INPE, instituição renomada neste segmento no país, na qual, por meio de pesquisas em conjunto, desenvolveu-se o projeto de um equipamento de injeção para sistemas de propulsão líquida. O desenvolvimento deste projeto visa beneficiar o Curso de Engenharia Aeroespacial do CEM, considerando que tal equipamento poderá ser utilizado para auxiliar algumas disciplinas específicas, possibilitando aos estudantes a visualização na prática dos conceitos teóricos aprendidos. Cabe ressaltar que o presente projeto é de grande valia para os estudantes que o estão desenvolvendo, uma vez que tem possibilitado aos mesmos, além de conhecimento técnicos, o convívio com pesquisadores da área da engenharia que estão se especializando e vivência em laboratórios de pesquisa e Considerando o exposto apresentado é possível concluir que este tipo de projeto só têm a contribuir tanto para o desenvolvimento do curso de Engenharia da Mobilidade, quanto para o desenvolvimento acadêmico do estudante do curso de Engenharia Aeroespacial.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Motor Foguete a propelente líquido

De acordo com (VASQUES & SOUZA, 2008), os foguetes com motores a propelente líquido (MFPL) armazenam seu propelente no estado em tanques e por bombeamento enviam este propelente para a câmara de combustão, onde a energia de propulsão é liberada através de uma reação química. São classificados como motores foguete termoquímicos porque a energia que causa a elevação da temperatura dos gases está contida no próprio propelente.

Os motores foguete a propelente líquido são versáteis, apresentando um elevado desempenho e possuem a capacidade de trabalhar com controle de empuxo numa faixa de 50 a 130% do empuxo nominal. Esta simples capacidade de conseguir variar o empuxo proporciona um aumento na segurança do veículo espacial e permite uma excelente precisão de trajetória e órbita final. Os motores podem ser divididos conforme a sua aplicação:

- Baixo empuxo (< 100 N): controle de satélites;
- Pequeno porte (< 600 N): usados em controle de atitude, transferência de órbitas;
- Médio porte (< 100000 N): usados em estágios superiores;
- Grande porte (> 100000 N): usados em estágios iniciais ou como booster.

Segundo Almeida (2012), MFPL (“Figura 1”) apresentam a possibilidade de controle do módulo do vetor empuxo e da impulsão total ou do tempo de operação, que podem variar a cada missão e também a possibilidade de reignição. Os principais componentes de um MPFL são:

- Câmara de Empuxo;
- Gerador de Gases;
- Turbobomba;
- Válvulas e Reguladores;
- Ignitores;
- Elementos estruturais de fixação;
- Sistema de Controle.



Figura 1- Ilustração do MFPL

Os MFPL podem ser do tipo monopropelente ou bipropelente. Os motores bipropelentes são empregados quando se busca um alto desempenho e elevado empuxo. Os motores bipropelentes normalmente utilizam substâncias hipergólicas, isto é, a combustão se dá quando as substâncias combustível e oxidante entram em contato. Assim os motores são auto ignitáveis. Os motores monopropelentes usualmente utilizam como propelente a hidrazina anidra ou o peróxido de hidrogênio. Estes motores necessitam de um leito catalítico para produzir a decomposição do propelente. O motor-foguete bipropelente de pequeno porte apresenta as seguintes vantagens em relação ao motor sólido de mesmo porte:

- Elevado empuxo específico;
- Controle do empuxo ou da impulsão total;
- Possibilidade de ligar e desligar;
- São usados em missões de longa duração.

Por outro lado pode-se citar as principais desvantagens::

- São mais caros que os com combustíveis sólidos;
- Os propelentes usualmente utilizados são tóxicos;
- Exigem o uso de equipamentos especiais de manipulação dos propelentes;
- O combustível líquido é altamente inflamável.

A escolha de um propulsor e seus componentes deve ser guiada primordialmente pela sua aplicação, valor do empuxo, dimensões, tempo de funcionamento, simplicidade, confiabilidade, facilidade de manufatura e propelentes. A escolha de propelentes dentre as diversas substâncias químicas deve levar em conta os critérios listados a baixo:

- Ecológicos;
- Custo;
- Desempenho na forma de impulso específico;
- Toxicidade;

- Risco de explosão ou consequências no caso de vazamentos;
- Compatibilidade com os materiais;
- Estocabilidade;
- Peso específico;
- Infra-estrutura necessária.

O termo propelente líquido envolve todos os combustíveis e oxidantes líquidos. Entretanto, outros termos são utilizados para definir algumas classes de propelentes denotando algumas de suas características especiais. Neste contexto, pode-se distinguir:

- Criogênicos: São os fluidos com baixo ponto de ebulição a pressão ambiente, liquefeitos devido a queda da temperatura. Possuem problemas de armazenamento, exigindo reservatórios com isolamento térmico adequado e sistema de ventilação para exaustão dos gases formados. Adicionalmente, apresentam dificuldades de manuseio.
- Estocáveis: Ao contrário dos criogênicos, estes propelentes são líquidos em condições ambientes e estáveis em uma larga faixa de temperatura e pressão, são poucos reativos com os materiais comuns empregados na construção de reservatórios, o que permite que sejam armazenados por longos períodos de tempo.
- Monopropelentes: É a mistura homogênea ou heterogênea de substâncias puras combustíveis e oxidantes ou substância pura que contém agentes combustíveis e oxidantes. Normalmente são estáveis em condições atmosféricas normais. A maioria dos monopropelentes estáveis tem um baixo desempenho motivo pelo qual são empregados como fonte secundária de energia em motores foguete. Motores monopropelentes possuem menor impulso específico comparado aos bipropelentes.
- Bipropelentes: É a combinação de dois propelentes distintos, um oxidante e um combustível, armazenados separadamente e misturados apenas na câmara de combustão. Os motores foguete atuais fazem uso quase que exclusivamente dos bipropelentes devido possuir um melhor desempenho em relação aos monopropelentes estáveis.

2.2. Placas injetoras de propelente

A função da placa injetora é introduzir o fluxo de propelente na câmara de combustão em proporções ideais, além de atomizar e misturar os propelentes, permitindo assim a formação de uma mistura de oxidante e combustível homogênea que possa ser vaporizada e queimada (SALVADOR, 2009). Na “Figura 2”, temos placa injetora do tipo bipropelente.

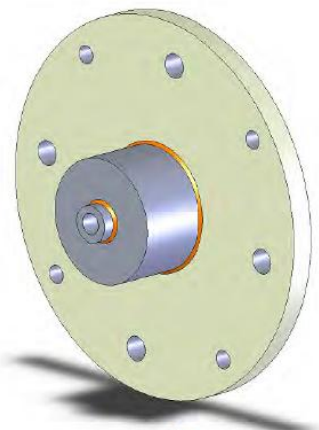


Figura 2– Placa injetora do tipo bipropelente

2.3. Atomização e Pulverização

O processo de atomização é aquele onde um jato, folha ou filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou gás de alta velocidade ou, ainda, como resultado de energia mecânica externa aplicada através de dispositivos rotativos ou vibratórios. Devido à natureza aleatória do processo de atomização, o spray resultante é normalmente caracterizado por um largo espectro de tamanhos de gotas (VÁSQUEZ & COSTA, 2010).

A combustão de propelentes líquidos em motores foguete são dependentes de uma atomização eficiente para aumentar a área superficial específica do combustível e atingir altas taxas de mistura e evaporação. Em grande parte dos sistemas de combustão, a redução do diâmetro médio da gota leva a altas taxas volumétricas de liberação de calor, à facilidade de acendimento e a uma larga faixa de queima e baixa concentração de poluentes.

Sprays podem ser produzidos de várias maneiras. Essencialmente o que se precisa é de uma elevada velocidade relativa entre o líquido a ser atomizado e o ar ou gás circundante. Alguns atomizadores fazem isso descarregando o líquido à alta velocidade em uma corrente de ar ou gás movendo-se lentamente. Isto inclui vários tipos de atomizadores sob pressão (pressure atomizers) e também atomizadores do tipo, copo ou disco rotativo, que ejetam o líquido pela sua periferia em alta velocidade. Um modo alternativo é expor uma folha ou jato de líquido em baixa velocidade a uma corrente de ar em alta velocidade. O melhor método para isso é conhecido como: “twin-fluid, air-assist ou airblast atomization”.

Existem diversos processos básicos relacionados à maioria dos métodos de atomização. Por exemplo, o escoamento no interior do atomizador governa a turbulência no combustível líquido ejetado. O desenvolvimento do jato ou da lâmina de líquido na saída do injetor e o crescimento de pequenas perturbações conduzem à desintegração em ligamentos e depois em gotas. Estes fenômenos são de importância fundamental para a determinação da forma e da penetração do spray resultante, assim como do número, da velocidade e da distribuição do tamanho das gotas formadas. Todas estas características são bastante afetadas pela geometria interna do atomizador, pelas propriedades do meio gasoso e pelas propriedades físicas do líquido. Por exemplo, uma maior viscosidade do líquido inibe o crescimento de instabilidades hidrodinâmicas e atrasa o início da desintegração do jato líquido saindo do injetor. Na maioria dos casos, a turbulência no líquido, a cavitação no bocal e a interação aerodinâmica com o meio gasoso, que aumenta com a densidade do meio, contribuem para a atomização (LEFEBVRE, 1989).

3. CONCEPÇÃO DA BANCADA

O desenvolvimento do presente projeto baseou-se, inicialmente, em um planejamento das principais etapas a serem desenvolvidas, por meio de um levantamento dos requisitos necessários ao pleno funcionamento do equipamento

Após análises do problema proposto foi possível listar as principais funções desejáveis ao equipamento e com isso realizar um levantamento dos requisitos do projeto. Como condição geral a bancada deve ser capaz de fornecer fluido de trabalho a

determinada temperatura e pressão a um elemento injetor que é o objeto de estudo, devendo operar da forma mais segura possível, cumprindo os requisitos listados abaixo:

- Pressão máxima de 40 bar no injetor;
- Temperatura máxima de 200°C;
- Variação máxima de 2°C na temperatura do fluido durante os testes;
- Vazão volumétrica de operação entre 5 a 100ml/s;
- Apresentar informações sobre:
 - Nível de temperatura no injetor e no tanque de armazenamento;
 - Nível de pressão no injetor e no tanque de armazenamento;
 - Nível de fluido de trabalho no tanque de armazenamento;
 - Vazão no injetor;
 - Forma geométrica do cone de saída do injetor;

Para atingir estas metas, é de suma importância a análise dos principais sistemas que compõem o equipamento, visto que o nível de precisão principalmente das informações obtidas do equipamento devem ser bastante altas, uma vez que estes dados poderão ser utilizados para pesquisas de ponta no setor aeroespacial.

De acordo com as informações obtidas nos requisitos do projeto, pode-se avaliar de uma maneira generalizada o conceito do equipamento. Elaborando assim o diagrama hidráulico do projeto, que pode ser visualizado na “Figura 3”.

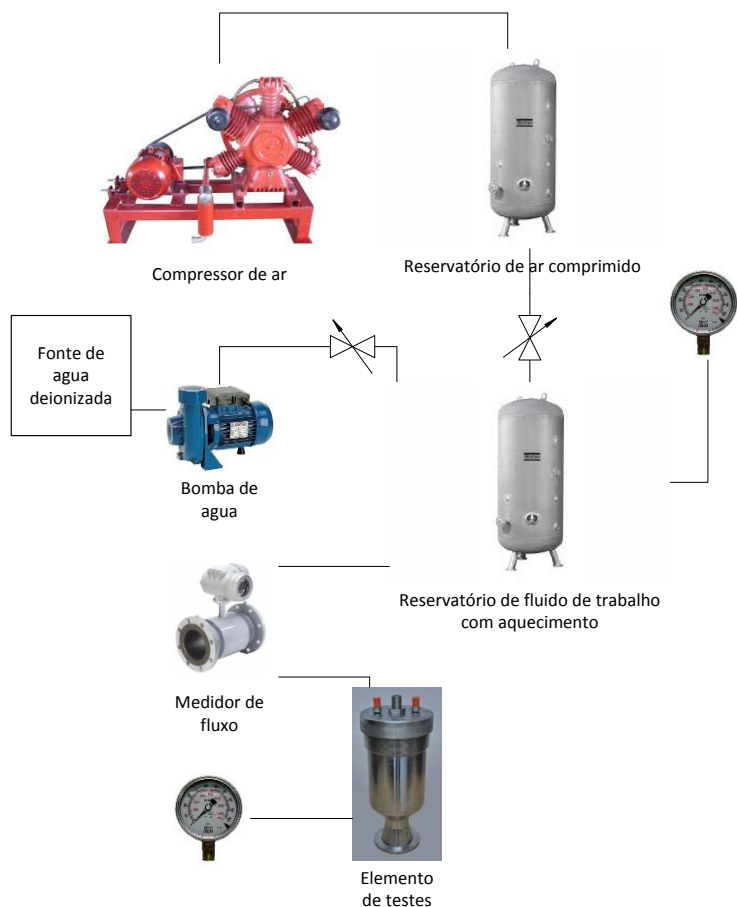


Figura 3 – Desenho esquemático do equipamento



Este conceito é resultado de algumas iterações de projeto após a análise de alternativas propostas, já considerando a linha de oxidante. Para facilitar o dimensionamento dos equipamentos, os mesmos foram separados em alguns sistemas, para que a composição da análise individual de cada um deles pudesse gerar a solução final do equipamento. O equipamento foi dividido em sistema de aquecimento, sistema de pressurização, sistema de abastecimento e sistema de medição.

O sistema de aquecimento é o mais importante dentro da proposta inicial do equipamento, pois é ele que proporcionará a condição de superaquecimento ao fluido de trabalho, para isto ele contará com aquecedores elétricos no reservatório de fluido, que assim como a tubulação até o injetor, deverá ser devidamente isolado para que se tenha a menor perda de calor possível. O sistema de pressurização será responsável por elevar a pressão do fluido, além da auto pressurização atingida devido ao aquecimento, pressurizando o tanque para que seja possível a injeção do fluido de trabalho nas condições desejadas pelo operador. No sistema de abastecimento temos os reservatórios de fluido de trabalho, os componentes para garantir sua segurança e o mecanismo necessário para abastecer o reservatório com o fluido de trabalho, que neste caso será água deionizada. No sistema de medição temos todos os sensores necessários para que se possa monitorar o funcionamento da bancada e verificar se a mesma está operando nas condições desejadas.

4. RESULTADOS ESPERADOS

Com o desenvolvimento deste equipamento, avaliações mais precisas poderão ser realizadas quanto as características de projeto de injetores de propelente para sistemas de propulsão espacial, implicando assim em uma contribuição positiva para o desenvolvimento do conhecimento na área. A bancada de testes em questão poderá fornecer informações sobre as características do fluido que chega ao injetor e também dar uma percepção visual da forma geométrica do spray de saída do injetor, informação muito importante para a caracterização do desempenho do mesmo.

A bancada também poderá ser utilizada como exemplo de funcionamento de motores foguete a propelente líquido, pois seus componentes se assemelham ao sistema real, devido a bancada ter como objetivo fornecer condições de testes simulando situações próximas da realidade.

5. CONCLUSÃO

Com os diversos avanços realizados no setor aeroespacial brasileiro, o desempenho e a confiabilidade do sistema de propulsão são de essencial importância para qualquer missão espacial. Com base nisso, o trabalho apresentado, visa colaborar com a área de ensino de engenharia sendo que o equipamento desenvolvido poderá ser empregado para a demonstração do funcionamento de um sistema de propulsor de foguete em disciplinas específicas ou até mesmo possibilitar a validação de algum projeto voltado para esta área. Além disso pode vir a ser utilizado para o desenvolvimento de pesquisas, contribuindo com o crescimento acadêmico dos alunos e da Universidade de um modo geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LEFEBVRE, A. H., Atomization and sprays, McGraw-Hill, New York, NY, 1989

SALVADOR, Cesar Addis Valverde; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Investigação experimental de um propulsor híbrido para satélites e veículos espaciais usando parafina e N_2O_4 como propelentes, 2009. 179p. Tese (Doutorado).

VÁSQUEZ, Roger Apaza; COSTA, Fernando de Souza. **Desenvolvimento de um injetor centrífugo dual para biocombustíveis líquidos**. Disponível em: <http://plutao.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao%4080/2010/06.25.16.18/doc/PCP_com_b_1092-pt.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2013.

DESIGN OF A TEST BENCH FOR FLUID INJECTION USING OVERHEATED

Abstract: *Considering the need of the Brazilian Space Program to develop national technology for its satellites, the National Institute for Space Research (INPE) has worked on the development of test benches for injection plates bi and monopropellant using fluids in critical overheating. In this context, the present work, the work of scientific initiative linked to PIBIC / INPE, shows the project design of these devices as well as its major utilities to aid the development of research in the field of aerospace propulsion. This work will be shown the concept of the system, the importance of testing injectors propellants, as well as the results that the equipment can produce and its importance for teaching the operation of liquid propulsion systems. Being a cooperative project between INPE and Engineering Center for Mobility (CEM), this equipment will be of great help in the training of engineers in the Aerospace Engineering course CEM, where their labs are under development.*

Key-words: *Test bench, Aerospace Propulsion, Teaching.*