

## DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE TESTES PARA MOTORES DE FOGUETES

Arthur Lasak Okuda<sup>1\*</sup>, Bruno Souza Carmo<sup>2</sup>

1. Estudante de IC da Escola Politécnica da USP

2. EPUSP - Departamento de Engenharia Mecânica / Orientador

### Resumo:

Na atividade aeroespacial muitas vezes não é possível realizar um teste completo do veículo em desenvolvimento até o seu lançamento, condicionando o sucesso ou fracasso da missão à eficácia dos testes de solo para a qualificação dos seus componentes individuais. No contexto de projetos independentes e de baixo custo (foguetes sub-orbitais e experimentais, por exemplo) isso se torna um desafio já que nem sempre as ferramentas necessárias para a realização desses testes são facilmente acessíveis.

O objetivo do presente trabalho consiste no projeto e construção de uma plataforma de testes instrumentada e dos correspondentes sistemas de controle e aquisição de dados remotos para a caracterização de motores de propulsão sólida com empuxo máximo de até 5kN, que seja de baixo custo e ainda assim atenda a todos os requisitos de segurança adequados para esse tipo de atividade.

Foi possível construir uma plataforma dentro das especificações necessárias utilizando-se materiais comerciais de fácil acesso e os dados obtidos foram coerentes com o esperado e puderam ser utilizados para caracterizar de forma satisfatória os motores testados.

**Palavras-chave:** Motores de Foguetes; Plataforma de Testes; Propulsão Sólida.

**Apoio financeiro:** Fundo Patrimonial Amigos da Poli, Escola Politécnica da USP, Grêmio Politécnico.

**Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição:** USP.

### Introdução:

O desenvolvimento de foguetes é fortemente dependente de testes de solo para garantir o bom funcionamento individual e integração entre os subsistemas durante o voo. No contexto da propulsão aeroespacial os ensaios estáticos constituem parte fundamental da validação do projeto de um motor de foguete (SUTTON; BIBLARZ, 2001).

Dentre os diversos fatores que podem ser utilizados na caracterização de motores de foguetes a variável escolhida para o estudo neste trabalho foi o empuxo, definido por Sutton e Biblarz (2001) como a força produzida por um sistema de propulsão sobre um veículo, ou ainda a força experimentada pela estrutura do foguete devido à ejeção de massa em alta velocidade.

O levantamento da curva de empuxo gerado em função do tempo é muito importante para a validação de motores a combustível sólido, pois além de servir como entrada para o cálculo da trajetória do veículo também pode ser utilizado para o estudo de parâmetros fundamentais para a caracterização do motor e propelente utilizados, tais como o impulso total do motor, o impulso específico e tempo de queima do propelente.

Segundo Kumar e Anjaneyulu (2015) grandes evoluções no campo da eletrônica têm fomentado o desenvolvimento da instrumentação para testes de motores e hoje muitas empresas dispõem de bancadas de testes com instrumentação para empuxo como parte fundamental da sua infraestrutura de testes.

Embora seja tecnicamente mais simples, a caracterização de motores em menor escala pode ser mais trabalhosa devido à dificuldade de acesso às instalações apropriadas. Desta forma, muitas vezes recorre-se ao desenvolvimento de uma bancada própria utilizando-se uma célula de carga e eletrônica apropriada para a aquisição dos dados. A popularização dispositivos eletrônicos do tipo *open-source* (Arduino, Raspberry Pi e outros) possibilitou o surgimento de conceitos de plataformas de teste para motores de menor escala, com uma relação custo-benefício muito

mais atrativa para grupos independentes. Exemplos de desenvolvimentos relevantes nessa área podem ser observados em BABAYOMI et al. (2013) e MARCHI (2006).

Este trabalho apresenta uma alternativa nessa linha com destaque aos conceitos de portabilidade, confiabilidade e segurança na operação.

O objetivo geral do presente trabalho consiste em projetar e construir uma plataforma de testes para a caracterização de motores de propelente sólido com empuxo máximo de até 5 kN.

### Metodologia:

Por critérios de segurança, a plataforma deve ser instalada em uma área isolada, distante da área de aquisição de dados, onde se situam os operadores durante o teste (KUMAR; ANJANEYULU, 2015). Desta forma, todos os ensaios foram realizados em área externa, estabelecendo um raio de segurança apropriado com base na categoria do motor testado.

A estrutura foi projetada de forma a minimizar o seu peso e facilitar a sua montagem além de conferir estabilidade suficiente ao motor, critérios necessários para a realização dos testes em localidades remotas. O material escolhido foram os perfis extrudados de alumínio, que atendem bem a esses três requisitos. A montagem completa da estrutura plataforma pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 – Plataforma montada para teste.

Para minimizar a extensão dos danos em caso de evento explosivo para o teste de motores de classe L ou superior toda a estrutura da plataforma e motor foi posicionada no interior de uma vala escavada no solo e coberta com uma chapa de aço de 40 kg, presa a uma base de concreto de 30 cm de altura por meio de quatro barras roscadas certificadas para esforços de tração de até uma tonelada-força cada. Esta montagem está mostrada na Figura 2.



Figura 2 – (a) Plataforma posicionada no interior da vala. (b) Chapa de aço com abertura para exaustão de gases.

O sistema de aquisição e processamento de dados foi inteiramente desenvolvido pela equipe para atender aos requisitos do projeto. Para as medições de força foi utilizada uma célula de carga do tipo “Z” de carga máxima de 500 kg da marca “Alfa Instrumentos” com sensibilidade de 2 mV. Esse modelo de célula de carga foi escolhido por sua alta capacidade e relativa rejeição de cargas laterais. Foi empregado também junto à célula um amplificador e conversor analógico-digital baseado no chip Hx711, com resolução de 24 bits e taxa de amostragem de 80 Hz. A precisão final obtida para a célula de carga com essa montagem foi de 1 N. O microcontrolador principal utilizado foi o Arduino UNO (ATmega328P) devido ao baixo custo de aquisição e à facilidade de uso e disponibilidade de bibliotecas e documentação.

Para satisfazer as recomendações de raio de segurança e ainda possibilitar maior facilidade de montagem e transporte foi implementado um sistema de comunicação sem fio entre a plataforma e a estação de controle e aquisição de dados. Para tal foi utilizado o módulo ESP8266, que foi conectado a uma porta serial emulada no microcontrolador principal via wi-fi e utilizado como ponte serial -wi-fi transparente entre a estação e a plataforma.

Ainda conectado ao Arduino foi adicionado um leitor de cartão SD para a gravação dos dados in situ como duplicata. A redundância na aquisição de dados garante que mesmo na ocorrência de alguma falha na comunicação wi-fi ou de inutilização da mídia flash na plataforma (no caso de evento explosivo, por exemplo) haverá uma cópia dos dados recuperável, possibilitando a análise dos dados ou evitando o prejuízo no caso da necessidade da repetição de testes.

O ignitor consiste de um sistema de dois relés com as saídas ligadas em série e controlados de forma independente de forma a impedir a ignição acidental. O circuito de ignição é alimentado com uma bateria independente e possui mecanismo próprio de

verificação de nível de tensão. A saída dos relés é conectada ao ignitor elétrico do motor.

O esquema simplificado de funcionamento do sistema e a foto do primeiro protótipo da eletrônica podem ser observados na Figura 3. Na plataforma foi utilizado o software nativo do Arduino para a aquisição de dados da célula e comunicação com o módulo wi-fi.

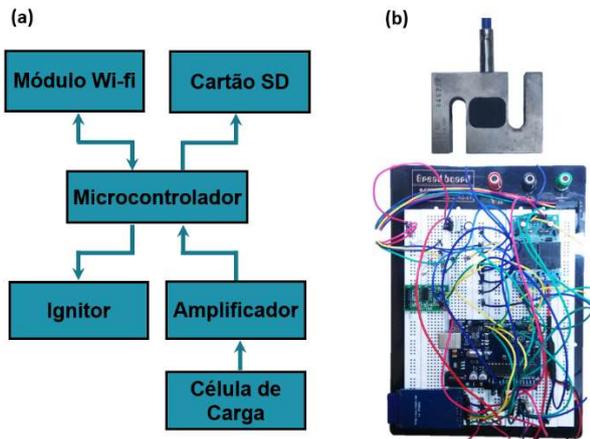


Figura 3 – (a) Diagrama simplificado do sistema de aquisição de dados e ignição. (b) Protótipo da eletrônica.

Para a aquisição e processamento de dados na estação de controle foi implementado um programa escrito em Python, que estabelece a comunicação com a plataforma via protocolo telnet. Além disso, foi implementada uma interface gráfica baseada nos módulos PyQt4 e PyQtGraph para o controle da plataforma e visualização dos dados.

Vale notar que o comando de ignição é enviado somente após a verificação da senha de ignição, que é configurada na plataforma e não pode ser modificada pela estação de controle. Além disso, a sequência de ignição pode ser interrompida a qualquer momento pela ativação do botão de pânico.

### Resultados e Discussão:

A estrutura da plataforma atendeu a todas as expectativas em termos de facilidade de montagem e estabilidade e pode ser adaptada com sucesso para motores com diâmetro de 50mm a 80mm. O peso total da estrutura foi de 14 kg, sendo facilmente transportado quando desmontado. O custo total do projeto foi de R\$942,16.

Na Figura 4 estão mostrados dois ensaios realizados na plataforma. O primeiro é de um motor de empuxo máximo de 170 N e impulso total de 270 N·s (equivalente à Classe H), que por ser considerado de baixo risco foi realizado a nível do solo. Já o segundo ensaio é do motor “Lazarus” de empuxo máximo de 1700 N

e impulso total de 4500 N·s (Classe L), que foi realizado na vala devido ao risco mais elevado.



Figura 4 – Plataforma de testes em operação. (a) Motor de empuxo máximo de 170 N. (b) Motor de empuxo máximo de 1700 N.

A eletrônica de aquisição de dados e o software para controle e visualização dos resultados do teste funcionaram como esperado e geraram resultados coerentes com o previsto para os motores testados conforme exemplificado na Figura 5.

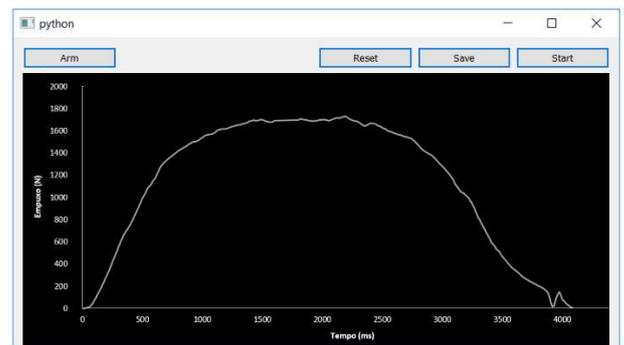


Figura 5 – Interface gráfica na estação de controle.

Os resultados puderam ser utilizados com sucesso tanto para a caracterização do propelente utilizado no caso de motores de testes quanto para a qualificação final de motores embarcados. O gráfico combinado de duas séries de testes (Motores “Kappa” e “Lazarus”) pode ser observada na Figura 6.

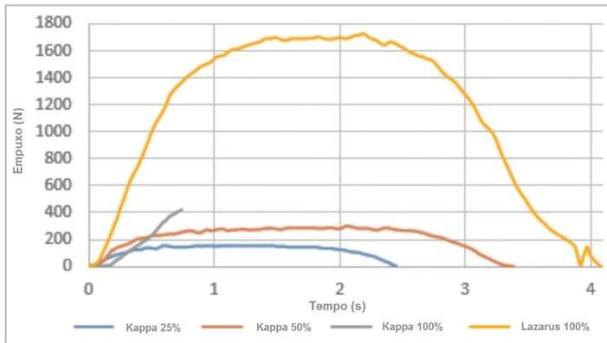


Figura 6 – Curvas de empuxo obtidas a partir do teste dos motores “Lazarus” e “Kappa” carregado com 25%, 50% e 100% da capacidade.

Pode-se notar que a curva correspondente ao motor “Kappa” carregado com 100% da sua capacidade está incompleta. Isso deve-se à ocorrência de falha estrutural no motor por evento explosivo. Todos os procedimentos de segurança para operação da plataforma estavam em vigor e com isso não houve nenhum dano significativo.

Tabela 1 – Comparação entre os valores teóricos e medidos por meio da plataforma para o motor “Lazarus”

	Valor Teórico	Valor Medido	Unidade	Desvio relativo
Impulso Total	4486	4644	N·s	3,5%
Impulso Específico	1200	1230	m/s	2,5%
Tempo de Queima	2,28	2,50	s	10%

Na Tabela 1 pode-se observar a comparação entre os dados medidos e os dados teóricos calculados para o motor “Lazarus” tendo como base as relações termodinâmicas para motores reais (SUTTON; BIBLARZ, 2001). Nota-se que os valores medidos de impulso total e impulso específico estão de acordo com os valores calculados teoricamente, sendo que o desvio obtido é completamente aceitável e pode ser atribuído a diferenças no processo de manufatura do propelente considerado.

Já os valores de tempo de queima apresentam desvio maior, que pode ser atribuído ao erro associado ao método de determinação de tempo de queima pela curva de empuxo, como apresentado em Sutton e Biblarz (2001) e às aproximações de regime permanente consideradas para esse cálculo, que não são completamente atendidas.

### Conclusões:

Foi possível construir uma plataforma dentro das especificações necessárias

utilizando-se materiais de baixo custo e fácil acesso, atendendo a todas as especificações de segurança recomendadas. A plataforma foi utilizada para o teste de um motor de empuxo máximo de 1700 N e os dados obtidos foram coerentes com os valores calculados teoricamente para o impulso total e específico e ligeiramente discordantes para a análise de tempo de queima, o que pode ser atribuído à incerteza na determinação do tempo de queima pela curva de empuxo. Após a validação dos dados obtidos, a plataforma pode ser utilizada para caracterizar de forma satisfatória os motores testados.

### Referências bibliográficas

BABAYOMI, O. O. et al. **Low cost ground test equipment for atmospheric rocket flights using embedded systems**. 2nd International Conference on Emerging and Sustainable Technologies for Power and ICT in a Developing Society, IEEE NIGERCON 2013 – Proceedings, 2013

KUMAR, A.; ANJANEYULU, L. **Emerging trends in instrumentation in rocket motor testing over three decades**. Defence Science Journal, 2015.

MARCHI, C. H. **Testes estáticos de motores-foguete a propelente sólido de espaçomodelos de 11 Set 2006**. Disponível em [http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/bibliografia/relatorio TE EM 11 set 2006.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/foguete/bibliografia/relatorio%20TE%20EM%2011%20set%202006.pdf) Acesso em 17 fev. 2017

SUTTON, G.; BIBLARZ, O. **Rocket Propulsion Elements**. 7ª ed. John Wiley & Sons, 2000.