



Prototipagem de uma bomba criogênica elétrica para motores de foguete a propelente líquido de pequeno porte

Prototyping of an electric cryogenic pump for small liquid propellant rocket engines

Caique Igor Alves Marqueto¹, Gabriel Inácio Pontin²

¹ Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB

² Docente do curso Engenharia Mecânica do Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB

Resumo

Os motores de foguete a propelente líquido são amplamente utilizados no setor aeroespacial, com destaque em foguetes, satélites, veículos lançadores de satélites e demais dispositivos de propulsão. Para seu funcionamento são necessários os combustíveis, bombas, sistemas de controle e motor, sendo o enfoque desse projeto os conjuntos de bombeamento. O estudo tem por objetivo desenvolver o protótipo uma motobomba elétrica criogênica, a fim de verificar sua utilização e viabilidade visando substituir as turbobombas tradicionalmente empregadas nos motores atuais e simplificando sua produção para projetos de pequenos satélites e veículos lançadores. Nos testes de rotação máxima em relação à vazão, o protótipo apresentou resultados em sua simulação compatíveis com o esperado do uso real, chegando a valores próximos a 20000 rpm a uma vazão de 50 l/m, assim atingindo as condições ideais para o protótipo. Para o desenvolvimento do modelo real, destaca-se que será necessário, em próximas versões, a construção dos equipamentos visando maiores níveis de resistência, como, por exemplo, a construção do elemento em metal e a utilização de um motor com maior potência.

Palavras-chaves: motobomba, propulsão, veículo lançador de satélites.

Abstract

Liquid propulsion rocket engines are widely used in the aerospace sector, especially for rockets, satellites, satellite launch vehicles, and other propulsion devices. For its operation, fuels, pumps, control systems, and engines are necessary, with the approach of this project being the pumping sets. This study aims to develop the prototype of a cryogenic electric motor pump with the aim of verifying its use and planning to replace the traditional turbo-pumps used in current engines and simplifying its production for small satellite and launched vehicle projects. In the maximum rotation tests in relation to the flow, the prototype presented results in its simulation compatible with those expected from real use, reaching values close to 20000 rpm at a flow of 50 L/m, thus reaching the ideal conditions for the prototype. For developing the real model, it is highlighted what will be necessary in the next versions in the construction of equipment with greater levels of resistance, such as the construction of the metal element and the use of a motor with greater power.

Keywords: Motor pump, Propulsion, Satellite launch vehicle.

Autor para correspondência: Me. Gabriel Inácio Pontin. **E-mail:** gabriel.pontin@unifeb.edu.br

Recebido em: 29 de maio de 2023

Aceito para publicação em: 05 de dezembro de 2023

Introdução

A ideia do motor de foguete movido a propelente líquido remonta ao livro *The Exploration of Cosmic Space by Means of Reaction Devices* (A exploração do espaço cósmico pelos meios de dispositivos de reação), escrito pelo professor Konstantin Tsiolkovsky. Publicado em maio de 1903, esse tratado influente na Astronáutica teve inicialmente uma distribuição limitada fora da Rússia (Lousada, 2019).

O marco do primeiro voo de um foguete de propelente líquido ocorreu em 16 de março de 1926 em Auburn, Massachusetts, quando o professor americano Dr. Robert H. Goddard lançou um veículo utilizando oxigênio líquido e gasolina como propelente. Denominado “Nell”, o foguete alcançou uma altitude de apenas 41 pés durante 2,5 segundos de voo antes de cair em um campo de repolho, porém foi uma demonstração importante de que o foguete de propelente líquido era uma possibilidade viável (Prabhakar, 2016).

Após a Segunda Guerra Mundial, tanto o governo americano quanto a União Soviética passou a considerar os foguetes de propelente líquido como armas, o que deu início à corrida espacial. Nesse contexto, um dos componentes de extrema importância e que envolvia grandes desafios de engenharia eram as turbobombas, bombas complexas que se tornaram possíveis somente após muitos testes e melhorias durante o projeto do foguete V2. Mais de 100 protótipos foram perdidos em testes devido, em grande parte, ao mau funcionamento das turbobombas que alimentavam a câmara do motor (Oliveira, 2016).

Uma turbobomba é composta por uma bomba rotodinâmica acoplada a uma turbina a gás, geralmente montadas no mesmo eixo ou conectadas por engrenagens. Seu objetivo é gerar fluidos em alta pressão para alimentar a câmara de combustão ou para outros usos (Oliveira Filho, 2014). Nas aplicações de foguetes de combustível líquido, as turbobombas fornecem combustível e oxidante em níveis extremamente altos de fluxo de massa e pressão. Geralmente, o combustível e o oxidante são bombeados por bombas separadas (Creder, 2012).

As turbobombas aumentam a baixa pressão dos tanques para níveis muito elevados, necessários para vencer a pressão de combustão dentro da câmara do motor. Os principais desafios de projeto de uma turbobomba incluem a alta pressão de

trabalho, as altas rotações necessárias para lidar com o imenso volume de fluxo e pressão, além do baixo peso e da complexidade do sistema gerador de gases para alimentar a turbina (Chaves, 2008).

Assim, a presente pesquisa tem como objetivo desenvolver o protótipo de uma bomba criogênica elétrica para motores a propelente líquido de pequeno porte, com o intuito de viabilizar sua construção e ampliar o conhecimento e impulsionar o desenvolvimento da indústria aeroespacial que está em constante avanço.

Material e Métodos

O projeto foi realizado em escala real através de software de modelagem 3D SolidWorks® com todos os sistemas da bomba, como rotor, sistema de selo mecânico, caracol, sendo a carcaça da bomba, motor e acoplamento do conjunto motor-bomba (Figura 1). Inicialmente, o projeto foi iniciado pelo desenvolvimento da carcaça da bomba com base no motor selecionado para protótipo, na sequência foi projetado o alojamento para selo mecânico, o sistema de direcionamento do fluxo de saída do fluido (caracol) e, por fim, o rotor do modelo visando a otimização do sistema e a diminuição das perdas de cargas, aumentando assim a eficiência do modelo.

Com auxílio da ferramenta de simulação FlowSimulate® do software utilizado na modelagem (SolidWorks®), foi executada a sequência de simulações e aprimoramentos no projeto e designer dos componentes, para obter a maior eficiência possível, tanto no desenho do caracol buscando reduzir ao máximo o atrito e perda de carga do fluido nas paredes internas e aprimoramento do rotor para as características de temperatura e densidade do oxigênio líquido. Ao todo foram feitas mais de 20 simulações, que levaram pouco mais de 1h cada uma para concluir, até chegar no modelo final com a eficiência e pressão de trabalho projetado, conforme Figura 2.

A partir da simulação realizada e dos dados obtidos, foi desenvolvido um protótipo através do método de impressão 3D por estereolitografia (SLS). Os testes iniciais foram realizados por meio da montagem dos componentes impressos (Figura 3A).

Na sequência foi montado o conjunto completo da bomba em escala real, com um motor de escovas DC modelo 775 de 36V e 20.000 rpm em uma plataforma de testes para aquisição de

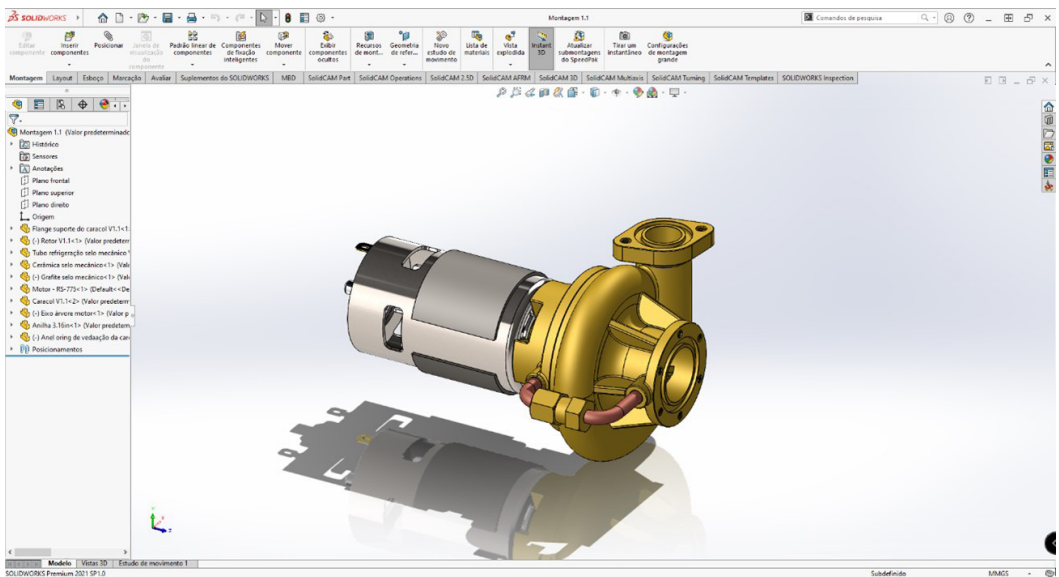


Figura 1 – Projeto da bomba criogênica líquida.
Fonte: Próprio autor, 2023.

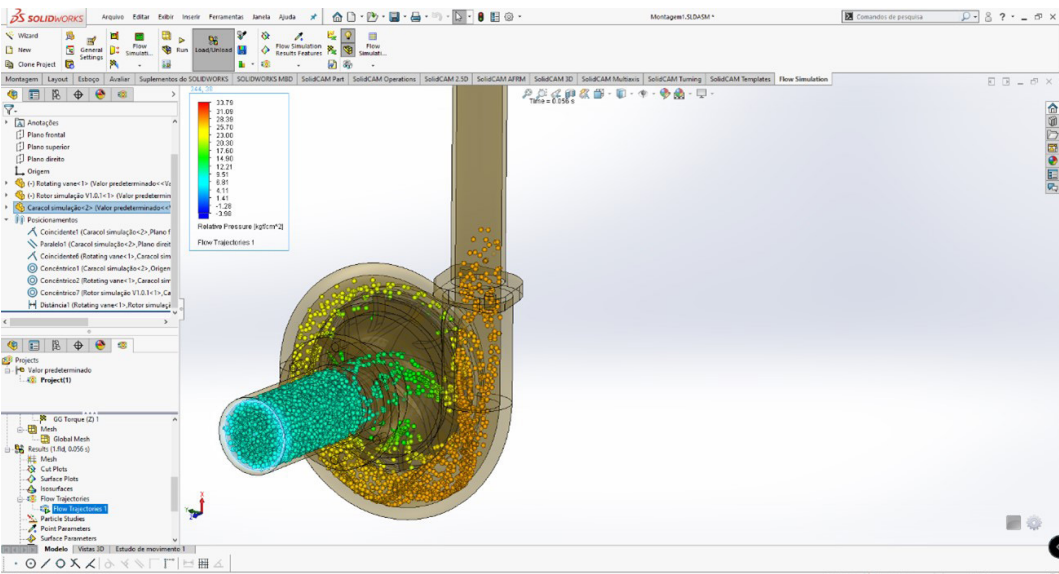


Figura 2 – Simulação no FlowSimulate®.
Fonte: Próprio autor, 2023.

dados desta através de um (Arduino) Esp-32 com processador dual core Tensilica Xtensa 32-bit LX6 com Clock ajustável de 80MHz até 240MHz para controle e processamento dos dados. Também foi adicionado um sensor de fluxo de efeito *hall* instalado na entrada da bomba para aferição de vazões e um módulo tacômetro óptico instalado no eixo da bomba (Figura 3B).

Relacionado ainda à parte eletrônica, foram instaladas uma ponte de potência com transistores 50N06 para controle de rotação do motor, sendo que nesse modelo o sistema ficará encarregado de fazer todos os cálculos necessários para leitura dos sensores, além do controle de rotação do motor por PWM através do comando enviado pelo operador por um potenciômetro. Todos os dados

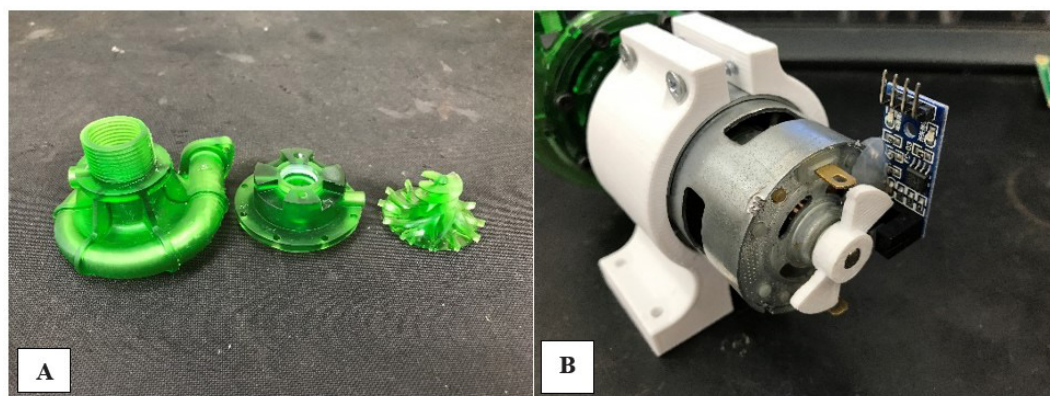


Figura 3 – Componentes feitos em impressora SLS e Tacômetro óptico instalado no eixo da bomba.
Fonte: Próprio autor, 2023.

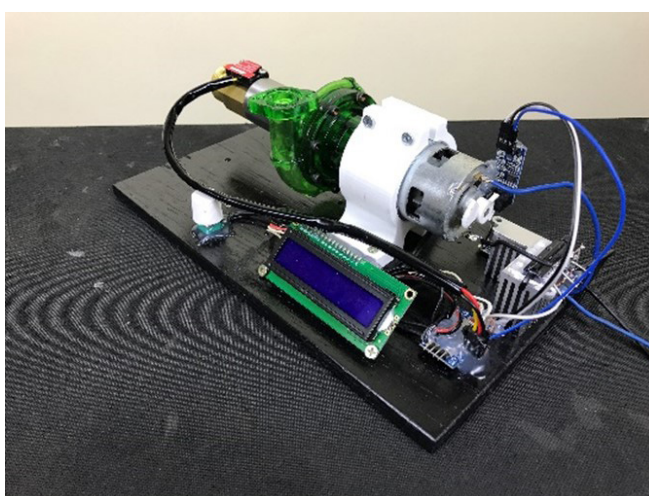


Figura 4 – Plataforma de testes montada.
Fonte: Próprio autor, 2023.

processados serão informados em tempo real em uma tela de cristal líquido de 16x2 centímetros, sendo estes componentes ligados ao Arduino e fixos em uma plataforma (Figura 4).

Após a montagem foram executados testes com o protótipo da bomba na plataforma para verificar as conformidades com as simulações computacionais, com o objetivo de validar os dados obtidos da mesma, como relação de vazão e rotações, vazão total e desempenho do rotor e designer do caracol.

Resultados e Discussão

Na simulação através do software FlowSimulate®, pode-se verificar que os resultados no protótipo

inicial foram bastante promissores com a curva de vazão, comportando-se exatamente como o esperado, com base nos dados da simulação, estando a sua eficiência máxima a 20.000 rpm com uma vazão de mais de 50 l/min definida através das simulações realizadas. Porém, alguns pontos não foram possíveis de verificação, como a pressão máxima alcançada pela mesma em razão de o material empregado no protótipo não suportar tais esforços (Figura 5A e B).

Foi detectado como ponto de melhoria a substituição do motor empregado, pois este só foi capaz de chegar próximo à rotação de trabalho desejada com sobretensão de 36v para 60v, para que alcançasse a potência desejada no projeto, contribuindo para uma redução considerável

na vida útil dele, que por si só já não tem uma confiabilidade muito alta.

Referente à questão de viabilidade do projeto, a Tabela 1 apresenta os custos relacionados ao protótipo produzido. Todo levantamento foi realizado com base nos materiais utilizados no protótipo, visando o menor custo de produção e fabricação do projeto.

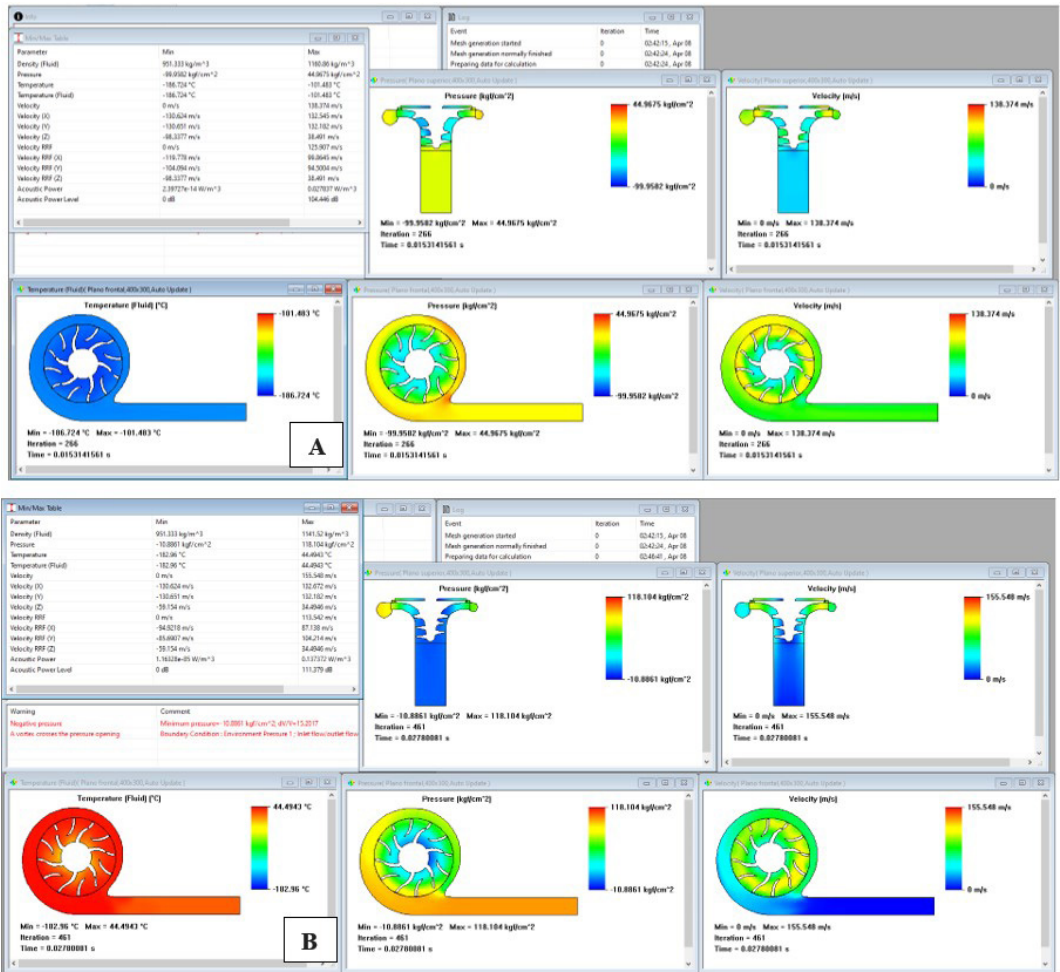


Figura 5 – A) Simulação de pressão estática. B) Simulação da vazão.

Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 1 – Custos do protótipo de motobomba.		
1	Motor Dc 775 24v 20.000 Rpm	R\$ 132,00
1	Fonte Chaveada Eletrônica 36v 10a 360w 110/220v	R\$ 110,99
1	Sensor Hall Medidor de Fluxo Água 1 a 30 litros min 3/4	R\$ 77,70
1	Flexível Alta Vazão Inox Passagem Plena 3/4 Macho X 3/4 Fêmea 30cm	R\$ 96,10
1	Prototipagem impressão 3D em resina	R\$ 260,00
1	Placa Compatível com Arduino Pro Mini Atmega328p 16mhz 5v	R\$ 38,00
1	Sensor de Velocidade Arduino Chave Óptica Para Encoder 5mm	R\$ 18,90
Total		R\$ 733,69

Fonte: Próprio autor, 2023.

Para que o protótipo seja qualificado para alimentar um motor de foguete, além de maior confiabilidade e segurança para suportar as temperaturas de trabalho criogênicas, que giram em torno de $-182,96^{\circ}\text{C}$ (temperatura do O_2 no estado líquido), será necessário o emprego de um motor do tipo *brushless*, mais potente e com uma confiabilidade e durabilidade maior.

Conclusão

Os resultados com os testes em bancada do primeiro protótipo em resina se mostraram promissores, porém alguns pontos não puderam ser validados, como a pressão de trabalho máxima da bomba e confiabilidade desta em temperaturas criogênicas, devido às limitações do material empregado para impressão 3D do protótipo. Além de uma clara limitação do tipo de motor empregado, sendo necessário a montagem de novos protótipos pelo processo de fundição por cera perdida e com o emprego de um motor do tipo *brushless*, para que testes mais intensos e precisos sejam executados e posteriormente, validando assim os dados obtidos até este momento com o projeto.

Deverá também ser montada uma nova plataforma de testes contendo um reservatório isolado termicamente para o oxigênio líquido LOX, além de sensores de fluxo, sensores de pressão, rotação, válvulas de controle servo acionadas e todo o sistema eletrônico de controle e aferições dos dados para a validação de dados obtidos através de software e do protótipo de resina, trabalhando já com o fluido criogênico para que sejam feitos testes mais rigorosos e intensivos, como testes de pressurização, testes de cavitação, além de testes

de confiabilidade e vida útil dos componentes da mesma em temperaturas criogênicas abaixo de $-182,96^{\circ}\text{C}$ (temperatura do O_2 no estado líquido).

Na fabricação do modelo final deverão ser utilizados processos de fabricação que unem processos mais tradicionais, como a fundição, a processos mais avançados, como a impressão 3D de resina através do processo de fotolitografia para a confecção dos moldes de fundição através do emprego de uma resina especial calcinável que evapora do molde em temperaturas elevadas, deixando-o pronto para receber o material fundido (processo equivalente ao de cera perdida). Nesse caso específico, latão, além de usinagem CNC para acabamento e ajustes finais das peças fundidas.

Referências

- Chaves, E. (2008). *Bombas hidráulicas e sistemas de bombeamento*. São Paulo: Érica.
- Creder, H. (2012). *Máquinas de fluxo*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Lousada, M. (2019). *Espaço: 100 anos de história*. São Paulo: Editora Leya.
- Oliveira Filho, O. M. (2014). *Introdução à propulsão espacial*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Oliveira, C. R. (2016). *A conquista do espaço: dos foguetes à exploração interplanetária*. Rio de Janeiro: Editora Casa da Palavra.
- Prabhakar, T. (2016). *Introduction to pumping stations for water supply systems*. Boca Raton: CRC Press.