



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS GEOMETRIAS DOS NARIZES NA AERODINÂMICA E NA ESTABILIDADE DE MINIFOQUETES

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5246

Autores: SARA STEFANELLO FISCHBORN, ARTHUR MONTEIRO FILHO, PAULO VICTOR TOSO HELKER

Resumo: O estudo dos foguetes abrange uma ampla variedade de aplicações, desde a exploração espacial até a defesa nacional, com uma história que remonta aos artefatos concebidos por Arquitas em 400 a.C. até as inovações contemporâneas lideradas por Elon Musk. No ambiente acadêmico, eventos como a Mostra Brasileira de Foguetes (Mobfog) reúnem estudantes em torno do desafio de lançar modelos próprios, destacando a importância dos princípios de aerodinâmica e estabilidade. Além disso, o crescente interesse no foguetemodélismo, evidenciado por eventos como o Festival de Minifoguetes de Curitiba, mostra sua relevância tanto como atividade recreativa quanto para fins científicos. A otimização do design do nariz do foguete é essencial para minimizar o arrasto aerodinâmico e maximizar o desempenho, enfrentando as exigências variadas de diferentes missões espaciais. Este estudo visa investigar e identificar a melhor geometria para o nariz de um minifoguete de lançamento vertical, visando a máxima ascensão, mitigação do arrasto e estabilidade durante o lançamento. Utilizando o software OpenRocket, os objetivos específicos incluem projetar o minifoguete conforme as especificações da Mobfog, analisar as três principais geometrias propostas - cônica, ogiva e elipsoide - e selecionar o melhor formato com base na estabilidade e aerodinâmica verificadas nas simulações. A justificativa para este estudo reside na aplicabilidade dos conceitos de aerodinâmica e estabilidade dos minifoguetes em diversas áreas da engenharia e suas indústrias, desempenhando um papel crucial em missões espaciais, comunicações, pesquisa científica, segurança nacional e inovação tecnológica. A pesquisa se baseia em métodos qualitativos, revisão de literatura e estudo de caso para uma análise profunda e identificação de nuances essenciais. A definição da geometria do foguete segue o modelo comercial TKOR 2000, com 60 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro para o corpo, quatro aletas e um motor composto por fertilizante Krista-K e açúcar cristal. Para os narizes do foguete, variando entre cônico, elipsoide e ogival, são utilizados poliestireno com dimensões específicas. A implementação da metodologia de análise da influência da aerodinâmica e estabilidade do nariz é realizada por meio do software OpenRocket, com configuração detalhada das propriedades do foguete e simulações para identificar a melhor geometria de nariz. Os cálculos consideram dados geográficos e climáticos específicos, garantindo uma análise precisa das condições de lançamento. Este estudo reflete uma análise metódica, destacando a importância da validação de dados, busca por informações pertinentes e assimilação de conceitos teóricos robustos ao longo do processo investigativo. Ao simular o modelo final do minifoguete, observou-se a necessidade de ajustes nas aletas e no diâmetro do nariz para garantir a estabilidade ideal. Após as modificações, o modelo final foi obtido, com variação apenas no formato do nariz. Ao comparar diferentes geometrias de narizes, mantendo o mesmo corpo, motor e aletas, foram analisados parâmetros como a localização do centro de gravidade (CG), do centro de pressão

(CP), o apogeu e a estabilidade. Os resultados indicaram que a geometria de nariz ogival alcançou o maior apogeu e uma boa estabilidade, tornando-se a mais indicada para melhor desempenho e estabilidade em lançamentos de minifoguetes similares.

Palavras-chave: *Minifoguetes. Otimização. Nariz. Simulação. Estabilidade.*

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS GEOMETRIAS DOS NARIZES NA AERODINÂMICA E NA ESTABILIDADE DE MINIFOGUETES

1 INTRODUÇÃO

Os foguetes evoluíram significativamente e são amplamente utilizados na exploração espacial, missões interplanetárias, pesquisas tecnológicas e defesa. Desde os experimentos de Arquitas, em 400 a.C., os princípios dos foguetes têm sido desenvolvidos, culminando em avanços, como a espaçonave Starship de Elon Musk. No meio acadêmico, conceitos de matemática, química e física aplicados a minifoguetes tornam o aprendizado mais atrativo, como exemplificado pela Mostra Brasileira de Foguetes (Mobfog), que reúne estudantes de diversas idades para lançamentos bem-sucedidos. Além disso, o foguetemodélismo é crescente em uso recreativo e pesquisas científicas, como no Festival de Minifoguetes de Curitiba.

Os foguetes possuem uma configuração padrão (nariz, corpo e aletas), e cada elemento afeta seu desempenho. O estudo do nariz do foguete é crucial para otimizar a eficiência aerodinâmica e reduzir o arrasto. Este artigo investiga como projetar um nariz de foguete que maximize a eficiência aerodinâmica e desempenho, equilibrando fatores como estabilidade de voo e carga útil. Utilizando o software OpenRocket, o objetivo é identificar a melhor geometria de nariz para minifoguetes, considerando estabilidade e aerodinâmica. Compreender esses conceitos é essencial para aplicações em diversas áreas da engenharia e para avanços tecnológicos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico organiza a pesquisa, permitindo a interpretação informada dos achados, relacionando-os às teorias estabelecidas (Lakatos e Marconi, 2003). Este estudo abrange experimentação em sala de aula, fundamentos da ciência dos foguetes, noções físicas como arrasto, centro de pressão e gravidade, geometrias dos narizes de foguetes e o uso do software OpenRocket.

2.1 Relevância da Experimentação em Sala de Aula

A experimentação em Ciências motiva e facilita a compreensão dos fenômenos, melhorando o aprendizado (Giordan, 1999). Conceitos e experimentos relacionados a foguetes são eficazes como ferramentas pedagógicas (Rodrigues, 2022). Minifoguetes permitem a prática dos princípios ensinados (Miranda, 2021).

2.2 A Ciência dos Foguetes

A construção de foguetes iniciou-se com o "Principia", de Isaac Newton, estabelecendo as três Leis do Movimento. A elevação de um foguete requer uma força desequilibrada (Primeira Lei). O impulso depende da massa do combustível e da velocidade do gás liberado (Segunda Lei). O movimento do foguete é oposto ao impulso do motor (Terceira Lei). Esses princípios são fundamentais no estudo de foguetes (NASA, 1996).

Arrasto

O arrasto é a força de resistência que um objeto enfrenta ao se mover através de um fluido (Anderson, 2017). A força de arrasto (F_d) é calculada por:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_f V^2 \quad (1)$$

Onde C_d é o coeficiente de arrasto, ρ é a densidade do fluido, A_f é a área frontal do objeto, e V é a velocidade do objeto.

Centro de Pressão

O centro de pressão é o ponto onde a força aerodinâmica é concentrada, variando com o ângulo de ataque (Ronningen, 2008). Sua localização (C_p) é dada por:

$$C_p = \sum \frac{A d_r}{A_{Total}} \quad (2)$$

Centro de Gravidade

O centro de gravidade é o ponto onde a massa do objeto é concentrada, influenciando seu comportamento (Ronningen, 2008). Sua posição (C_g) é descrita por:

$$C_g = \sum \frac{W d}{W_{Total}} \quad (3)$$

Se o centro de pressão estiver à frente do centro de gravidade, o foguete pode tornar-se instável.

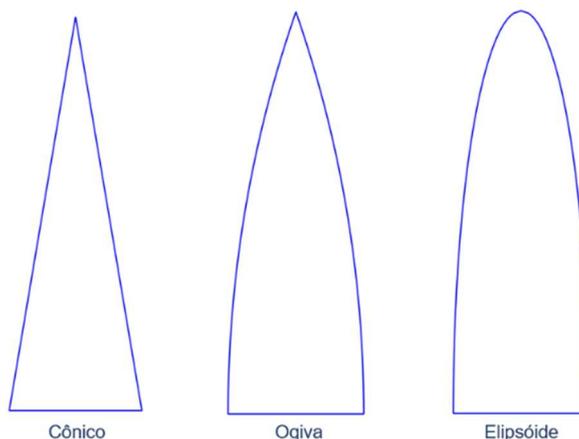
Estabilidade

A estabilidade de um foguete é crucial para manter sua trajetória desejada, mesmo sob perturbações (Niskanen, 2013). A margem de estabilidade de um foguete é tradicionalmente expressa como a distância entre CP e o CG, medidas em unidades de calibre, onde um calibre representa a largura adimensional do corpo do foguete. O CG é recomendado estar entre 1-2 calibres à frente do CP para foguetes modelo. O vento lateral pode causar instabilidade ao induzir ângulos de ataque elevados (Galejs, 2009).

2.3 Possíveis Geometrias para o Nariz

A escolha do formato do nariz é crucial no design de foguetes (Shah, 2022). As três principais geometrias são: cônica, ogiva e elipsóide.

Figura 1 – Geometrias para o nariz.



Fonte: Elaborado pela autora.

Formato Cônico

O nariz cônico é definido por seu comprimento (L) e raio de base (R):

$$r(x) = \frac{x}{L} R \quad (4)$$

Formato Ogival

O nariz ogival tem um perfil de arco circular. O raio de curvatura (ρ_t) é:

$$\rho_t = \frac{R^2 + L^2}{2R} \quad (5)$$

Formato Elipsoide

O nariz elíptico tem a forma de um elipsoide, modelado por:

$$r(x) = R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2} \quad (6)$$

2.4 Software OpenRocket

O OpenRocket é um software desenvolvido para ajudar na construção e simulação de foguetes, melhorando a segurança e eficiência no foguetemodelismo (Niskanen, 2013). Seus objetivos são:

1. Desenvolver métodos simples e precisos para calcular propriedades aerodinâmicas;
2. Testar esses métodos comparando com estimativas e dados experimentais;
3. Implementar um software de código aberto, multiplataforma, fácil de usar e personalizável;

O OpenRocket é valorizado por sua confiabilidade, transparência e boa documentação.

3 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, optou-se por uma abordagem qualitativa, embasada na natureza exploratória do tema e focada na compreensão das experiências individuais (Gil, 2022). Os métodos qualitativos, revisão de literatura e estudo de caso foram selecionados para permitir uma análise profunda e identificar nuances essenciais. A revisão de literatura foi conduzida com uma abordagem crítica, analisando teorias, estudos e pesquisas relevantes ao tema.

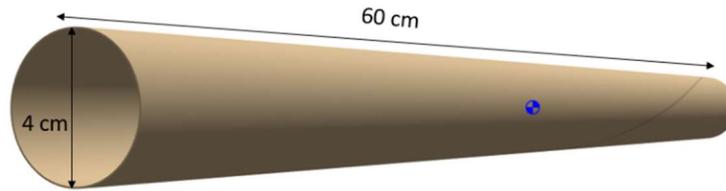
3.1 Definição da Geometria do Foguete

Para validar a melhor opção de nariz para um minifoguete, definiu-se inicialmente a geometria do foguete, baseado no modelo comercial TKOR 2000 (SonicDad, 2023).

Seção Transversal

O corpo do minifoguete possui 60 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, feito de papel cartão, conforme Figura 2.

Figura 2 – Corpo do foguete.

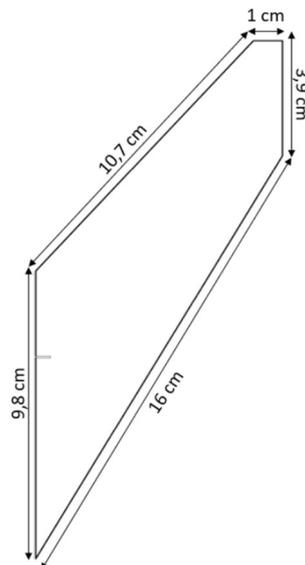


Fonte: Elaborado pela autora.

Aletas

As aletas, baseadas em Alves (2020), são quatro e seguem o modelo mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo da aleta.



Fonte: Elaborado pela autora

Motor

O motor utilizado é similar ao modelo de PVC E45 (Jason, 2005), com propelente composto por Krista-K (12-00-45) e açúcar, na proporção de 65% de nitrato de potássio e 35% de açúcar.

3.2 Confeção dos Narizes

Os narizes dos foguetes, feitos de poliestireno, têm 12,3 cm de altura e 5 cm de base. As geometrias variam entre cônica, elipsoide e ogival.

3.3 Utilização do Software OpenRocket

Para analisar a influência da aerodinâmica e estabilidade dos narizes, foi utilizado o software OpenRocket. A metodologia envolveu:

1. Instalação do OpenRocket: Baixar e instalar a versão mais recente do software;
2. Desenvolvimento do Projeto: Criar um projeto no OpenRocket, configurando as propriedades gerais do foguete, como descrição e unidades de medida;
3. Modelagem do Foguete: Utilizar as ferramentas do software para modelar o foguete, ajustando dimensões e formas do nariz e adicionando componentes como tubo do corpo, aletas e motor;

4. Configuração da Simulação: Ajustar condições iniciais como altitude, velocidade do vento e motor. Realizar uma simulação preliminar para identificar comportamentos indesejados e analisar coeficientes de arrasto, estabilidade e momentos aerodinâmicos;
5. Iteração e Refinamento: Testar outras geometrias de nariz e iterar as simulações para refinar os resultados e concluir a melhor geometria de nariz.

Configuração da Simulação

O método de cálculo utilizado foi o Barrowman Estendido e a simulação foi conduzida pelo método 6-DOF Runge-Kutta 4. Dados específicos da cidade de São Mateus - ES foram usados com base no Incaper, 2023, como: velocidade média do vento de 2,38 m/s, direção do vento a 45°, latitude -18,7°, longitude -39,9°, altitude de 17 m, pressão média de 1015 mbar e temperatura média de 27°C.

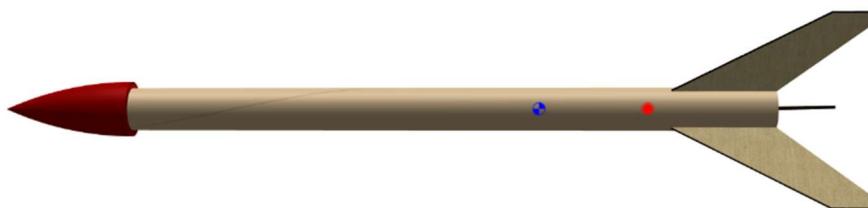
4 RESULTADOS

Este estudo resultou de uma análise detalhada, onde a validação de dados, a busca por informações relevantes e a assimilação de conceitos teóricos desempenharam papéis cruciais.

4.1 Modelo Final do Minifoguete

Durante as simulações no software OpenRocket, observou-se que o modelo comercial com quatro aletas excedia a faixa de estabilidade recomendada de 1-2 calibres. Para melhorar a estabilidade, reduziu-se o número de aletas para três. Outra alteração foi aumentar o diâmetro da base do nariz de 5 cm para 5,5 cm, ajustando a diferença de diâmetro entre o corpo do foguete e o nariz, o que também contribuiu para a estabilidade adequada. O modelo final do minifoguete foi obtido, conforme ilustrado na Figura 4, variando apenas o formato do nariz. O CG é o símbolo azul e o CP o vermelho.

Figura 4 – Modelo final do foguete.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Comparação entre as Geometrias dos Narizes

A troca das geometrias dos narizes manteve constante o corpo, motor e aletas do foguete, permitindo comparar diferentes resultados dos parâmetros observados. As simulações no software calcularam as posições do Centro de Gravidade (CG) e Centro de pressão (CP), além do máximo alcance vertical (apogeu) e a estabilidade em calibres, e os resultados estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados dos parâmetros analisados.

Geometria	Localização CG	Localização CP	Apogeu	Estabilidade
Cônico	51,1 cm	60,9 cm	563 m	1,83 cal
Elipsoide	50,4 cm	60,2 cm	564 m	1,85 cal
Ogiva	50,7 cm	60,5 cm	569 m	1,84 cal

Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se, por meio dos resultados evidenciados na tabela, que a geometria de nariz que obteve o maior apogeu foi a Ogival, alcançando, também, um bom valor de calibre de estabilidade. Dessa forma, fica evidente que a melhor geometria proveniente deste estudo foi a Ogiva, sendo a mais indicada para melhor desempenho e estabilidade em lançamentos de minifoguetes similares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo empregou uma abordagem qualitativa exploratória para investigar as influências das diferentes geometrias de nariz na estabilidade e desempenho de minifoguetes. Utilizando o modelo comercial TKOR 2000 como referência, o corpo do foguete foi projetado com 60 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, enquanto as aletas e o motor foram selecionados de acordo com especificações previamente estabelecidas. Três geometrias de nariz (cônica, elipsoide e ogival) foram confeccionadas em poliestireno, e as simulações foram realizadas no software OpenRocket, seguindo uma metodologia estruturada de instalação, desenvolvimento de projeto, modelagem, configuração de simulação e iterações para refinamento dos resultados.

Durante as simulações, observou-se que o modelo inicial, com quatro aletas, excedia a faixa de estabilidade recomendada. A redução para três aletas e o ajuste do diâmetro da base do nariz para 5,5 cm permitiram alcançar uma estabilidade adequada. Ao trocar as geometrias dos narizes, mantendo constantes o corpo, motor e aletas, foi possível comparar diferentes parâmetros. Os resultados indicaram que a geometria ogival obteve o maior apogeu e um bom valor de calibre de estabilidade, destacando-se como a melhor opção para desempenho e estabilidade em lançamentos de minifoguetes similares.

Esta pesquisa oferece esclarecimentos para o campo da modelagem e simulação de foguetes para foguete modelismo, fornecendo uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas. Ao demonstrar a importância da escolha adequada da geometria do nariz na otimização do desempenho aerodinâmico e estabilidade dos minifoguetes, este estudo contribui para o avanço do conhecimento nesse campo e pode servir como referência para projetos futuros na área.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo apoio concedido na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVES, André Luíz. **Minifoguete a propelente sólido**: aspectos teóricos e propostas experimentais para o ensino de física. [S.l.]: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 42, 2020.
- ANDERSON, Jonh Jr. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 6. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill Education, 2017.
- GALEJS, Robert. **Wind instability - What Barrowman left out**. 2009. <https://argoshpr.ch/joomla1/articles/pdf/sentinel39-galejs.pdf>.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- GIORDAN, Marcelo. **O papel da experimentação no ensino de ciências**. Química nova na escola. [S.l.]: v. 10, n. 10, p. 43-49, 1999.
- INCAPER- Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Coordenação de Meteorologia**. Espírito Santo. Disponível em: <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/>. Acesso em 13 abr.2024.
- JASON, Smiley. **Easy pvc rockets**. Createspace Independent Publishing Platform, v. 1, p. 69, 2005.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MIRANDA, Maíra Fernanda Oliveira de. **Desenvolvimento de um sistema de recuperação para um minifoguete**. v. 1, p. 59, 2021.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Foguetes**: Manual do professor com atividades de ciência, matemática e tecnologia. Washington, D.C., 1996. 23 p.
- NISKANEN, Sampo. **OpenRocket technical documentation**: For openrocket version 13.05. [S.l.], 2013. 127 p.
- OPENROCKET. OpenRocket – Build Better Rockets. 2023.
- RODRIGUES, Vitor de Sousa. **Foguetemodélismo**: análise do movimento de um minifoguete utilizando um sensor de altitude. v. 1, p. 87, 2022.
- RONNINGEN, J.-E. **Rocket Aerodynamics and Stability**. 2. ed. Local: Norwegian Rocket Technology, 2008.
- SHAH, Vaibhav Kumar. **Determination of the optimum nose cone geometrical shape for supersonic missile**. Materials Today Proceedings, Science Direct, v. 64, p. 749–754, 2022.

SONICDAD. **TKOR 2000 Randomizer Rocket:** Project 70. Disponível em: <https://www.sonicdad.com/projectdetails/randomizer-rocket/>. Acesso em: 26 de nov. de 2023: [s.n.], 2023.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NOSE GEOMETRIES ON THE AERODYNAMICS AND STABILITY OF MINIROCKETS

The study of rockets encompasses a wide range of applications, from space exploration to national defense, with a history dating back to the artifacts conceived by Archytas in 400 B.C. to contemporary innovations led by Elon Musk. Within academia, events like the Brazilian Rocket Exhibition (Mobfog) bring together students around the challenge of launching their own models, underscoring the importance of aerodynamics and stability principles. Additionally, the growing interest in rocket modeling, evidenced by events like the Curitiba Mini Rockets Festival, underscores its relevance both as a recreational activity and for scientific purposes.

Optimizing rocket nose design is essential to minimize aerodynamic drag and maximize performance, addressing the varied demands of different space missions. This study aims to investigate and identify the best geometry for the nose of a vertically launched mini rocket, aiming for maximum ascent, drag mitigation, and stability during launch. Utilizing the OpenRocket software, specific objectives include designing the mini-rocket according to Mobfog specifications, analyzing the three main proposed geometries - conical, ogival, and ellipsoidal - and selecting the best format based on stability and aerodynamics verified in simulations. The justification for this study lies in the applicability of mini-rocket aerodynamics and stability concepts across various engineering fields and industries, playing a crucial role in space missions, communications, scientific research, national security, and technological innovation.

The research is based on qualitative methods, literature review, and case studies for in-depth analysis and identification of essential nuances. Rocket geometry follows the commercial TKOR 2000 model, with a 60 cm length and 4 cm diameter for the body, four fins, and a motor composed of Krista-K fertilizer and granulated sugar. For the rocket noses, varying between conical, ellipsoidal, and ogival, polystyrene with specific dimensions is used. The implementation of the methodology for analyzing the influence of nose aerodynamics and stability is carried out through the OpenRocket software, with detailed configuration of rocket properties and simulations to identify the best nose geometry. Calculations consider specific geographical and climatic data, ensuring precise analysis of launch conditions.

This study reflects meticulous analysis, emphasizing the importance of data validation, relevant information search, and assimilation of robust theoretical concepts throughout the investigative process. Upon simulating the final mini-rocket model, adjustments to fins and nose diameter were observed to ensure ideal stability. After modifications, the final model was obtained, with variation only in nose shape. When comparing different nose geometries while keeping the same body, motor, and fins, parameters such as center of gravity (CG) location, center of pressure (CP), apogee, and stability were analyzed. Results indicated that the ogival nose geometry achieved the highest apogee and good stability, making it the most suitable for optimal performance and stability in launches of similar mini rockets.

Keywords: Rockets. Optimization. Nose. Simulation. Stability.

