

# Modelagem de um Motor Foguete Utilizando o Método das Linhas Características

Gabriel A. B. Clemonini<sup>1</sup>, Gabriel K. Munhoz<sup>2</sup>, Leandra I. Abreu<sup>3</sup>  
UNESP, São João da Boa Vista, SP

O presente projeto tem como objetivo modelar um motor foguete por meio de uma implementação numérica do método das linhas características. Essa técnica matemática é empregada na solução de equações diferenciais que descrevem o comportamento de um fluido supersônico, permitindo determinar a distribuição de suas principais propriedades ao longo de uma malha. Ao aplicar esse método e definir parâmetros essenciais do motor, como a velocidade desejada na saída, é possível projetar a geometria ideal para evitar a formação de ondas de choque e garantir a máxima eficiência do motor [1].

De modo geral, um motor de foguete é dividido em duas partes principais: a câmara de combustão e a tubeira, também chamada de bocal. A tubeira é um componente essencial, pois controla e acelera o fluxo dos gases gerados na câmara de combustão, permitindo atingir velocidades supersônicas. Seu design tem um impacto direto na eficiência do sistema de propulsão, garantindo a conversão máxima da energia térmica em energia cinética. Para isso, sua geometria deve ser cuidadosamente projetada, levando em conta fatores como ângulo de expansão, suavidade das paredes e adaptação da pressão de saída à pressão ambiente. Um projeto bem otimizado minimiza perdas energéticas, evita ondas de choque e maximiza o empuxo, resultando em um motor de foguete mais eficiente e com melhor desempenho [3].

Uma maneira de projetar essa geometria é utilizando o método das linhas características, dado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{\text{char}} = \frac{-uv/a^2 \pm \sqrt{[(u^2 + v^2)/a^2] - 1}}{[1 - (u/a)^2]}. \quad (1)$$

Esse método permite determinar a distribuição de velocidade, pressão e outras propriedades do fluido ao longo de uma malha de linhas características, que representam direções preferenciais de propagação de perturbações no escoamento, como representado na figura a seguir:

---

<sup>1</sup>gabriel.clemonini@unesp.br

<sup>2</sup>gk.munhoz@unesp.br

<sup>3</sup>leandra.abreu@unesp.br

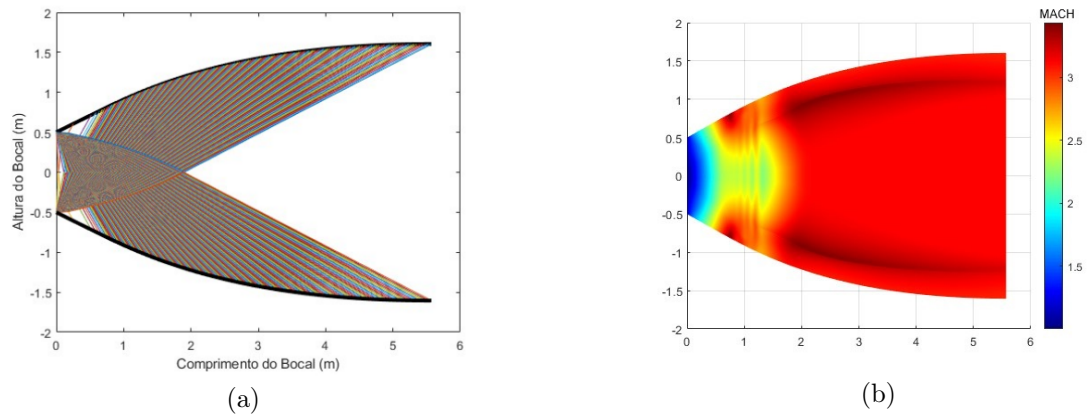


Figura 1: (a) Resultado do formato do bocal com 200 linhas características. (b) Distribuição do número de Mach ao longo do escoamento. Fonte: Autor.

Este método foi implementado em MATLAB e, com base nos resultados obtidos a partir do modelo teórico, podemos afirmar que o método das características se mostrou altamente eficaz no projeto de bocais. Os resultados demonstram uma distribuição de velocidades condizente com a esperada para um bocal de comprimento mínimo, conforme descrito na literatura [2], validando assim a precisão e a aplicabilidade da abordagem utilizada.

## Referências

- [1] J. D. Anderson Jr. **Modern Compressible Flow: With Historical Perspective**. 3<sup>a</sup> ed. New York: McGraw-Hill Education, 2002. ISBN: 978-0072424430.
- [2] G. Asha, D. N. Mohana, K. S. Priyanka e D. Govardhan. "Design of Minimum Length Nozzle Using Method of Characteristics". Em: **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)** 10.5 (2021), pp. 490–495. DOI: 10.17577/IJERTV10IS050268.
- [3] G. P. Sutton e O. Biblarz. **Rocket Propulsion Elements**. 9<sup>a</sup> ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016. ISBN: 978-1118753651.