

SIMULAÇÃO DE ESCOAMENTO EM TUBEIRAS: CRIAÇÃO DE FERRAMENTA OPEN SOURCE PARA ANÁLISE DE FLUXO

André Felipe Marin Galeano Nobre Cruz, Heidi Korzenowski.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, andrefncruz@gmail.com, heidi@univap.br.

Resumo

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um código computacional destinado a simular o comportamento de saída de uma tubeira de foguete, a partir de dados de entrada iniciais fornecidos pelo usuário. O código foi criado utilizando o software Python e suas diversas bibliotecas como o NumPy, Matplotlib, SciPy, para realizar os cálculos necessários e gerar gráficos que ilustram os resultados das simulações. A metodologia adotada incluiu a modelagem dos parâmetros físico-matemáticos da tubeira e a implementação de algoritmos capazes de prever o desempenho do escoamento. As simulações permitem analisar a diferença entre escoamentos com a formação de ondas de choque, isentrópicos e leques de expansão possibilitando uma análise comparativa detalhada entre esses diferentes regimes de fluxo. Os resultados demonstram a eficácia do código em simular as principais variáveis de interesse, fornecendo uma ferramenta útil para análise preliminar de projetos de propulsão.

Palavras-chave: Isentrópico. Ondas-de-choque. Parâmetros.

Área do Conhecimento: Engenharia Aeroespacial.

Introdução

A análise do comportamento de tubeiras de foguetes é essencial no projeto de sistemas de propulsão, permitindo prever o desempenho do escoamento e otimizar o empuxo gerado. Tubeiras são componentes críticos para direcionar e acelerar os gases resultantes da combustão, convertendo a energia térmica em energia cinética de maneira eficiente. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional em Python para simular o comportamento do escoamento na saída de uma tubeira de foguete.

Diversas abordagens vêm sendo utilizadas para modelar a dinâmica dos gases em tubeiras, incluindo métodos analíticos e numéricos. No entanto, algumas dessas abordagens apresentam limitações em termos de flexibilidade e capacidade de visualização dos resultados. A proposta deste trabalho visa superar algumas dessas limitações, oferecendo uma solução que utiliza bibliotecas conhecidas, para modelar e representar graficamente o comportamento do escoamento, de maneira acessível e visualmente compreensível.

A ferramenta desenvolvida se destaca pela sua capacidade de simular diferentes regimes de escoamento, como o fluxo isentrópico, fluxos que resultam na formação de ondas de choque e leques de expansão, assim como cálculo do empuxo gerado e fluxo mássico na tubeira. Essas funcionalidades permitem ao usuário compreender os efeitos de diferentes condições de operação da tubeira e realizar comparações entre cenários de fluxo contínuo, rápida expansão e situações na qual ocorre desaceleração abrupta, levando à formação de ondas de choque.

Os resultados são apresentados na forma de gráficos que mostram as variações de grandezas como velocidade, pressão e temperatura ao longo da tubeira, possibilitando uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos. O desenvolvimento do código é destacado como a criação de uma ferramenta poderosa para a análise de escoamentos em sistemas de propulsão, sendo capaz de auxiliar tanto engenheiros quanto estudantes na compreensão dos fenômenos relacionados ao comportamento de tubeiras de foguete.

Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento do código de simulação da saída de uma tubeira de foguete foi baseada em princípios da dinâmica dos fluidos compressíveis, utilizando equações fundamentais que governam o comportamento do escoamento em condições tanto isentrópicas quanto em situações de formação de ondas de choque. O trabalho se estruturou nas seguintes etapas principais: modelagem matemática, implementação computacional, e análise dos resultados por meio de gráficos.

Inicialmente, foi realizada a modelagem matemática dos fenômenos envolvidos no escoamento pela tubeira. Foram utilizadas as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, aplicadas especificamente para escoamentos compressíveis em regime de equilíbrio térmico e isentrópico. A equação da razão de Mach foi utilizada para descrever a variação da velocidade ao longo da tubeira, enquanto as relações de pressão e temperatura foram derivadas a partir das propriedades termodinâmicas dos gases. Para as situações na qual ocorre a formação de ondas de choque, foram incorporadas as equações de Rankine-Hugoniot, que descrevem a conservação de massa, energia e momento em condições de descontinuidade.

A implementação foi realizada utilizando a linguagem de programação Python, com o auxílio de bibliotecas como NumPy, SciPy e Matplotlib. Numpy foi utilizado para a manipulação de arrays. A biblioteca SciPy foi empregada para a resolução de equações diferenciais e para a busca de soluções numéricas quando necessário. Matplotlib foi utilizada para gerar gráficos que representam as variáveis relevantes ao longo do perfil da tubeira, como pressão, temperatura, densidade e Mach.

Na implementação, foram desenvolvidas duas rotinas principais. A primeira é responsável pela simulação de escoamentos isentrópicos, que assumem um fluxo contínuo sem perdas irreversíveis. Nesta rotina, foram utilizadas as relações adiabáticas para calcular a variação de propriedades do escoamento em função da área da tubeira. A razão de expansão da tubeira foi mantida fixa, sendo determinada a partir de parâmetros previamente definidos que garantem a otimização do escoamento para um valor específico de Mach na saída.

A segunda rotina lida com a formação de ondas de choque normais. Para identificar a presença e calcular as propriedades pós-choque, foram implementadas condições de contorno baseadas nas equações de conservação em regimes supersônicos, permitindo determinar os pontos ao longo da tubeira onde ocorre uma desaceleração abrupta, resultando na formação da onda de choque. O algoritmo foi desenvolvido para detectar automaticamente a região de formação de choque, baseando-se nos parâmetros de entrada, e calcular as propriedades do escoamento imediatamente antes e após a descontinuidade.

Os dados de entrada, incluindo pressão e temperatura iniciais, foram fornecidos pelos usuários. A simulação foi projetada para oferecer uma flexibilidade suficiente, permitindo variar parâmetros como temperatura e pressão iniciais, a fim de analisar como estas mudanças influenciam no perfil de escoamento ao longo da tubeira. Após a execução dos cálculos, os resultados foram plotados utilizando a biblioteca Matplotlib, mostrando a variação dos principais parâmetros ao longo do eixo da tubeira, bem como destacando a localização e os efeitos de eventuais ondas de choque.

O uso destas duas rotinas permite uma análise comparativa entre diferentes regimes de fluxo na tubeira — um fluxo ideal isentrópico, leque de expansão e um fluxo com formação de ondas de choque. Tal comparação é importante para entender como variações nas condições iniciais impactam a eficiência e o comportamento do escoamento na tubeira, auxiliando no desenvolvimento de sistemas de propulsão mais eficientes.

Esta metodologia, ao integrar as etapas de modelagem, implementação e visualização dos resultados, permite não apenas uma simulação precisa, mas também uma forma prática e didática de observar fenômenos físicos complexos que ocorrem em tuberias de foguete.

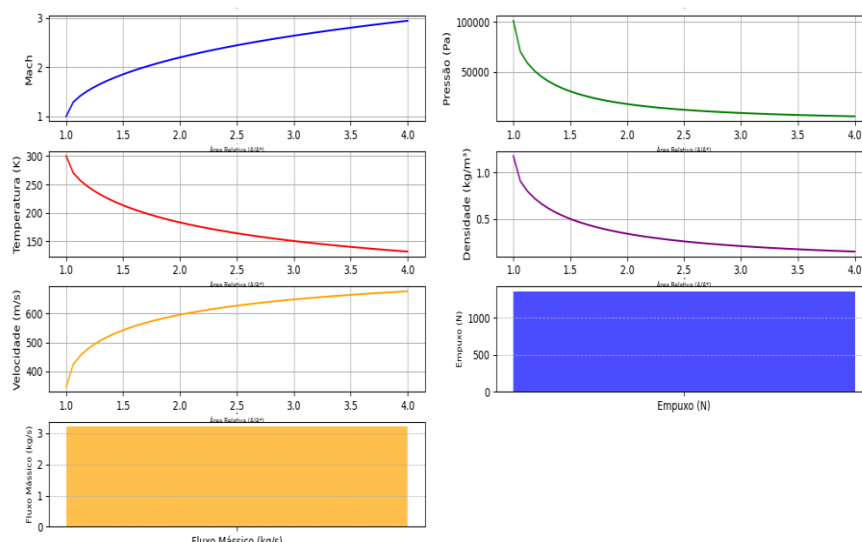
Resultados

Nesta seção, apresentamos os resultados das simulações dos escoamentos na tubeira, comparando os casos de um fluxo isentrópico ideal, um fluxo com formação de ondas de choque e um fluxo com leques de expansão. Os escoamentos foram modelados e representados graficamente, e as principais variáveis analisadas incluem o número de Mach, pressão, temperatura, densidade e velocidade ao longo da seção divergente da tubeira, para entender melhor os efeitos de cada um desses fluxos, foi adicionado o cálculo do empuxo e do fluxo mássico na tubeira.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Escoamento Isentrópico:

Figura 1 – Gráficos do escoamento isentrópico.
 Resumo dos Parâmetros do Escoamento e Resultados da Tubeira



Fonte: O autor.

O primeiro conjunto de gráficos apresenta os parâmetros do escoamento para um fluxo isentrópico, em que não há descontinuidades no fluxo. O comportamento das variáveis ao longo da tubeira segue as previsões teóricas da expansão supersônica:

Número de Mach: Observa-se que o número de Mach aumenta gradualmente ao longo da seção divergente da tubeira, indicando uma transição para um regime de escoamento supersônico. Essa aceleração ocorre de forma contínua e suave, como esperado em um escoamento isentrópico.

Pressão e Temperatura: Tanto a pressão quanto a temperatura diminuem continuamente ao longo do eixo da tubeira. Isso é resultado da expansão do gás ao passar pela seção divergente, com uma conversão eficiente de energia térmica em energia cinética.

Densidade: A densidade também diminui com o aumento da área relativa, o que está de acordo com a expansão do gás e a redução da pressão.

Velocidade: A velocidade do escoamento aumenta ao longo da seção divergente. Esse aumento está em conformidade com o aumento do número de Mach e a conversão de energia interna em energia cinética.

Empuxo: O empuxo gerado pela tubeira reflete a eficiência da expansão isentrópica. Com a conversão eficiente de energia térmica em energia cinética, o empuxo é maximizado, indicando um desempenho ideal da tubeira. Não há perdas significativas associadas à dissipação de energia ou ondas de choque.

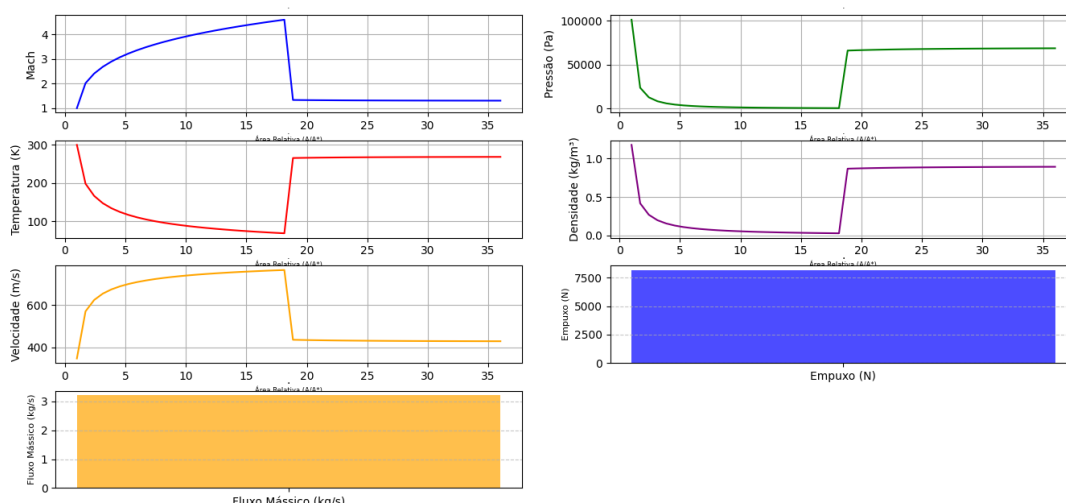
Em resumo, o comportamento dos parâmetros no escoamento isentrópico demonstra uma expansão eficiente, caracterizada por um aumento contínuo da velocidade e do número de Mach, acompanhado de uma redução de pressão, temperatura e densidade.

Escoamento com Ondas de Choque:

Figura 2 – Gráficos do escoamento com formação de ondas de choque.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Resumo dos Parâmetros do Escoamento e Resultados da Tubeira



Fonte: O autor.

O segundo conjunto de gráficos apresenta os parâmetros do escoamento em uma tubeira com formação de ondas de choque, caracterizando um escoamento não-isentrópico. A presença de uma onda de choque normal provoca descontinuidades abruptas nas variáveis do escoamento, afetando o comportamento delas ao longo da tubeira:

Número de Mach: Antes da onda de choque, o número de Mach aumenta gradualmente ao longo da seção divergente, indicando a expansão supersônica do escoamento. Após a onda de choque, observa-se uma redução abrupta, resultando na transição para um regime transônico. Essa transição é uma característica marcante de ondas de choque normais.

Pressão e Temperatura: Ambas as variáveis apresentam um comportamento similar. Antes da onda de choque, tanto a pressão quanto a temperatura diminuem continuamente devido à expansão do gás. No entanto, durante a onda de choque, há um aumento súbito e significativo em ambas, seguido de uma estabilização no regime transônico. Esse comportamento reflete a compressão e dissipação de energia cinética em energia térmica.

Densidade: A densidade diminui gradualmente antes da onda de choque devido à expansão do gás. Na onda de choque, há uma compressão abrupta que resulta em um aumento significativo da densidade. Após o choque, a densidade se estabiliza.

Velocidade: Antes da onda de choque, a velocidade do escoamento aumenta continuamente à medida que a energia térmica é convertida em energia cinética. Durante a onda de choque, ocorre uma redução súbita na velocidade, resultando na desaceleração do fluxo. Esse comportamento é típico de escoamentos afetados por ondas de choque normais.

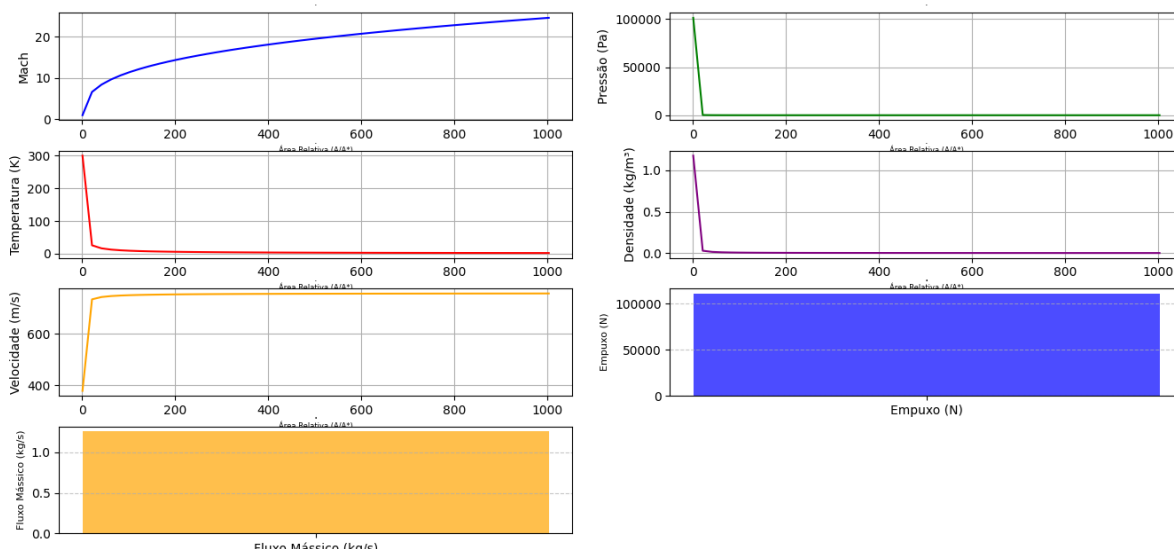
Empuxo: O empuxo é gerado pela conversão eficiente de energia térmica em energia cinética na seção divergente. Contudo, a presença de ondas de choque reduz a eficiência do escoamento, limitando o empuxo máximo que poderia ser obtido em condições ideais.

Escoamento com Leque de Expansão:

Figura 3 – Gráficos do escoamento com formação de leque de expansão.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Resumo dos Parâmetros do Escoamento e Resultados da Tubeira



Fonte: O autor.

O terceiro conjunto de gráficos apresenta os parâmetros do escoamento em uma tubeira com a formação de um leque de expansão, característica de escoamentos supersônicos em regiões onde ocorre uma mudança abrupta na geometria ou uma adaptação à pressão externa. O comportamento das variáveis reflete o aumento da eficiência do escoamento supersônico devido à presença de ondas de expansão de Prandtl-Meyer.

Número de Mach: Observa-se um aumento significativo no número de Mach ao longo da seção divergente. A aceleração ocorre continuamente até alcançar valores muito elevados, típicos de escoamentos sujeitos a leques de expansão. Esse comportamento evidencia a conversão eficiente de energia térmica em energia cinética.

Pressão e Temperatura: Ambas as variáveis apresentam uma redução contínua e suave ao longo da seção divergente. A pressão diminui devido à expansão do fluido, enquanto a temperatura acompanha essa redução em função da queda na pressão e do aumento do número de Mach. Esse comportamento é característico de escoamentos supersônicos isentrópicos com expansão controlada.

Densidade: A densidade do escoamento também diminui continuamente, refletindo a redução de pressão e temperatura ao longo da expansão. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento do número de Mach e à adaptação do escoamento ao ambiente.

Velocidade: A velocidade aumenta substancialmente ao longo da seção divergente da tubeira. A presença do leque de expansão intensifica essa aceleração, resultando em um escoamento supersônico altamente eficiente. Esse comportamento está alinhado com a conversão de energia interna em energia cinética.

Empuxo: O empuxo gerado pela tubeira é maximizado pela presença do leque de expansão, que melhora a eficiência do escoamento ao adaptar a pressão de saída à pressão ambiente. Essa otimização reduz perdas associadas a ondas de choque ou adaptações não ideais, resultando em um empuxo extremamente elevado.

Conclusão

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um código computacional em Python, capaz de simular o escoamento através de uma tubeira de foguete em diferentes regimes, abrangendo desde o fluxo isentrópico até situações de formação de ondas de choque e leques de expansão. As simulações permitiram comparar esses três regimes de escoamento, fornecendo uma visão aprofundada dos impactos que cada tipo de escoamento exerce sobre as variáveis termodinâmicas e de fluxo ao longo da tubeira.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

No escoamento isentrópico, a análise evidenciou uma conversão eficiente de energia interna em energia cinética, resultando em um aumento contínuo do número de Mach e da velocidade, com reduções simultâneas de pressão, temperatura e densidade ao longo da seção divergente. Essa configuração ideal maximiza a eficiência do empuxo gerado pela tubeira, demonstrando a importância de otimizar o perfil e as condições operacionais para garantir um fluxo contínuo e sem perdas irreversíveis.

Por outro lado, a simulação de escoamento com ondas de choque indicou uma transição abrupta no perfil do escoamento, levando a um aumento súbito na pressão, temperatura e densidade, bem como uma desaceleração significativa do escoamento. Este comportamento é típico de ondas de choque normais e ilustra as perdas irreversíveis de energia que ocorrem quando o escoamento é forçado a desacelerar de supersônico para subsônico. Tais perdas comprometem a eficiência da tubeira e reduzem o empuxo gerado, enfatizando a importância de evitar condições que favoreçam a formação de ondas de choque em sistemas de propulsão.

Já no caso do escoamento com leques de expansão, a análise revelou um aumento expressivo na eficiência do fluxo supersônico, com aceleração contínua do número de Mach, acompanhada de reduções suaves e controladas na pressão, temperatura e densidade. Os leques de expansão permitem que o escoamento se adapte gradualmente às condições externas, minimizando perdas e maximizando a eficiência do empuxo. Este cenário demonstra a importância de projetar uma tubeira que permita a formação de leques de expansão, garantindo uma adaptação ideal à pressão ambiente e otimizando o desempenho do sistema. O código desenvolvido foi bem-sucedido em prever o comportamento do escoamento em todos os regimes, destacando-se como uma ferramenta preliminar robusta para a análise de sistemas de propulsão a foguete. A capacidade de simular e visualizar diferentes condições de operação e identificar fenômenos como a formação de ondas de choque torna este código uma poderosa ferramenta de análise para engenheiros e estudantes que buscam entender os complexos fenômenos envolvidos no escoamento compressível através de tubeiras.

Este código será disponibilizado como open source, permitindo que estudantes e profissionais possam contribuir com modificações e melhorias, além de utilizá-lo como uma base educacional para suas próprias simulações e estudos. Adicionalmente, está sendo trabalhado para que a aplicação seja um site dedicado ou seja convertida em um executável, visando facilitar o acesso e a utilização da ferramenta, tornando-a mais acessível e prática para um público mais amplo.

Futuramente, o código pode ser aprimorado para incluir a simulação de tubeiras com geometrias variáveis e condições de contorno mais complexas, como efeitos de dissipação e transferência de calor. Além disso, a possibilidade de modelar escoamentos tridimensionais e acoplá-los com outras variáveis de sistemas de propulsão tornaria a ferramenta ainda mais versátil e aplicável em contextos de projeto e otimização de motores de foguete.

Referências

HALL, N. **Isentropic Flow**. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/isentrop.html>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ANDERSON, J. D. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica**: Introdução ao voo. 7. Ed. Porto Alegre, 2015.

SWEIGART, AL. **Automatize Tarefas Maçantes com Python: Programação Prática para Verdadeiros Iniciantes**. 1. ed. São Paulo, 2015.

Modern Physics: <https://modern-physics.org/expansao-de-prandtl-meyer-angulos-ondas-de-choque-e-velocidade>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CHAPRA, C. Steven. **Numerical Methods for Engineers**. 6 ed. McGraw-Hill. New York, 2010.

Acesso ao código: <https://github.com/AerodynamicDeko/GasDynamics/blob/main/Simulador1DFinal>

Dados Sugeridos (usados nos exemplos):

<https://github.com/AerodynamicDeko/GasDynamics/blob/main/DadosParaExemplo.txt>

Agradecimentos

*A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO***

Agradeço primeiramente, a Deus, por me sustentar e demonstrar Seu tremendo amor para comigo, concedendo sabedoria e força ao longo desta jornada acadêmica.

À minha orientadora e professora Heidi, que sempre se mostrou atenta e disponível para me orientar em cada detalhe do trabalho, sendo uma professora comprometida durante o processo e grande incentivadora do projeto.