

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Pedro Kuntz Puglia**

**ORBITAL MANEUVER OPTIMIZATION**

Trabalho de Graduação  
2025

**Curso de Engenharia Aeroespacial**

**Pedro Kuntz Puglia**

# **ORBITAL MANEUVER OPTIMIZATION**

Orientador

Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos (ITA)

Coorientador

Prof. Emilien Flayac (ISAE-SUPAERO)

**ENGENHERIA AEROESPACIAL**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2025

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Puglia, Pedro Kuntz  
Orbital Maneuver Optimization / Pedro Kuntz Puglia.  
São José dos Campos, 2025.  
18f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientador: Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos. Coorientador: Prof. Emilien Flayac.

1. Optimization. 2. Control. 3. Orbital Mechanics. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

PUGLIA, Pedro Kuntz. **Orbital Maneuver Optimization**. 2025. 18f. Iniciação Científica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Pedro Kuntz Puglia

TÍTULO DO TRABALHO: Orbital Maneuver Optimization.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta iniciação científica e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta iniciação científica pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

Pedro Kuntz Puglia  
Rua H8C, Ap. 303  
12.228- 462 – São José dos Campos- SP

# ORBITAL MANEUVER OPTIMIZATION

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Iniciação científica

---

Pedro Kuntz Puglia

Autor

---

Willer Gomes dos Santos (ITA)

Orientador

---

Emilien Flayac (ISAE-SUPAERO)

Coorientador

---

Profa. Dra. Cristiane Martins  
Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, ?? de junho de 2025.

A todos que algum dia contribuíram ou  
contribuirão à ciência brasileira

# Agradecimentos

Agradeço ao professor Leonardo Gouvêa por, certo dia falando sobre qualquer coisa, levantar a possibilidade deste trabalho, e por auxiliar no que é necessário auxílio e dar liberdade no que é necessário liberdade.

Agradeço também ao João Vitor Baldo e Arthur Zoppi, que acompanharam todas as minhas impressões 3D no Laboratório Aberto do CCM-ITA, sempre dando dicas e sugestões que iam além do esperado deles. Obrigado por transformar impressões problemáticas e fracassadas em momentos de descontração e aprendizado sobre mundo real.

Agradeço por fim a toda a equipe do Laboratório Feng, que foi recrutada por acaso no meio do caminho para minha iniciação científica. Agradeço ao Prof. Dr. Tiago Barbosa, que permitiu o uso do laboratório, e ao professor André Fernando de Castro, que certo dia por acaso resolveu (quase) todos os problemas experimentais do meu trabalho comigo. Agradeço especialmente aos técnicos Newton, que me auxiliou com toda a montagem mecânica do experimento, e Wilson, que me acompanhou pelas várias horas de montagem e calibração.

Por fim agradeço à minha família, que sempre me incentivou, e aos meus amigos de ITA e H8, que inúmeras vezes me ouviram falar detalhadamente sobre os problemas deste trabalho.

*"Pointy end up, flamey end down."*  
— TIM DODD, EVERYDAY ASTRONAUT

# Resumo

Este trabalho apresenta o processo de desenvolvimento e caracterização de um sistema de vetorização de empuxo com motor a gás frio. O motor tem como requisito empuxo de 2 N e 5 bar de pressão de câmara. O método de vetorização escolhido para teste foi o de *jet vane*. O motor construído apresentou divergências pequenas com os requisitos, tendo um impulso específico de 46,6 s. Este motor foi montado em um mecanismo de controle da lâmina defletora e esta montagem foi acoplada a uma balança de três componentes para caracterização das forças e momentos gerados. Como resultado final, obtiveram-se as derivadas de controle de força lateral e momento. Por fim, apresentaram-se os problemas metodológicos encontrados e *trade-offs* de engenharia identificados para o sistema.



# Abstract

This work presents the development and characterization process of a cold gas thruster vectorization system. The motor is required to have a thrust of 2 N and a chamber pressure of 5 bar. The chosen vectorization method for testing was the jet vane. The constructed motor had slight deviations from the requirements, with a specific impulse of 46.6 s. This motor was mounted on a control mechanism of the deflecting blade, and this assembly was coupled to a three-component scale for force and moment characterization. As a final result, the control derivatives for lateral force and moment were obtained. Finally, the methodological issues encountered and engineering trade-offs identified for the system were presented.

# Lista de Figuras

## **Lista de Tabelas**

# Lista de Símbolos

$F$	Empuxo propulsivo
$\dot{m}$	Vazão mássica
$v_e$	Velocidade de exaustão média
$p_c$	Pressão de câmara
$p_e$	Pressão de saída média
$p_{amb}$	Pressão ambiente
$A_c$	Área da seção transversal da câmara
$A_e$	Área da seção transversal da saída da tubeira
$A_t$	Área da seção transversal da garganta
$\varepsilon$	Razão de expansão
$I_{sp}$	Impulso específico
$C_F$	Coefficiente de empuxo
$C^*$	Velocidade característica
$F_x$	Força horizontal, transversal ao motor foguete
$F_y$	Força vertical, na direção do empuxo propulsivo
$M$	Torque resultante
$\delta$	Deflexão da lâmina ( <i>jet vane</i> )
$F_{x\delta}$	Derivada da força lateral em relação à deflexão da lâmina
$M_\delta$	Derivada de momento em relação à deflexão da lâmina

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Contexto histórico e motivação	13
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>16</b>
	REFERÊNCIAS	17
	APÊNDICE A – HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO MOTOR FOGUETE	18

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto histórico e motivação

## **2 METODOLOGIA**

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**



## **4 CONCLUSÃO**

## Referências

## **Apêndice A - Histórico de desenvolvimento do motor foguete**

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 25 de março de 2015	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/DM-018/2015	4. Nº DE PÁGINAS 18
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Orbital Maneuver Optimization			
6. AUTOR(ES): <b>Pedro Kuntz Puglia</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Cupim; Cimento; Estruturas			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Propulsão; Gás Frio; Vetorização de empuxo;			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional ( ) Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Área de Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica. Orientador: Prof. Dr. Adalberto Santos Dupont. Coorientadora: Prof <sup>a</sup> . Dr <sup>a</sup> . Doralice Serra. Defesa em 05/03/2015. Publicada em 25/03/2015.			
11. RESUMO: Este trabalho apresenta o processo de desenvolvimento e caracterização de um sistema de vetorização de empuxo com motor a gás frio. O motor tem como requisito empuxo de 2 N e 5 bar de pressão de câmara. O método de vetorização escolhido para teste foi o de <i>jet vane</i> . O motor construído apresentou divergências pequenas com os requisitos, tendo um impulso específico de 46,6 s. Este motor foi montado em um mecanismo de controle da lâmina defletora e esta montagem foi acoplada a uma balança de três componentes para caracterização das forças e momentos gerados. Como resultado final, obtiveram-se as derivadas de controle de força lateral e momento. Por fim, apresentaram-se os problemas metodológicos encontrados e <i>trade-offs</i> de engenharia identificados para o sistema.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO ( ) RESERVADO ( ) SECRETO			