

**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. Trabalho de Graduação – 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 deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação 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 Trabalho de Graduação

---

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.

dedicar...

# Agradecimentos

*“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<br>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<br>TC  | 2. DATA<br>25 de março de 2015 | 3. DOCUMENTO Nº<br>DCTA/ITA/DM-018/2015 | 4. Nº DE PÁGINAS<br>18 |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br>Orbital Maneuver Optimization  |                                |   |                        |
| 6. AUTOR(ES):<br><b>Pedro Kuntz Puglia</b>   |                                |   |                        |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  |                                |   |                        |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br>Cupim; Cimento; Estruturas  |                                |   |                        |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br>Propulsão; Gás Frio; Vetorização de empuxo;   |                                |   |                        |
| 10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional ( ) Internacional<br>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:<br>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:<br>(X) OSTENSIVO ( ) RESERVADO ( ) SECRETO   |                                |   |                        |