

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Pedro Kuntz Puglia

**CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE PROPULSÃO A
GÁS FRIO COM EMPUXO VETORIAL**

Iniciação científica
2022

Curso de Engenharia Aeroespacial

Pedro Kuntz Puglia

**CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE PROPULSÃO A
GÁS FRIO COM EMPUXO VETORIAL**

Orientador

Prof. Dr. Leonardo Gouvêa (ITA)

ENGENHERIA AEROESPACIAL

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

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

Puglia, Pedro Kuntz
Caracterização de sistema de propulsão a gás frio com empuxo vetorial / Pedro Kuntz Puglia.
São José dos Campos, 2022.
18f.

Iniciação científica – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
2022. Orientador: Prof. Dr. Leonardo Gouvêa.

1. Propulsão. 2. Empuxo Vetorial. 3. Gás Frio. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PUGLIA, Pedro Kuntz. **Caracterização de sistema de propulsão a gás frio com empuxo vetorial**. 2022. 18f. Iniciação Científica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Pedro Kuntz Puglia

TÍTULO DO TRABALHO: Caracterização de sistema de propulsão a gás frio com empuxo vetorial.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2022

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

CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMA DE PROPULSÃO A GÁS FRIO COM EMPUXO VETORIAL

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Iniciação científica

Pedro Kuntz Puglia

Autor

Leonardo Gouvêa (ITA)

Orientador

Profa. Dra. Cristiane Martins

Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 23 de novembro de 2022.

Aos amigos da Graduação e Pós-Graduação do ITA por motivarem tanto a criação deste template pelo Fábio Fagundes Silveira quanto por motivarem a mim e outras pessoas a atualizarem e aprimorarem este excelente trabalho.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Dr. Donald E. Knuth, por ter desenvolvido o T_EX.

Ao Dr. Leslie Lamport, por ter criado o L^AT_EX, facilitando muito a utilização do T_EX, e assim, eu não ter que usar o Word.

Ao Prof. Dr. Meu Orientador, pela orientação e confiança depositada na realização deste trabalho.

Ao Dr. Nelson D'Ávila, por emprestar seu nome a essa importante via de trânsito na cidade de São José dos Campos.

Ah, já estava esquecendo... agradeço também, mais uma vez ao T_EX, por ele não possuir vírus de macro :-)

*"If I have seen farther than others,
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

Resumo

Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).

Abstract

Well, the book is on the table. This work presents a control methodology for the position of the passive joints of an underactuated manipulator in a suboptimal way. The term underactuated refers to the fact that not all the joints or degrees of freedom of the system are equipped with actuators, which occurs in practice due to failures or as design result. The passive joints of manipulators like this are indirectly controlled by the motion of the active joints using the dynamic coupling characteristics. The utilization of actuation redundancy of the active joints allows the minimization of some criteria, like energy consumption, for example. Although the kinematic structure of an underactuated manipulator is identical to that of a similar fully actuated one, in general their dynamic characteristics are different due to the presence of passive joints. Thus, we present the dynamic modelling of an underactuated manipulator and the concept of coupling index. This index is used in the sequence of the optimal control of the manipulator.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Exemplos de sistemas com empuxo vetorial.	15
--	----

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Requisitos propulsivos e geométricos para o motor.	17
---	----

Lista de Abreviaturas e Siglas

CTq	computed torque
DC	direct current
EAR	Equação Algébrica de Riccati
GDL	graus de liberdade
ISR	interrupção de serviço e rotina
LMI	linear matrices inequalities
MIMO	multiple input multiple output
PD	proporcional derivativo
PID	proporcional integrativo derivativo
PTP	point to point
UARMII	Underactuated Robot Manipulator II
VSC	variable structure control

Lista de Símbolos

a	Distância
\mathbf{a}	Vetor de distâncias
\mathbf{e}_j	Vetor unitário de dimensão n e com o j -ésimo componente igual a 1
\mathbf{K}	Matriz de rigidez
m_1	Massa do cumpim
δ_{k-k_f}	Delta de Kronecker no instante k_f

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto histórico e motivação	14
1.2	Objetivos	14
2	METODOLOGIA	16
2.1	Projeto do motor	16
	REFERÊNCIAS	18

1 Introdução

1.1 Contexto histórico e motivação

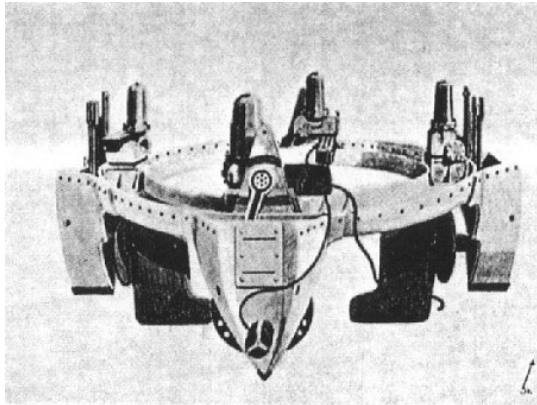
A tecnologia de empuxo vetorial (ou TVC, do inglês *thrust vector control*) é chave para o setor aeroespacial, pois permite aproveitar o empuxo gerado pelo motor-foguete para aplicar um comando de atitude ao veículo. É uma tecnologia desenvolvida desde os primórdios da tecnologia de foguetes, com o míssil V2 sendo um marco notável no histórico do empuxo vetorial e dos foguetes. Este sistema, exibido na figura 1.1a, utilizava lâminas de grafite (*jet vanes*) inseridas na exaustão do motor principal para direcionar o escoamento de gases e produzir uma força lateral capaz de direcionar o míssil.

Outros sistemas de empuxo vetorial foram desenvolvidos após a Segunda Guerra Mundial, tanto para aplicações militares como para lançadores de satélites, cada uma com seus *trade-offs* de engenharia. Uma alternativa de alto desempenho e alta complexidade mecânica muito comum atualmente é a articulação esférica, ou *gimbal*, da tubeira do motor. Um sistema *gimbal*, do motor RS-25 desenvolvido para o ônibus espacial e reaproveitado para o programa Artemis, é exibido em ação na figura 1.1b.

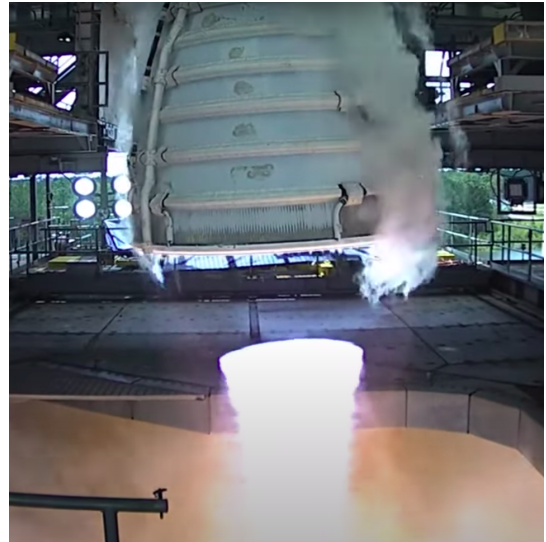
Os sistemas de empuxo vetorial são fundamentais para a estabilidade e para o seguimento de trajetória dos foguetes. Defeitos de manufatura podem introduzir desalinhamentos angulares e lineares de empuxo, que devem ser compensados pelo sistema de controle de empuxo vetorial. Também são fundamentais para o controle dos veículos em baixas velocidades, regime no qual aletas fornecem pouca ou nenhuma autoridade sobre o veículo, permitindo que se elimine a necessidade de trilhos de lançamento. Naturalmente, também funcionam no vácuo espacial. Este trabalho busca, portanto, iniciar uma linha de pesquisa brasileira sobre o assunto.

1.2 Objetivos

Este trabalho buscou desenvolver motor foguete a gás frio de pequena escala (2–5N), um sistema de empuxo vetorial baseado em *jet vane* para direcionamento do empuxo



(a) Sistema de *jet vanes* do míssil V2 (V2ROCKET, 2023).



(b) Sistema de *gimbal* do motor RS-25 do foguete Artemis (VIDEOFROMSPACE, 2023).

FIGURA 1.1 – Exemplos de sistemas com empuxo vetorial.

em um plano, e a caracterização empírica das forças geradas pelo sistema, bem como as dificuldades identificadas para o desenvolvimento futuro do tema.

2 Metodologia

O trabalho foi conduzido em três etapas: o projeto e manufatura do motor, o projeto do sistema de deflexão de fluxo, e a caracterização experimental do sistema. A seguir, descrever-se-ão cada uma destas etapas.

2.1 Projeto do motor

O projeto do motor foi feito de maneira programática e iterativa, assegurando fácil reprodução dos resultados obtidos e automação do fluxo de dados. Nesta seção, serão apresentados os dados referentes à última versão do motor. Para um histórico do desenvolvimento do motor, consultar o apêndice AAAAAAAAAAAAAA.

A tabela 2.1 mostra os requisitos propulsivos, codificados PRP-N, e geométricos, codificados GMT-N, levantados para o motor. Os requisitos PRP-1 e PRP-2 foram propostos com base nos sistemas de fornecimento de ar disponíveis e na escala desejada do motor. Já a temperatura do propelente, requisito PRP-2, é baseada na temperatura ambiente, e permite a utilização de *jet vanes* feitas de materiais simples. Com base nestes requisitos, um sistema monopropelente a ar foi proposto. Os requisitos GMT-1 e GMT-2 foram especificados com base na necessidade de haver estagnação na câmara de empuxo (SUTTON, INTRO TEÓRICA) e na necessidade de fácil manipulação, manufatura e conexão. Já os requisitos GMT-3 e GMT-4 buscam propiciar um escoamento com alto paralelismo na região da tubeira.

A partir destes requisitos, o software CEA NASA foi utilizado para calcular os parâmetros propulsivos (ε , C^* e C_f) do sistema com pressão ambiente $P_{amb} = 100kPa$. Com estes coeficientes, pode-se aplicar as relações INSERIR REFERENCIAS descritas na introdução para calcular as áreas de saída A_e , de garganta A_t . A área de câmara, A_C , foi calculada diretamente a partir do requisito GMT-1.

Os três coeficientes propulsivos calculados também foram utilizados para estimar o fluxo mássico de propelente \dot{m} , e este, para estimar a velocidade do propelente na mangueira de alimentação, v_{prop} . Estes parâmetros são relevantes para a verificação da perda

Código	Variável	Grandeza	Valor
PRP-1	P_C	Pressão de câmara	$500kPa$
PRP-2	T	Empuxo	$2N$
PRP-3	T_{prop}	Temperatura do propelente	$298,15K$
GMT-1	$r_{C,min}$	Raio de câmara mínimo	$15mm$
GMT-2	L_C	Comprimento de câmara	$30mm$
GMT-3	α_{conv}	Semi-ângulo do convergente	30°
GMT-4	α_{div}	Semi-ângulo do divergente	5°

TABELA 2.1 – Requisitos propulsivos e geométricos para o motor.

de carga no sistema de alimentação, bem como para a escolha da fonte de ar. Como o propelente é pouco energético, altas vazões são necessárias mesmo para empuxos pequenos, de modo que conhecer a capacidade exigida da fonte foi fundamental. A partir de \dot{m} , cujo cálculo foi descrito anteriormente, e assumindo que a um diâmetro de tubo d , massa molar do ar MM_{ar} e constante dos gases R :

$$v_{prop} = \frac{\dot{m}RT_{prop}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 P_C MM_{ar}} \quad (2.1)$$

Referências

V2ROCKET. **A-4/V-2 Makeup - Tech Data & Markings**. 2023.

<http://www.v2rocket.com/start/makeup/design.html>. Acessado em 20/06/2023.

VIDEOFROMSPACE. **Watch an Artemis moon rocket engine gimbal in hot fire test**.

2023. <https://www.youtube.com/watch?v=eJTfzffUeLM>. Acessado em 20/06/2023.

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: Caracterização de sistema de propulsão a gás frio com empuxo vetorial			
6. AUTOR(ES): Pedro Kuntz Puglia			
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: Cupim; Dilema; Construção			
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 ^a . Dr ^a . Doralice Serra. Defesa em 05/03/2015. Publicada em 25/03/2015.			
11. RESUMO: <p>Aqui começa o resumo do referido trabalho. Não tenho a menor idéia do que colocar aqui. Sendo assim, vou inventar. Lá vai: Este trabalho apresenta uma metodologia de controle de posição das juntas passivas de um manipulador subatuado de uma maneira subótima. O termo subatuado se refere ao fato de que nem todas as juntas ou graus de liberdade do sistema são equipados com atuadores, o que ocorre na prática devido a falhas ou como resultado de projeto. As juntas passivas de manipuladores desse tipo são indiretamente controladas pelo movimento das juntas ativas usando as características de acoplamento da dinâmica de manipuladores. A utilização de redundância de atuação das juntas ativas permite a minimização de alguns critérios, como consumo de energia, por exemplo. Apesar da estrutura cinemática de manipuladores subatuados ser idêntica a do totalmente atuado, em geral suas características dinâmicas diferem devido a presença de juntas passivas. Assim, apresentamos a modelagem dinâmica de um manipulador subatuado e o conceito de índice de acoplamento. Este índice é utilizado na sequência de controle ótimo do manipulador. A hipótese de que o número de juntas ativas seja maior que o número de passivas ($n_a > n_p$) permite o controle ótimo das juntas passivas, uma vez que na etapa de controle destas há mais entradas (torques nos atuadores das juntas ativas), que elementos a controlar (posição das juntas passivas).</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <div style="display: flex; justify-content: space-around;">(X) OSTENSIVO() RESERVADO() SECRETO</div>			