

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Leonardo Vásques Sailer

**MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS
DE EMPREGO AÉREO EM AMBIENTE DE
SIMULAÇÃO**

Trabalho de Graduação
2024

Curso de Engenharia Aeronáutica

Leonardo Vásques Sailer

**MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS
DE EMPREGO AÉREO EM AMBIENTE DE
SIMULAÇÃO**

Orientador

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

ENGENHARIA AERONÁUTICA

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

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

Vásques Sailer, Leonardo
MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS DE EMPREGO AÉREO EM
AMBIENTE DE SIMULAÇÃO / Leonardo Vásques Sailer.
São José dos Campos, 2024.
30f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeronáutica– Instituto Tecnológico de
Aeronáutica, 2024. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira.

1. RPAS. 2. Modelagem. 3. Gêmeo Digital. 4. Simulação. I. Instituto Tecnológico de
Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VÁSQUES SAILER, Leonardo. **MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS DE EMPREGO AÉREO EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO**. 2024. 30f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leonardo Vásques Sailer
TÍTULO DO TRABALHO: MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS DE EMPREGO AÉREO EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.
TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2024

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.

Leonardo Vásques Sailer

Leonardo Vásques Sailer
Rua H8B, Ap. 229
12228-461 – São José dos Campos–SP

MODELAGEM DE GÊMEO DIGITAL DE RECURSOS DE EMPREGO AÉREO EM AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Leonardo Vásques Sailer

Leonardo Vásques Sailer

Autor

Christopher Shneider

Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Orientador

Vinicius Malatesta

Prof. Dr. Vinicius Malatesta
Coordenador do Curso de Engenharia Aeronáutica

São José dos Campos, 31 de outubro de 2024.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, dedico este trabalho, todo meu amor e gratidão.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à toda minha família, que sempre me apoiou e é o pilar principal que fez de mim quem eu sou. À minha mãe Elizabeth e a meu pai Álvaro, meus maiores exemplos, nos quais me espelho e espero um dia ser uma pessoa tão boa quanto eles são. Agradeço também a minha avó Luiza, por quem tenho um carinho incondicional.

Gostaria de agradecer também a meus colegas do apartamento H8B-229, Marcos, Bernardo e Victor, com os quais dividi tantos momentos e histórias que fizeram deste curso uma experiência mais leve e agradável. E claro, ao meu colega de quarto e de turma, Daniel, companheiro para encarar qualquer desafio e para o qual desejo todo o sucesso e felicidade.

Gostaria também de agradecer a cada um dos integrantes da turma de Engenharia Aeronáutica, pelo companheirismo, pelas risadas e apoio nos momentos de dificuldade. Em especial aos meus colegas de grupo André, Brendon e, novamente, Daniel, com os quais tive o prazer de superar junto os diversos e difíceis obstáculos ao longo do curso.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu orientador, Christopher, em nome do qual agradeço a todos os professores do ITA, em especial aos professores da divisão de Engenharia Aeronáutica, que contribuíram para meu crescimento profissional e intelectual, me oferecendo a formação de excelência pela qual o Instituto é conhecido.

A todos mencionados, obrigado.

"The only way to discover the limits of the possible is to go beyond them into the impossible."

— ARTHUR C. CLARKE

Resumo

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo de gêmeo digital para a aeronave VTOL Nauru 500c, implementando um modelo com seis graus de liberdade para a fase de asa fixa. A escolha de um modelo de terra plana, considerando o alcance limitado da aeronave, simplifica os cálculos e melhora a eficiência computacional, sem sacrificar a precisão necessária. A integração deste modelo na Arena CONCEPT.IO, utilizando o protocolo MQTT para comunicação eficiente, potencializa a capacidade de simulação e validação de conceitos operacionais, contribuindo significativamente para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na engenharia de sistemas complexos e fortalecendo a missão do laboratório Conceptio de aprimorar sistemas de defesa.

Além deste modelo, o trabalho aborda o desenvolvimento de um *software* de simulação implementado em Python, aonde o modelo desenvolvido ao longo do trabalho será testado e que também servirá de plataforma para os futuros modelos implementados na Arena CONCEPT.IO, permitindo a interação entre esses diferentes entes digitais.

Abstract

This work addresses the development of a digital twin model for the VTOL aircraft Nauru 500c, implementing a six-degrees-of-freedom model for the fixed-wing phase. The choice of a flat-earth model, considering the aircraft's limited range, simplifies calculations and improves computational efficiency without compromising the required accuracy. The integration of this model into the Arena CONCEPT.IO, using the MQTT protocol for efficient communication, enhances simulation capabilities and operational concept validation, significantly contributing to research and technological development in complex systems engineering and strengthening the Conceptio laboratory's mission to advance defense systems.

In addition to this model, the work includes the development of a simulation software implemented in Python, where the model developed throughout the study will be tested. This software will also serve as a platform for future models implemented in the Arena CONCEPT.IO, enabling interaction between these different digital entities.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Aeronave VTOL Nauru 500c.	16
FIGURA 3.1 – Modelo simplificado da aeronave Nauru 500c, implementado no OpenVSP.	22
FIGURA 3.2 – Análise de massa do Nauru 500c, realizada no OpenVSP.	23
FIGURA 3.3 – Modelo das superfícies aerodinâmicas do Nauru 500c, feito no AVL.	24
FIGURA 4.1 – Interface gráfica do aplicativo desenvolvido.	25
FIGURA 4.2 – Simulação de voo longitudinal com parâmetros iniciais próximos à condição de cruzeiro.	26
FIGURA 4.3 – Simulação de voo com comando doublet aplicado no aileron.	27

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Condições de voo do Nauru 500c.	24
TABELA 4.1 – Coeficientes aerodinâmicos do modelo do Nauru 500c implementado.	27
TABELA 4.2 – Derivadas de estabilidade do modelo do Nauru 500c, para cada configuração de voo implementada.	28

Lista de Abreviaturas e Siglas

VTOL	Vertical Take-Off and Landing
QoS	Quality of Service
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
DOF	Degrees of Freedom
ADS	aerospace, defence, security
VD	Virtual Demonstrator
EMBM	Engenharia de Missões baseada em Modelos
OpenVSP	Open Vehicle Sketch Pad
AVL	Athena Vortex Lattice
CG	Centro de Gravidade
CFD	Computational Fluid Dynamics

Lista de Símbolos

α	Ângulo de ataque da aeronave
β	Ângulo de derrapagem da aeronave
u	Velocidade no eixo x do referencial do corpo
v	Velocidade no eixo y do referencial do corpo
w	Velocidade no eixo z do referencial do corpo
p	Taxa de rolamento do corpo
q	Taxa de arfagem do corpo
r	Taxa de guinada do corpo
C_L	Coeficiente de sustentação da aeronave
C_D	Coeficiente de arrasto da aeronave
C_Y	Coeficiente de força lateral da aeronave
C_ℓ	Coeficiente de momento de rolamento da aeronave
C_m	Coeficiente de momento de arfagem da aeronave
C_n	Coeficiente de momento de guinada da aeronave

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Motivação	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivo Específico	15
1.3	Organização do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Protocolo MQTT	17
2.2	Modelagem e controle de aeronaves	18
3	METODOLOGIA	20
3.1	Estudo dos métodos	20
3.2	Implementação do software de simulação	21
3.3	Implementação do modelo do Nauru 500c	22
4	RESULTADOS	25
4.1	Software de simulação	25
4.2	Modelo do Nauru 500c	26
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 Introdução

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, a indústria aeronáutica tem testemunhado avanços significativos com o surgimento de novas tecnologias que visam otimizar a operação de aeronaves. Entre estas inovações, destaca-se o conceito de Gêmeo Digital, uma réplica virtual precisa de um objeto físico, que possibilita a simulação, análise e controle em tempo real de sistemas complexos. Este conceito tem ganhado relevância particular na engenharia de aeronaves do tipo VTOL, devido à sua capacidade de operar em espaços restritos e sua versatilidade em diversos cenários de missão.

O laboratório Conceptio, cuja missão é conduzir esforços na pesquisa em concepção de sistemas complexos usando Engenharia de Sistemas, Modelagem e Simulação, Tecnologias de Jogos e Interfaces Naturais para melhoria da concepção dos sistemas que serão utilizados pelas pessoas que defenderão nosso país, está na vanguarda dessas iniciativas.

O Conceptio conduz vários projetos de pesquisa que abordam aspectos cruciais da engenharia de sistemas complexos. Entre eles, o ADS-SIMUA foca na integração segura de diferentes tipos de aeronaves em espaço aéreo não segregado, desenvolvendo tecnologias de detecção e evasão de colisões. O ADS-VD busca criar uma infraestrutura para conexão de projetos e gestão de demonstrações, facilitando a integração de sistemas e validação de novos conceitos operacionais. O EMBM explora o uso de Modelagem e Simulação para missões de sistemas complexos, desenvolvendo metodologias e infraestrutura para melhorar ferramentas de apoio e treinamento.

Um componente central desses esforços é a Arena CONCEPT.IO, uma arena multiusuário e multidomínio que integra seis diferentes domínios (terrestre, naval, aéreo, espacial, social e cibernético). Esta arena permite a inserção e controle de artefatos virtuais e reais, promovendo uma inovação aberta. Na CONCEPT.IO, é possível conectar sistemas em diferentes fases do ciclo de vida e simular táticas, técnicas e procedimentos tanto para ecossistemas militares quanto civis. Os usuários podem configurar cenas de simulação de forma fixa ou através de variações, analisar métricas e propor novos arranjos.

A arena permite a realização de eventos específicos adaptados a contextos operacionais, além de manter um mapa padrão atualizado em tempo real com dados reais. Computacionalmente, a arena funciona como um centralizador de simulação distribuída, onde cada elemento é um nó que pode estar distribuído em diferentes máquinas.

1.2 Motivação

A crescente complexidade e as exigências operacionais das aeronaves modernas impõem desafios significativos para garantir segurança, eficiência e eficácia nas missões. A motivação deste trabalho nasce da necessidade de suprir a Arena CONCEPT.IO com o seu primeiro modelo fiel de uma aeronave VTOL. A criação de um Gêmeo Digital detalhado permitirá a realização de simulações mais precisas, análises mais aprofundadas e controle em tempo real. Este modelo será fundamental para a validação de conceitos operacionais e a execução de testes em cenários simulados, mitigando riscos e otimizando a performance antes da aplicação no mundo real.

Além disso, o uso de simulações pode reduzir significativamente os custos associados às operações e ensaios de aeronaves. Ao replicar virtualmente condições reais, é possível realizar testes e ajustes necessários sem a necessidade de voos experimentais, que demandam um alto custo com combustível, além de identificar e resolver problemas potenciais antecipadamente, diminuindo o desgaste físico das aeronaves e minimizando a necessidade de manutenção. Esta abordagem não só economiza recursos financeiros, mas também acelera o desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias, garantindo que as aeronaves estejam prontas para missões críticas de forma mais rápida e econômica.

Além de aprimorar a capacidade de simulação e modelagem da arena, este projeto fortalecerá as iniciativas de pesquisa e desenvolvimento do laboratório Conceptio, promovendo a inovação e excelência na concepção de sistemas complexos.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste Trabalho de Graduação é dar apoio à missão do laboratório Conceptio, suprimindo a arena com um modelo de gêmeo digital de uma aeronave. Este modelo poderá interagir com o ambiente e demais modelos que vierem a ser implementados.

1.2.2 Objetivo Específico

O objetivo específico deste trabalho é a implementar um modelo fiel da aeronave Nauru 500c, que pode ser vista na Figura 1.1, desenvolvida pela XMobots Aeroespacial e

Defesa, que opere tanto de forma pilotável em tempo real quanto com missão planejada, assim como sua versão física. Este trabalho também tem como objetivo estabelecer a comunicação desejada entre este modelo e a Arena CONCEPT.IO, a fim de integrá-lo aos ambientes de simulação.



Fonte: <https://www.mundoconectado.com.br/drones/brasil-tem-primeiro-drone-100-conectado-a-tecnologia-5g/>.

FIGURA 1.1 – Aeronave VTOL Nauru 500c.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 contém a introdução do trabalho, onde são expostos o contexto no qual o projeto está inserido, a motivação do mesmo, além da descrição do objetivo geral e do objetivo específico do trabalho.

No capítulo 3 apresentamos a metodologia empregada para se realizar o presente trabalho, com a divisão e explicação das principais atividades realizadas.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica relevante ao estudo conduzido durante o trabalho, conforme descrito no Capítulo 3.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Protocolo MQTT

O MQTT é um protocolo de comunicação leve e eficiente, projetado para a troca de mensagens entre dispositivos em redes com largura de banda limitada e alta latência. Amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas, sendo ideal para cenários onde a economia de recursos e a confiabilidade são cruciais, como evidenciado em (HILLAR, 2018).

O MQTT opera em um modelo de publicação/assinatura, onde os clientes podem se inscrever (*subscribe*) em tópicos específicos e publicar (*publish*) mensagens nesses tópicos. Esse modelo permite uma comunicação flexível e desacoplada, onde os dispositivos não precisam conhecer diretamente uns aos outros para trocar informações. O protocolo é composto por três principais componentes, sendo eles o *broker*, servidor que recebe todas as mensagens de publicadores e as encaminha aos assinantes inscritos nos tópicos correspondentes, os *publishers*, clientes que publica mensagens a um tópico específico e os *subscriber*, cliente que recebe mensagens de um tópico específico ao se inscrever.

Na Arena CONCEPT.IO, o MQTT é empregado para garantir a comunicação eficiente entre os elementos simulados e reais. Por exemplo, um sensor embarcado em uma aeronave VTOL pode publicar dados de voo em um tópico específico, enquanto um servidor de simulação ou uma interface de usuário pode se inscrever nesse tópico para monitorar ou utilizar esses dados em tempo real. Esse mecanismo permite a integração de diversos sistemas e a coordenação de ações em um ambiente dinâmico e distribuído.

O MQTT oferece três níveis de qualidade de serviço, ou *quality of service* (QoS) para a entrega de mensagens, sendo eles:

- QoS 0 (At Most Once): As mensagens são enviadas ao máximo uma vez, sem garantias de entrega. É o nível mais rápido e com menor sobrecarga.
- QoS 1 (At Least Once): As mensagens são entregues pelo menos uma vez, com confirmação de recebimento. Pode haver duplicação de mensagens, mas há garantia de entrega.

- QoS 2 (Exactly Once): As mensagens são entregues exatamente uma vez, garantindo que não haverá duplicações nem perdas. É o nível mais confiável, mas também o mais lento e com maior sobrecarga.

Para o uso na Arena CONCEPT.IO, a escolha do QoS depende das exigências específicas de cada aplicação. No contexto de simulação, onde a latência e a eficiência são críticas, o uso de QoS 0 ou 1 é geralmente preferível. O QoS 0 pode ser adequado para mensagens de atualização frequente e que não exigem confirmação, como dados de telemetria que são atualizados constantemente. O QoS 1 é ideal para mensagens que precisam de uma garantia de entrega, mas onde a duplicação de mensagens não é problemática, como comandos de controle que podem ser repetidos sem causar erros.

Por outro lado, o QoS 2, embora garanta a entrega exata de mensagens, introduz uma sobrecarga significativa e latência, o que pode ser contraproducente em um ambiente de simulação onde a rapidez e a eficiência são prioritárias.

2.2 Modelagem e controle de aeronaves

A modelagem e o controle de aeronaves são áreas de estudo amplamente pesquisadas e desenvolvidas, essencialmente devido à sua importância para a segurança e eficiência das operações aéreas. A modelagem matemática de aeronaves é fundamental para entender suas dinâmicas e comportamento em diferentes fases do voo. Em particular, a modelagem de aeronaves VTOL apresenta desafios adicionais devido à necessidade de transição suave entre o voo vertical e horizontal. Na fase de asa fixa, a modelagem com seis graus de liberdade (6 DOF) é uma abordagem padrão, permitindo a captura completa da dinâmica translacional e rotacional da aeronave.

A escolha de um modelo com seis graus de liberdade para a fase de asa fixa baseia-se na necessidade de representar com precisão todos os movimentos possíveis da aeronave no espaço tridimensional. Esses seis graus de liberdade incluem três movimentos translacionais e três movimentos rotacionais (rolagem, arfagem e guinada). A literatura sugere que a modelagem 6 DOF é crucial para simulações realistas e precisas, especialmente quando se trata de manobras complexas e mudanças de atitude durante o voo. Trabalhos como os de (ETKIN; REID, 1996) e (JOHNSON *et al.*, 2015) destacam a importância de considerar todas as forças e momentos atuantes na aeronave para prever seu comportamento de forma confiável.

Para a fase de decolagem e pouso do VTOL, a escolha de um modelo de quadricóptero é motivada pela simplicidade e eficácia desse tipo de configuração. Os quadricópteros são amplamente estudados devido à sua estabilidade e manobrabilidade, o que os torna ideais

para operações de decolagem e pouso vertical. Estudos como os de (BOUABDALLAH *et al.*, 2004) demonstram que a modelagem de quadricópteros pode ser simplificada através da linearização de suas equações de movimento, mantendo uma alta precisão no controle. Essa abordagem permite desenvolver algoritmos de controle eficientes, que são essenciais para a estabilidade durante a transição entre voo vertical e horizontal.

A integração dos dois modelos, 6 DOF para a fase de asa fixa e quadricóptero para a decolagem/pouso – permite uma simulação abrangente das operações de uma aeronave VTOL. A fase de asa fixa beneficia-se da modelagem detalhada 6 DOF, que captura a complexidade das forças aerodinâmicas e dos momentos de inércia. Por outro lado, o modelo de quadricóptero simplifica a análise e o controle durante as fases críticas de decolagem e pouso. Essa abordagem híbrida combina diferentes modelos de acordo com as fases específicas do voo e pode melhorar significativamente a precisão e a eficácia das simulações.

As equações de movimento da aeronave serão baseadas em um modelo de gravidade constante, considerando o alcance e a autonomia reduzidos do Nauru 500c, quando comparados com os parâmetros de uma aeronave de asa fixa de grande porte. A escolha do modelo de gravidade constante simplifica significativamente os cálculos e a implementação das equações de movimento, sem comprometer a precisão necessária para as operações em distâncias curtas. Este modelo assume que a superfície da Terra é plana e ignora os efeitos da curvatura terrestre, além de considerar o vetor aceleração da gravidade sempre constante e normal ao plano tangente.

Uma das vantagens dessa abordagem é a redução na complexidade computacional. Com um modelo de terra plana, as equações de movimento são mais simples e diretas, facilitando a implementação e a solução em tempo real. Isso é especialmente importante em aplicações de simulação, onde a eficiência computacional pode impactar diretamente a capacidade de realizar simulações precisas e em tempo real, além de facilitar a integração de sensores e sistemas de navegação, que poderão obter uma resposta mais rápida da aeronave.

3 Metodologia

O presente trabalho foi trêas etapas principais, nomeadas por Estudo dos métodos, Implementação do *software* de simulação e Implementação de modelo com seis graus de liberdade com subsistemas de alerta integrados.

3.1 Estudo dos métodos

Para o desenvolvimento do trabalho, o primeiro tópicos abordado foi o estudo do protocolo MQTT. Esse protocolo de comunicação foi escolhido por sua capacidade de estabelecer uma conexão confiável e eficiente com a plataforma Arena CONCEPT.IO, a ser utilizada no projeto. Durante o estudo, foi explorado o funcionamento detalhado do MQTT, que se baseia em um modelo de comunicação *publish/subscribe*, sendo ideal para aplicações em que o tráfego de dados precisa ser leve e eficiente. Foram analisadas as melhores práticas para sua implementação, de modo a otimizar o desempenho e garantir a integridade das informações trocadas entre os sistemas, considerando aspectos como controle de qualidade de serviço (QoS), gerenciamento de tópicos e políticas de retenção de mensagens, visando uma comunicação robusta e em tempo real.

Em seguida, o trabalho incluiu um estudo sobre a modelagem de aeronaves, com o objetivo de construir modelos que representem fielmente as aeronaves a serem implementadas. Este estudo envolveu a análise das técnicas utilizadas para reproduzir modelos aerodinâmicos precisos, incorporando as características essenciais do voo em diferentes tipos de aeronave. A precisão aerodinâmica foi uma prioridade, uma vez que impacta diretamente na realismo e na eficácia dos modelos para testes em simulação e em possíveis aplicações práticas.

Por último, foi realizado um estudo sobre o controle de aeronaves, que complementa o processo de modelagem ao abordar como implementar sistemas de controle baseados nas derivadas de estabilidade das aeronaves. A aplicação dessas técnicas é fundamental para alcançar um comportamento de voo realista, com resposta precisa aos comandos e controle eficaz da estabilidade e trajetória da aeronave.

3.2 Implementação do software de simulação

A implementação do modelo de simulação foi realizada em Python, uma escolha estratégica para garantir não apenas uma boa velocidade de desenvolvimento da versão atual, mas também uma facilidade de manutenção e expansão por futuros desenvolvedores que venham a trabalhar nos projetos do laboratório Conceptio. Python é amplamente utilizado em projetos de simulação e controle de sistemas devido à sua versatilidade e à extensa biblioteca de ferramentas de análise e visualização, o que o torna ideal para o desenvolvimento de modelos complexos como o do Nauru 500c, utilizado nas simulações do laboratório.

O software foi organizado em módulos específicos, cada um com uma função dentro da arquitetura do sistema. Além dos módulos implementados, pode-se importar um módulo de atmosfera qualquer para ser utilizado na simulação como fonte de dados de temperatura, pressão e densidade do ar.

- **Módulo de Equações do Movimento:** Este módulo é responsável pela resolução do sistema de equações diferenciais que descreve o movimento da aeronave de asa fixa. Nele, as características aerodinâmicas da aeronave são integradas ao sistema para representar com precisão o comportamento em voo. Este módulo é essencial para simular a dinâmica da aeronave e inclui as forças e momentos que atuam sobre o modelo, garantindo que as respostas ao controle e às perturbações sejam realistas.
- **Módulo de Integradores Numéricos:** Para resolver as equações diferenciais do movimento, o software utiliza integradores numéricos implementados neste módulo. Os integradores foram selecionados com base na necessidade de precisão e estabilidade das soluções ao longo do tempo de simulação. A escolha do método de integração Runge-Kutta, mais especificamente o de ordem 4, permite um balanceamento eficaz entre desempenho e precisão, sendo um elemento fundamental para manter a estabilidade da simulação mesmo em condições de voo complexas.
- **Módulo de Modelos de Aeronaves:** Neste módulo, encontram-se os diferentes modelos de aeronaves que podem ser simulados, incluindo parâmetros específicos como massa, coeficientes aerodinâmicos e características de estabilidade. A arquitetura modular permite que novos modelos de aeronaves sejam facilmente adicionados e parametrizados, aumentando a flexibilidade do sistema para diferentes cenários e estudos de caso. Esse módulo assegura que a simulação possa ser adaptada a diferentes tipos de aeronaves, facilitando o uso do software para estudos de outras aeronaves que possam ser desenvolvidas no futuro.
- **Módulo Principal com Interface Gráfica:** O módulo principal inclui uma interface gráfica interativa, que permite o *input* em tempo real de dados e parâmetros de

controle. Além disso, a interface exibe o *output* das variáveis de estado da aeronave, como posição, velocidade e ângulo de ataque, bem como eventuais alertas operacionais gerados durante a simulação. Essa interface facilita o acompanhamento da simulação e permite que o operador ajuste parâmetros rapidamente, oferecendo uma visão em tempo real do comportamento da aeronave e melhorando a experiência do usuário na análise dos dados gerados pela simulação.

Essa estrutura modular permite uma abordagem clara e organizada no desenvolvimento e manutenção do software, garantindo que o modelo seja expansível e de fácil adaptação para atender a novos requisitos e cenários de simulação.

3.3 Implementação do modelo do Nauru 500c

A implementação do modelo da aeronave foi iniciada no *software* OpenVSP, onde foi realizada uma modelagem tridimensional simplificada da estrutura, mostrada na Figura 3.1. Para essa modelagem, elementos como as hastes que conectam as hélices à fuselagem e o esqui do trem de pouso foram omitidos, pois suas dimensões não eram especificadas no manual da aeronave, além de serem componentes estruturalmente finos que possuem pouca influência sobre a massa total e os momentos de inércia.

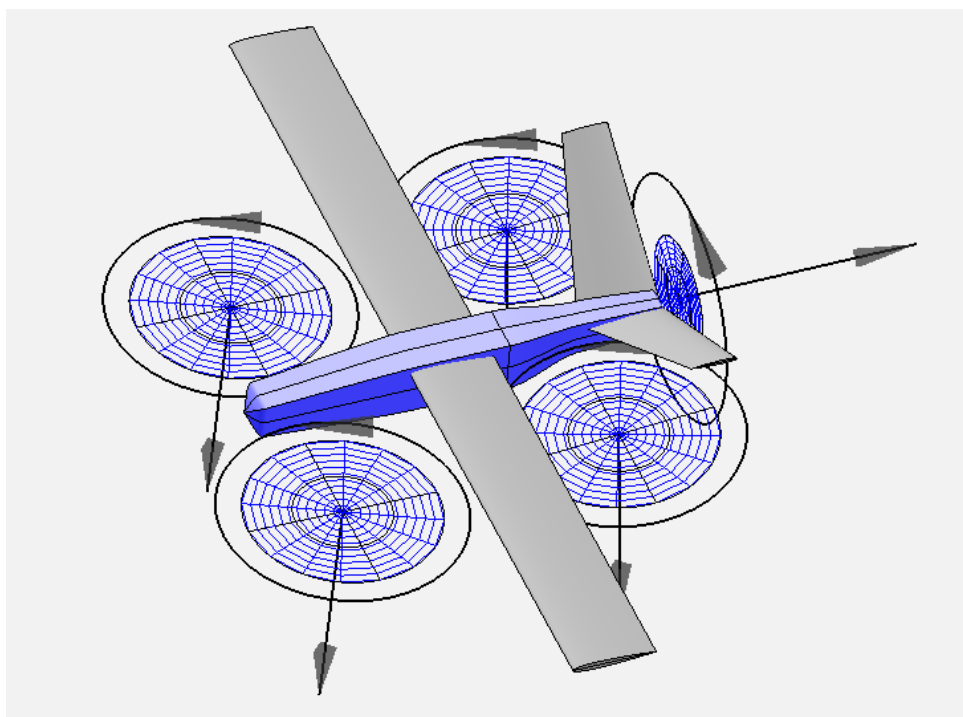


FIGURA 3.1 – Modelo simplificado da aeronave Nauru 500c, implementado no OpenVSP.

Fonte: Autor.

A simplificação se justifica pela necessidade de otimização do processo de modelagem

sem comprometer a precisão dos cálculos finais de massa e inércia. Nesse modelo, foi assumida uma densidade constante para a estrutura, permitindo a obtenção de uma massa preliminar M_0 , obtida através da análise de massa disponível no OpenVSP, que divide a aeronave em uma série de faixas ao longo do plano \mathbf{yz} , conforme mostrado na Figura 3.2, além da localização do CG e dos momentos de inércia em torno dos eixos principais da aeronave.

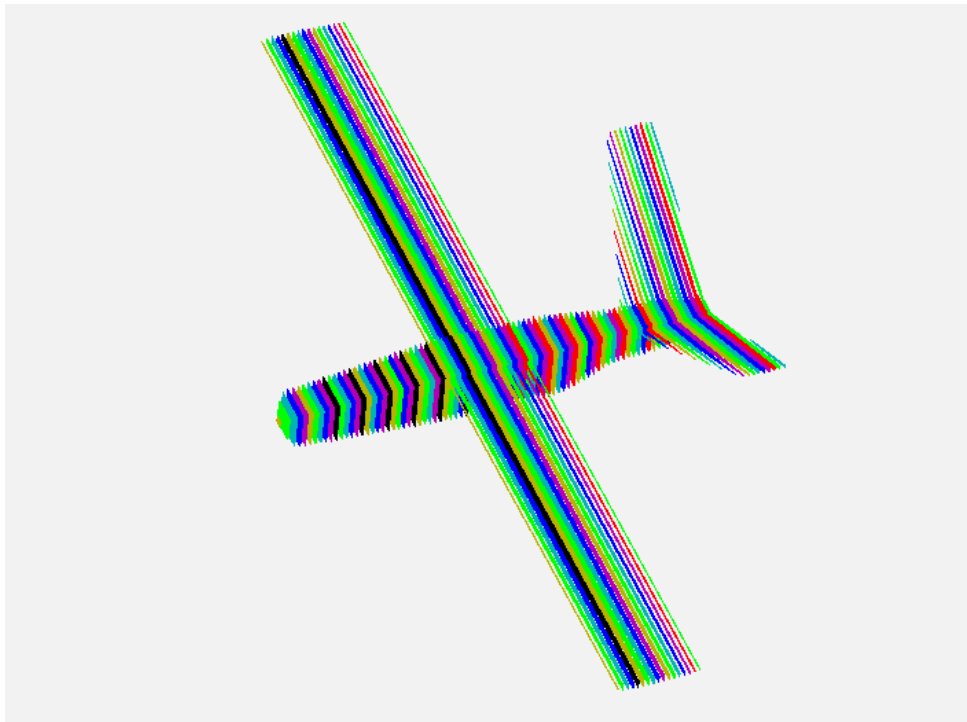


FIGURA 3.2 – Análise de massa do Nauru 500c, relaizada no OpenVSP.

Fonte: Autor.

Para ajustar a massa M_0 obtida no OpenVSP à massa real da aeronave, foi aplicado um fator de escala constante K , que ajusta proporcionalmente tanto a massa quanto os momentos de inércia. Esse fator de escala foi calculado para que o valor resultante correspondesse com a especificação de massa total da aeronave, conforme definido pelo manual. Posteriormente, os momentos de inércia foram ajustados por uma transformação de eixos, considerando a posição exata do centro de massa fornecida pelo manual, que é mostrada para cada configuração da aeronave na Tabela 3.1. Essa etapa é fundamental para garantir que os cálculos dos momentos de inércia, inicialmente baseados no modelo idealizado, reflitam com precisão as propriedades reais da aeronave ao serem referenciados no centro de gravidade correto.

Para a análise aerodinâmica, foi utilizado o *software* AVL, que é adequado para simular o comportamento aerodinâmico de aeronaves de asa fixa. Nesse modelo, foram representadas as principais superfícies aerodinâmicas, como as asas e a empenagem, além de suas superfícies de controle (ailerons e elevators). A modelagem dessas superfícies no AVL

TABELA 3.1 – Condições de voo do Nauru 500c.

Fonte: RPAS Nauru 500C SFM – System Flight Manual, XMobots (Modificado)

	Payload [kg]	CG [%CMA]	Massa total [kg]
Configuração 1	2.0	27.71	25.0
Configuração 2	1.0	30.91	25.0
Configuração 3	0.0	34.11	25.0

permitiu a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos essenciais para caracterizar a resposta da aeronave, incluindo coeficientes de sustentação, arrasto e momento. Além disso, foram calculadas as derivadas de estabilidade, que são fundamentais para a implementação dos sistemas de controle da aeronave, uma vez que descrevem como a aeronave responde a perturbações e comandos de controle. Esses dados aerodinâmicos são integrados ao modelo dinâmico, permitindo simulações realistas do comportamento em voo e respostas a condições de controle e ambiente.

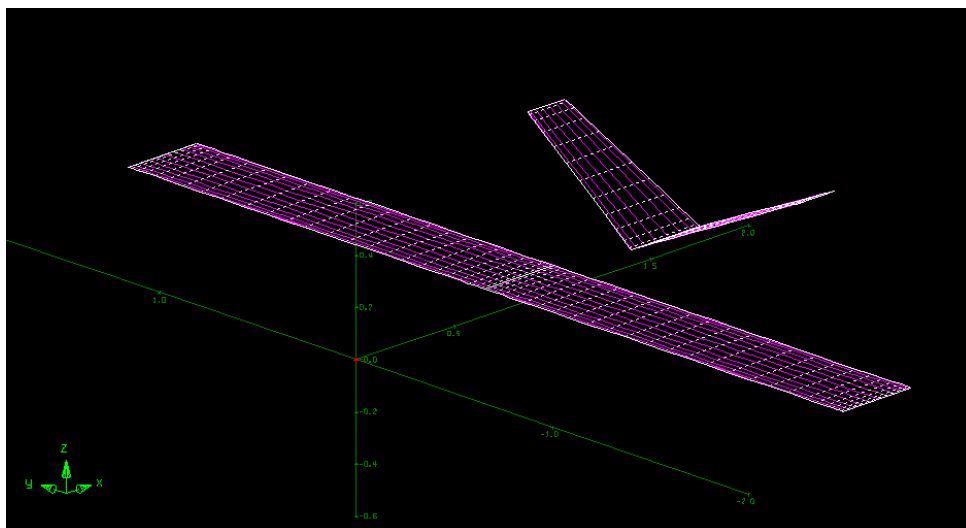


FIGURA 3.3 – Modelo das superfícies aerodinâmicas do Nauru 500c, feito no AVL.

Fonte: Autor.

O AVL leva em consideração para o cálculo do C_D apenas a parcela induzida pela sustentação, o que resulta em um coeficiente significativamente mais baixo do que o real. Por esse motivo, esse coeficiente foi determinado através de um equilíbrio de forças na condição de cruzeiro que foi determinada pelo próprio AVL, a partir da trimagem da aeronave.

4 Resultados

4.1 Software de simulação

O *software* desenvolvido foi implementado em Python, utilizando os módulos e bibliotecas detalhados na Seção 3.2. A interface gráfica é apresentada na Figura 4.1.

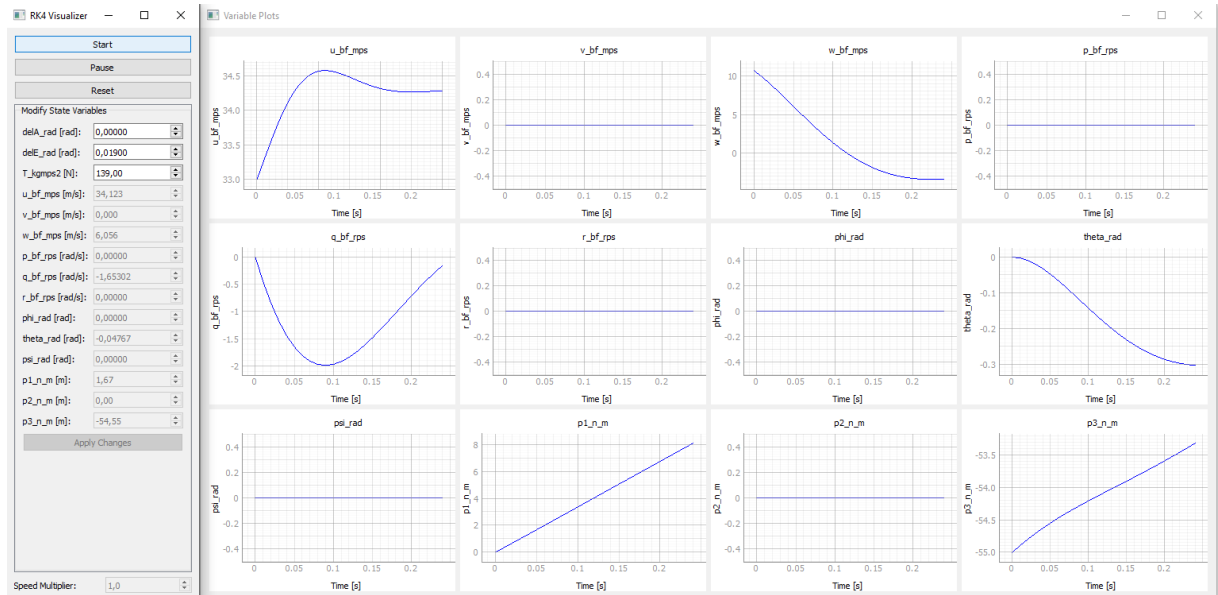


FIGURA 4.1 – Interface gráfica do aplicativo desenvolvido.

Fonte: Autor.

A interface foi projetada para oferecer uma visualização clara e interativa das variáveis envolvidas na simulação. Os campos em coloração cinza e os doze gráficos exibidos correspondem às variáveis de estado do sistema. Esses elementos são configurados de forma que não possam ser alterados diretamente durante a simulação, garantindo a consistência dos resultados. Por outro lado, os campos correspondentes às variáveis de controle foram projetados para serem interativos, permitindo ao usuário modificar seus valores a qualquer momento ao longo da execução do programa. Essa flexibilidade é essencial para avaliar o impacto das decisões de controle no comportamento dinâmico do sistema.

O software demonstrou ser funcional e eficiente nos testes realizados, proporcionando

uma interface intuitiva e ferramentas adequadas para o estudo e análise dos resultados obtidos.

4.2 Modelo do Nauru 500c

No modelo aerodinâmico implementado para o Nauru 500c, nas três configurações distintas descritas na Tabela 3.1, observou-se que o voo longitudinal apresenta estabilidade. Essa característica é evidenciada na simulação ilustrada na Figura 4.2, onde os parâmetros de voo mantêm-se consistentes ao longo do tempo, confirmando a adequação do modelo para representar movimentos longitudinais.

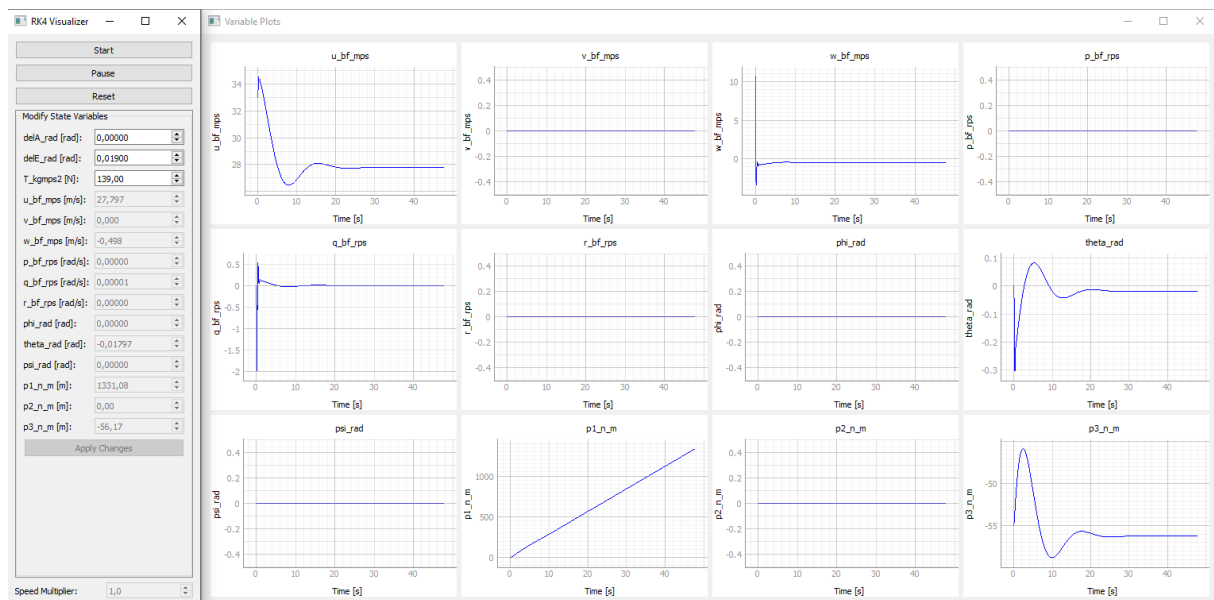


FIGURA 4.2 – Simulação de voo longitudinal com parâmetros iniciais próximos à condição de cruzeiro.

Fonte: Autor.

Para todas as simulações realizadas com este modelo, foi utilizado o pacote Python *ussa1976*. Este pacote implementa a Atmosfera Padrão dos Estados Unidos de 1976 (*U.S. Standard Atmosphere 1976*), permitindo calcular propriedades atmosféricas como temperatura, pressão e densidade em função da altitude. Esse modelo pode ser substituído por qualquer outro pacote que providencie esses mesmos parâmetros, se for desejável para alguma simulação em condições atmosféricas específicas.

Em uma simulação de voo completo, também para as três configurações descritas na Tabela 3.1, para pequenas deflexões dos ailerons ou na presença de rajadas laterais (variação de β), a aeronave demonstrou comportamento instável. Esse fenômeno é destacado na simulação apresentada na Figura 4.3, na qual foi aplicado um comando do tipo *doublet* nos ailerons, com deflexões de $\pm 0,5^\circ$ durante 1 segundo. A resposta observada é instável, com a aeronave perdendo altitude significativa após a marca dos 70 segundos de simulação

e com a taxa de rolamento aumentando ao longo do tempo. Isso indica que o modelo não captura adequadamente a dinâmica lateral-direcional da aeronave.

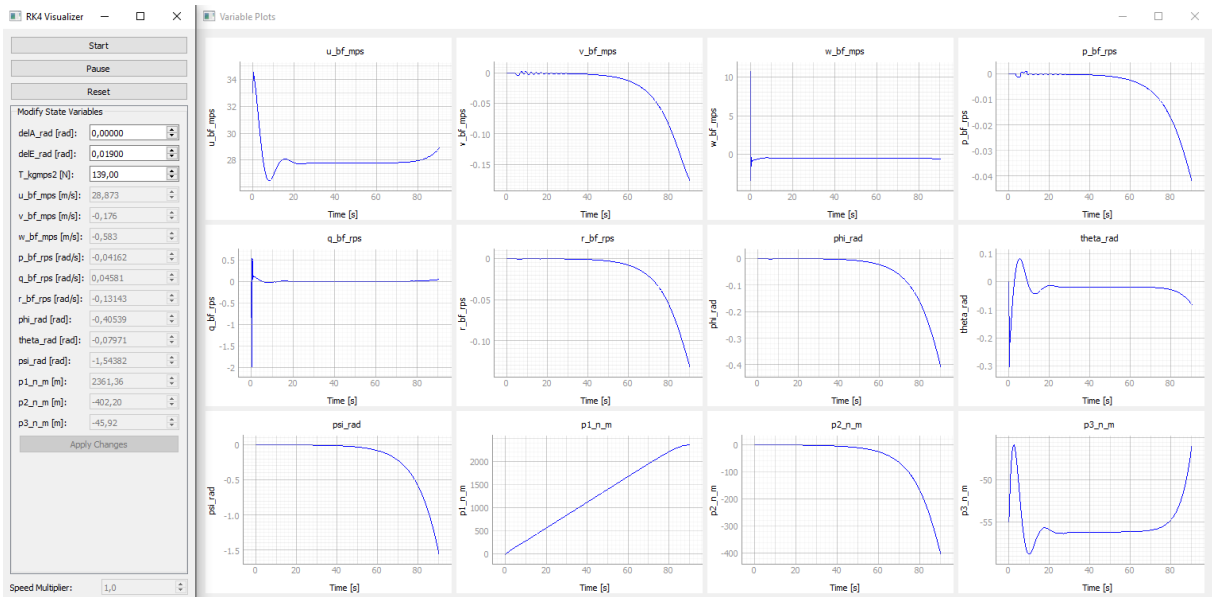


FIGURA 4.3 – Simulação de voo com comando doublet aplicado no aileron.

Fonte: Autor.

Essa instabilidade ressalta a necessidade de estimativas mais precisas dos coeficientes de arrasto e das derivadas de estabilidade. A utilização do AVL para essa tarefa mostrou-se insuficiente, sugerindo o emprego de métodos de CFD mais robustos. Considerando que a aeronave real é estável, o desvio apresentado pelo modelo indica que aprimoramentos nas metodologias de cálculo aerodinâmico são essenciais para uma representação fiel do comportamento da aeronave.

Os coeficientes aerodinâmicos nas três configurações podem ser observados na Tabela 4.1. Estes valores são idênticos nos três casos porque a aeronave foi trimada para a condição de cruzeiro, considerando uma tração de 139N aplicada pelo motor, cuja direção está alinhada com o eixo x da aeronave e, conseqüentemente, sua linha de ação contém o CG da aeronave.

TABELA 4.1 – Coeficientes aerodinâmicos do modelo do Nauru 500c implementado.

Fonte: Autor.

Coeficiente	C_L	C_D	C_Y
Valor	0.5029	0.2317	0.0

Já na Tabela 4.2 estão as derivadas de estabilidade determinadas pelo AVL em cada configuração de voo implementada. A nomenclatura utilizada é $C_{A,B}$ para denotar a variação de C_A em relação à variável B , isto é, $\frac{\partial C_A}{\partial B}$.

TABELA 4.2 – Derivadas de estabilidade do modelo do Nauru 500c, para cada configuração de voo implementada.

Fonte: Autor.

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
$C_{L,\alpha}$	5.780	5.781	5.783
$C_{Y,\alpha}$	0	0	0
$C_{\ell,\alpha}$	0	0	0
$C_{m,\alpha}$	-1.624	-1.440	-1.255
$C_{n,\alpha}$	0	0	0
$C_{L,\beta}$	0	0	0
$C_{Y,\beta}$	-0.144	-0.144	-0.144
$C_{\ell,\beta}$	-0.0604	-0.0603	-0.0601
$C_{m,\beta}$	0	0	0
$C_{n,\beta}$	0.0333	0.0327	0.0322
$C_{L,p}$	0	0	0
$C_{Y,p}$	0.0217	0.0211	0.0204
$C_{\ell,p}$	-0.595	-0.595	-0.596
$C_{m,p}$	0	0	0
$C_{n,p}$	-0.0351	-0.0346	-0.0342
$C_{L,q}$	10.100	10.622	10.247
$C_{Y,q}$	0	0	0
$C_{\ell,q}$	0	0	0
$C_{m,q}$	-13.323	-12.867	-12.435
$C_{n,q}$	0	0	0
$C_{L,r}$	0	0	0
$C_{Y,r}$	0.0631	0.0632	0.0633
$C_{\ell,r}$	0.169	0.167	0.166
$C_{m,r}$	0	0	0
$C_{n,r}$	-0.0195	-0.0192	-0.0188
$C_{L,\delta a}$	0	0	0
$C_{Y,\delta a}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$
$C_{\ell,\delta a}$	$-4.952 \cdot 10^{-3}$	$-4.953 \cdot 10^{-3}$	$-4.955 \cdot 10^{-3}$
$C_{m,\delta a}$	0	0	0
$C_{n,\delta a}$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$
$C_{L,\delta e}$	0.0124	0.0124	0.0124
$C_{Y,\delta e}$	0	0	0
$C_{\ell,\delta e}$	0	0	0
$C_{m,\delta e}$	-0.0267	-0.0263	-0.0260
$C_{n,\delta e}$	0	0	0

5 considerações Finais

O objetivo geral deste trabalho foi atingido, uma vez que o software de simulação desenvolvido fornece à Arena CONCEPT.IO a capacidade de simular o voo de aeronaves. Esse avanço é possível desde que sejam fornecidos modelos com coeficientes aerodinâmicos, modelo propulsivo e derivadas de estabilidade devidamente conhecidos. Essa funcionalidade representa um marco significativo para a evolução das capacidades da Arena, permitindo o teste e validação de cenários operacionais de aeronaves em um ambiente digital integrado, alinhando-se ao propósito de avançar no desenvolvimento de sistemas complexos e soluções inovadoras.

No entanto, as ferramentas utilizadas ao longo do trabalho não foram suficientes para alcançar o objetivo específico relacionado ao modelo da aeronave Nauru 500c. A implementação atual do modelo apresentou instabilidade látero-direcional, evidenciando a necessidade de maior precisão na determinação dos coeficientes aerodinâmicos e das derivadas de estabilidade. Para superar essas limitações, seria essencial o uso de ensaios em túnel de vento ou métodos de CFD mais robustos. A ausência de dados experimentais ou simulações de maior fidelidade comprometeu a capacidade do modelo de replicar o comportamento real da aeronave, indicando oportunidades para trabalhos futuros que visem aprimorar a acurácia e confiabilidade do modelo implementado.

Referências

BOUABDALLAH, S.; MURRIERI, P.; SIEGWART, R. Design and control of an indoor micro quadrotor. *ETH Zürich*, v. 9, n. 3, p. 1–7, 2004.

ETKIN, B.; REID, L. **Dynamics of flight: Stability and control**. [*S.l.*]: Wiley, 1996. ISBN 0471034185.

HILLAR, G. C. **Hands-On MQTT Programming with Python**. [*S.l.*]: Packt Publishing, 2018.

JOHNSON, E. N.; LEWIS, F. L.; STEVENS, B. L. **AIRCRAFT CONTROL AND SIMULATION**. [*S.l.*]: Wiley-Blackwell, 2015. ISBN 9781119174882.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	2. DATA <p style="text-align: center;">25 de novembro de 2024</p>	3. REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-107/2024</p>	4. N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">30</p>
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Modelagem de gêmeo digital de recursos de emprego aéreo em ambiente de simulação.</p>			
6. AUTOR(ES): <p>Leonardo Vásques Sailer</p>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA</p>			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>RPAS; Simulação; Gêmeo Digital.</p>			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>Veículos pilotados remotamente; Engenharia de sistemas; Simuladores espaciais; Sistemas complexos; Simulação computadorizada; Computação; Engenharia aeroespacial.</p>			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional () Internacional			
ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica. Orientador(es): Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira; Publicado em 2024.			
11. RESUMO: <p>Este trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo de gêmeo digital para a aeronave VTOL Nauru 500c, implementando um modelo com seis graus de liberdade para a fase de asa fixa. A escolha de um modelo de terra plana, considerando o alcance limitado da aeronave, simplifica os cálculos e melhora a eficiência computacional, sem sacrificar a precisão necessária. A integração deste modelo na Arena CONCEPT.IO, utilizando o protocolo MQTT para comunicação eficiente, potencializa a capacidade de simulação e validação de conceitos operacionais, contribuindo significativamente para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico na engenharia de sistemas complexos e fortalecendo a missão do laboratório Conceptio de aprimorar sistemas de defesa. Além deste modelo, o trabalho aborda o desenvolvimento de um <i>software</i> de simulação implementado em Python, aonde o modelo desenvolvido ao longo do trabalho será testado e que também servirá de plataforma para os futuros modelos implementados na Arena CONCEPT.IO, permitindo a interação entre esses diferentes entes digitais.</p>			
12. GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO</p>			