

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E COMPUTAÇÃO**

JOÃO MARCOS LEÃO PEREIRA DE ARAÚJO

**METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR EM
REALIDADE VIRTUAL DE BAIXO CUSTO PARA O TREINAMENTO DE
PILOTOS DE HELICÓPTERO DA MARINHA DO BRASIL**

**RIO DE JANEIRO
2025**

JOÃO MARCOS LEÃO PEREIRA DE ARAÚJO

METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR EM
REALIDADE VIRTUAL DE BAIXO CUSTO PARA O TREINAMENTO DE
PILOTOS DE HELICÓPTERO DA MARINHA DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Sistemas e Computação do Instituto Militar de Engenharia,
como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre
em Ciências em Sistemas e Computação.

Orientador(es): Gabriela Moutinho de Souza Dias, D.Sc.
Jauvane Cavalcante de Oliveira, Ph.D.

Rio de Janeiro

2025

©2025

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Araújo, João Marcos Leão Pereira de.

Metodologia para o desenvolvimento de um simulador em realidade virtual de baixo custo para o treinamento de pilotos de helicóptero da Marinha do Brasil / João Marcos Leão Pereira de Araújo. – Rio de Janeiro, 2025.

142 f.

Orientador(es): Gabriela Moutinho de Souza Dias e Jauvane Cavalcante de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Sistemas e Computação, 2025.

i. Moutinho de Souza Dias, Gabriela (orient.) ii. Cavalcante de Oliveira, Jauvane (orient.) iii. Título

JOÃO MARCOS LEÃO PEREIRA DE ARAÚJO

Metodologia para o desenvolvimento de um simulador em realidade virtual de baixo custo para o treinamento de pilotos de helicóptero da Marinha do Brasil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas e Computação do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Sistemas e Computação.

Orientador(es): Gabriela Moutinho de Souza Dias e Jauvane Cavalcante de Oliveira.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2025, pela seguinte banca examinadora:



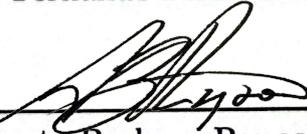
Prof. Gabriela Moutinho de Souza Dias - D.Sc. do IME - Presidente



Prof. Jauvane Cavalcante de Oliveira - Ph.D. do LNCC



Prof. Paulo Fernando Ferreira Rosa - D.Sc. do IME



Prof. Alberto Barbosa Raposo - D.Sc. da PUC

Rio de Janeiro

2025

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, meu refúgio e fortaleza;
e ao Senhor Jesus Cristo, autor e consumador da minha fé.
À minha esposa Renata e ao meu filho Felipe, que amo profundamente
e que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo amor,
apoio e incentivo ao longo desta jornada.*

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e colaboração de diversas pessoas e instituições, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Agradeço à Marinha do Brasil por investir na minha formação e conceder a oportunidade de realizar este mestrado, demonstrando seu compromisso contínuo com a capacitação de seu pessoal. Essa prática reflete diretamente na preparação e na prontidão da Força para o cumprimento de sua missão institucional de “Preparar e empregar o Poder Naval, a fim de contribuir para a Defesa da Pátria.”

Ao Instituto Militar de Engenharia (IME), minha instituição de ensino durante esta jornada acadêmica, pela excelência na formação e pelo ambiente que favorece a pesquisa e a inovação. Aos professores do IME, que compartilharam seus conhecimentos e foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Meu especial agradecimento aos meus orientadores, Maj Gabriela Dias e Prof. Jauvane, pelo inestimável apoio e orientação ao longo desta pesquisa. Seus profundos conhecimentos em suas respectivas áreas foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, proporcionando direções assertivas, desafios intelectuais e um ambiente acadêmico estimulante. Sou grato pela paciência, dedicação e pela confiança depositada em mim durante todo o processo.

Ao Centro de Instrução e Adestramento Aeronaval Almirante José Maria do Amaral Oliveira (CIAAN), por conceder o acesso ao simulador para a realização dos testes experimentais. Meu reconhecimento também ao CC-EN Rubens Pailo, cuja intermediação tornou possível essa colaboração, facilitando a integração entre a pesquisa acadêmica e o ambiente operacional da aviação naval.

Aos pilotos que participaram da pesquisa, CC Dutra, CT Junio, CT Rodrigo, CT Tordino e 1º Ten Gonçalves, que dedicaram seu tempo para testar o simulador e fornecer valiosos *feedbacks*. Um agradecimento especial aos pilotos instrutores CMG Flávio Cardoso e CF Carlos Eduardo, que auxiliaram no levantamento dos requisitos e trouxeram suas experiências operacionais para aprimorar o *SimPC*.

A Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM), pelo suporte administrativo e pelo cuidado com minha carreira durante o período do curso, garantindo que eu pudesse me dedicar integralmente à pesquisa.

Ao Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), pelo apoio prestado na disponibilização dos equipamentos necessários para a realização dos testes. Em especial, agradeço ao CMG Coreixas, ao CC Doneda, ao CT Stahlschmidt e ao SC Rodrigo pelo

incentivo ao aprimoramento da simulação na Marinha do Brasil.

Por fim, ao meu amigo Deyvison Souza, pelo incentivo constante e apoio, que foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios ao longo desta trajetória.

A todos, meu sincero muito obrigado!

*“Porque Deus tanto amou o mundo que deu o seu Filho Unigênito,
para que todo o que nele crer não pereça, mas tenha a vida eterna.”
(Bíblia Sagrada, Evangelho de João, 3:16)*

RESUMO

Pousar um helicóptero no convoo de um navio em movimento é um desafio significativo para os pilotos. O movimento do navio ao interagir com as ondas e o espaço confinado para o pouso tornam este tipo de manobra complexa e perigosa, especialmente sob condições meteorológicas e marítimas adversas, exigindo do piloto perícia no controle da aeronave. Os simuladores de voo são ferramentas fundamentais para que os pilotos treinem este tipo de manobra dentro de um ambiente seguro e controlado. No contexto desta pesquisa, foram utilizadas ferramentas gratuitas como a *Unity*, o *Blender* e o *Gimp*, para o desenvolvimento do *SimPC*, um simulador projetado para reproduzir de forma realista o pouso em convoo, permitindo que os pilotos da Marinha do Brasil desenvolvam as habilidades necessárias para realizar este tipo de manobra com segurança. Este trabalho propõe uma metodologia completa para o desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo, contendo a modelagem física da aeronave, do navio e das ondas do mar, bem como a criação de um ambiente virtual imersivo incluindo a simulação de fenômenos meteorológicos. A metodologia adotada inclui, além do desenvolvimento do *SimPC*, a utilização de seis pilotos militares experientes neste tipo de manobra para a realização de testes e exercícios no simulador para avaliar seu grau de realismo e seu potencial de contribuição para o treinamento. Os dados dos voos foram coletados e analisados estatisticamente para verificar o desempenho dos pilotos. Além disso, os pilotos responderam a um questionário de avaliação qualitativa do simulador, cujas respostas foram analisadas para compreender suas percepções sobre a eficácia e as limitações do simulador. Os resultados demonstraram que os pilotos avaliaram o *SimPC* como uma ferramenta de bom grau de realismo e altamente adequada para o treinamento de pouso em convoo. Esses resultados sugerem que um simulador de baixo custo, projetado especificamente para reproduzir uma determinada operação, pode contribuir significativamente para o treinamento de pilotos militares. Adicionalmente, a metodologia empregada neste estudo serve como referência para futuras pesquisas que busquem desenvolver soluções similares, contribuindo para a melhoria das práticas de treinamento na aviação militar, reduzindo riscos e custos operacionais.

Palavras-chave: simulador de voo; helicóptero; modelagem e simulação; pouso em convoo; treinamento de pilotos; militar.

ABSTRACT

Landing a helicopter on the deck of a moving ship is a significant challenge for pilots. The ship's movement due to wave interaction, combined with the confined landing space, makes this maneuver complex and hazardous, particularly under adverse meteorological and maritime conditions, requiring precise aircraft control. Flight simulators are essential tools for pilots to train for this maneuver in a safe and controlled environment. In the context of this research, free tools such as *Unity*, *Blender*, and *Gimp* were used for the development of *SimPC*, a simulator designed to realistically reproduce shipborne helicopter landings, allowing Brazilian Navy pilots to develop the necessary skills to perform this maneuver safely. This work presents a comprehensive methodology for the development of a low-cost flight simulator, encompassing the physical modeling of the aircraft, ship, and ocean waves, along with the creation of an immersive virtual environment that includes meteorological phenomena. The adopted methodology involved the development of *SimPC*, followed by testing and evaluation by six experienced pilots in this type of maneuver. Flight data was collected and statistically analyzed to assess pilot performance. Additionally, the pilots completed a qualitative assessment questionnaire, providing insights into the simulator's effectiveness and limitations. The results indicated that pilots rated *SimPC* as a highly suitable tool with a good level of realism for training shipboard landings. These findings suggest that a low-cost simulator specifically designed to replicate a particular operation can significantly contribute to military pilot training. Furthermore, the methodology proposed in this study serves as a reference for future research aimed at developing similar solutions, enhancing military aviation training practices, and reducing both risks and operational costs.

Keywords: flight training device, helicopter, modeling and simulation, deck landing, pilot training, military

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Relação entre realismo, custo e impacto no treinamento (1). | 19 |
| Figura 2 – Helicóptero Esquilo (UH-12) realizando operações aéreas no convoo da Fragata Niterói (F40) (2) e da Fragata Defensora (F41) (3), respectiva- mente. | 21 |
| Figura 3 – Tipos de modelos de simulação | 29 |
| Figura 4 – Simulador de Helicóptero SH-16 Seahawk no CIAAN. | 31 |
| Figura 5 – Estrutura do simulador no CIAAN. | 31 |
| Figura 6 – Modelo BET - Elemento de pá | 32 |
| Figura 7 – Modelo BET - Perfil de asa e forças atuantes (4). | 33 |
| Figura 8 – Um exemplo de envelope com os limites operativos (5). | 34 |
| Figura 9 – Interface da <i>Unity</i> | 54 |
| Figura 10 – Interface do <i>Blender</i> e Modelos 3D presentes no SimPC | 54 |
| Figura 11 – Interface do <i>Gimp</i> | 55 |
| Figura 12 – Ilustração da pressão e da tensão de cisalhamento em uma superfície aerodinâmica (6). | 57 |
| Figura 13 – Modelo 3D da carenagem da aeronave. | 57 |
| Figura 14 – Forças aplicadas sobre a carenagem da aeronave | 58 |
| Figura 15 – Principais forças que atuam sobre as pás do rotor. | 59 |
| Figura 16 – Seções de Aerofólio (6). | 60 |
| Figura 17 – Coeficientes para o perfil NACA-0012 (7). | 61 |
| Figura 18 – Inclinação do mastro do rotor principal. | 61 |
| Figura 19 – Efeito Solo (8). | 62 |
| Figura 20 – Aumento da força de sustentação em função da distância do rotor ao solo para variados rotores (9). | 63 |
| Figura 21 – Rotor de cauda - Forças aplicadas | 64 |
| Figura 22 – Estabilizador horizontal e vertical | 65 |
| Figura 23 – Forças atuando nos estabilizadores. | 65 |
| Figura 24 – Colisores | 66 |
| Figura 25 – Três movimentos básicos de um helicóptero (10). | 67 |
| Figura 26 – Controles do helicóptero H125 Esquilo. | 67 |
| Figura 27 – Painel do Helicóptero H125 Esquilo (11). | 68 |
| Figura 28 – Instrumentos disponíveis no painel da aeronave. | 69 |
| Figura 29 – Fragata Niterói (F40) (12). | 71 |
| Figura 30 – Modelo 3D com poucos polígonos do casco do navio | 71 |
| Figura 31 – Forças aplicadas ao casco do navio. | 73 |
| Figura 32 – Eixos, hélices e lemes do navio | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura 33 – Controle do navio - Piloto Automático | 76 |
| Figura 34 – Controlador PID (13). | 77 |
| Figura 35 – Gráfico da força aplicada ao leme em função do erro de rumo | 78 |
| Figura 36 – Colisores do navio | 78 |
| Figura 37 – Modelo 3D da região do Rio de Janeiro | 80 |
| Figura 38 – Modelo de ondas e malha utilizada | 81 |
| Figura 39 – <i>Shader</i> do oceano - Diagrama de blocos do <i>Shader Graph</i> | 82 |
| Figura 40 – Mar - Resultado final | 82 |
| Figura 41 – Condições variadas de céu, atmosfera, nuvens e neblina | 83 |
| Figura 42 – Sinalização náutica sob influência do vento | 84 |
| Figura 43 – Efeito de chuva | 85 |
| Figura 44 – Iluminação Noturna | 86 |
| Figura 45 – Módulo do instrutor | 87 |
| Figura 46 – Simulador Sintético no CIAAN | 97 |
| Figura 47 – Situação inicial da simulação | 98 |
| Figura 48 – Fluxo de participação prática dos pilotos no experimento | 98 |
| Figura 49 – Cenário 1 | 100 |
| Figura 50 – Trajeto dos voos - Cenário 1 | 102 |
| Figura 51 – Cenário 2 | 102 |
| Figura 52 – Trajeto dos voos - Cenário 2 | 104 |
| Figura 53 – Cenário 3 | 105 |
| Figura 54 – Trajeto dos voos - Cenário 3 | 107 |
| Figura 55 – Cenário 4 | 107 |
| Figura 56 – Trajeto dos voos - Cenário 4 | 109 |
| Figura 57 – Movimentos de rotação do navio | 110 |
| Figura 58 – Precisão do Pouso | 113 |
| Figura 59 – Dimesões do convoo | 114 |
| Figura 60 – Respostas - Pergunta 1 | 123 |
| Figura 61 – Respostas - Pergunta 2 | 125 |
| Figura 62 – Respostas - Pergunta 3 | 126 |
| Figura 63 – Respostas - Pergunta 4 | 126 |
| Figura 64 – Respostas - Pergunta 5 | 127 |
| Figura 65 – Respostas - Pergunta 6 | 127 |
| Figura 66 – Respostas - Pergunta 7 | 128 |
| Figura 67 – Respostas - Pergunta 8 | 129 |
| Figura 68 – Respostas - Pergunta 9 | 129 |
| Figura 69 – Respostas - Pergunta 10 | 130 |
| Figura 70 – Respostas - Pergunta 11 | 130 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Resumo das Referências | 38 |
| Tabela 2 – Comparação com os trabalhos relacionados | 95 |
| Tabela 3 – Cenário 1 - Parâmetros de configuração | 100 |
| Tabela 4 – Cenário 2 - Parâmetros de configuração | 102 |
| Tabela 5 – Cenário 3 - Parâmetros de configuração | 104 |
| Tabela 6 – Cenário 4 - Parâmetros de configuração | 107 |
| Tabela 7 – Estatísticas do movimento da Fragata Niterói no SimPC | 111 |
| Tabela 8 – CENÁRIO 1 - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso | 115 |
| Tabela 9 – CENÁRIO 2 - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso | 117 |
| Tabela 10 – CENÁRIO 3 - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso | 119 |
| Tabela 11 – CENÁRIO 4 - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso | 121 |
| Tabela 12 – Ranking de avaliação - Pergunta 1 | 124 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| BET | <i>Blade Element Theory</i> - Teoria do Elemento de Pá |
| C# | <i>C Sharp</i> - linguagem de programação |
| CIAAN | Centro de Instrução e Adestramento Aeronaval Almirante José Maria do Amaral Oliveira |
| FSTD | <i>Flight Simulator Training Device</i> |
| FTD | <i>Flight Training Device</i> |
| IA | Inteligência Artificial |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) |
| MB | Marinha do Brasil |
| M&S | <i>Modeling and Simulation</i> - Modelagem e Simulação |
| N/A | Não Aplicável |
| NACA | <i>National Advisory Committee for Aeronautics</i> |
| OM | Organização Militar |
| RV | Realidade Virtual |
| SimPC | Simulador de Pouso em Convo |
| UAV | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (Veículo Aéreo Não Tripulado) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---|
| α | Ângulo de ataque da pá |
| ρ | Densidade ou massa específica do fluido |
| ω | Velocidade angular |
| τ | Tempo de integração |
| φ | Velocidade da onda |
| Σ | Somatório - soma discreta |
| \int | Integral - soma contínua |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO | 19 |
| 1.2 | METODOLOGIA | 23 |
| 1.3 | CONTRIBUIÇÕES | 24 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO | 25 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 26 |
| 2.1 | SIMULAÇÃO | 26 |
| 2.2 | MODELO DE UM SISTEMA | 28 |
| 2.3 | REALIDADE VIRTUAL | 30 |
| 2.4 | BLADE ELEMENT THEORY | 32 |
| 2.5 | ENVELOPE | 33 |
| 3 | TRABALHOS RELACIONADOS | 35 |
| 3.1 | METODOLOGIA APLICADA | 35 |
| 3.1.1 | BUSCA E SELEÇÃO DOS ESTUDOS | 36 |
| 3.2 | ANÁLISE DOS TRABALHOS RELACIONADOS | 39 |
| 3.3 | RESUMO DAS LIMITAÇÕES E LACUNAS CIENTÍFICAS ENCONTRADAS | 45 |
| 3.3.1 | TIPO DE SIMULADOR UTILIZADO | 45 |
| 3.3.2 | MODELO FÍSICO DO HELICÓPTERO E NAVIO | 47 |
| 3.3.2.1 | MODELO DO HELICÓPTERO | 47 |
| 3.3.2.2 | MODELO DO NAVIO | 48 |
| 3.3.3 | UTILIZAÇÃO DE PILOTOS MILITARES EXPERIENTES | 49 |
| 3.3.4 | FUNCIONALIDADE DE POUSO EM CONVOO DE NAVIO EM MOVIMENTO | 50 |
| 3.3.5 | ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO DO SIMULADOR PARA O TREINAMENTO DOS PILOTOS | 51 |
| 4 | O SIMULADOR DE POUSO EM CONVOO (SIMPC) | 53 |
| 4.1 | SOFTWARES UTILIZADOS | 53 |
| 4.1.1 | UNITY | 53 |
| 4.1.2 | BLENDER | 54 |
| 4.1.3 | GIMP | 55 |
| 4.1.4 | VISUAL STUDIO | 55 |
| 4.2 | MODELOS FÍSICOS | 56 |
| 4.2.1 | AERONAVE | 56 |
| 4.2.1.1 | CARENAGEM | 57 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1.2 | ROTOR PRINCIPAL | 59 |
| 4.2.1.3 | EFEITO SOLO | 62 |
| 4.2.1.4 | ROTOR DE CAUDA | 63 |
| 4.2.1.5 | ESTABILIZADOR HORIZONTAL E VERTICAL | 64 |
| 4.2.1.6 | COLISORES | 65 |
| 4.2.1.7 | MOVIMENTOS DO HELICÓPTERO E CONTROLES | 66 |
| 4.2.1.8 | INSTRUMENTOS DO PAINEL | 68 |
| 4.2.1.9 | CÓDIGO EM C# DO HELICÓPTERO | 70 |
| 4.2.2 | NAVIO | 70 |
| 4.2.2.1 | MODELO 3D E FORÇAS NO CASCO DO NAVIO | 71 |
| 4.2.2.2 | PROPULSÃO | 74 |
| 4.2.2.3 | LEME | 74 |
| 4.2.2.4 | PILOTO AUTOMÁTICO | 75 |
| 4.2.2.5 | COLISORES | 78 |
| 4.2.2.6 | CÓDIGO EM C# DO NAVIO | 79 |
| 4.3 | O AMBIENTE DA SIMULAÇÃO | 79 |
| 4.3.1 | REGIÃO E RELEVO | 79 |
| 4.3.2 | MAR | 80 |
| 4.3.3 | CÉU E ATMOSFERA | 82 |
| 4.3.4 | VENTO | 83 |
| 4.3.5 | CHUVA | 84 |
| 4.3.6 | ILUMINAÇÃO NOTURNA E DIURNA | 85 |
| 4.4 | MÓDULO DO INSTRUTOR E COMUNICAÇÕES VIA REDE | 85 |
| 4.5 | HARDWARE UTILIZADO | 88 |
| 5 | COMPARAÇÃO COM TRABALHOS RELACIONADOS | 89 |
| 5.1 | RESUMO DAS COMPARAÇÕES | 92 |
| 6 | EXPERIMENTOS E RESULTADOS | 96 |
| 6.1 | INTEGRAÇÃO COM INFRAESTRUTURA DE UM SIMULADOR PROFIS- SIONAL | 96 |
| 6.2 | PARTICIPAÇÃO DE PILOTOS EXPERIENTES | 97 |
| 6.3 | REALIZAÇÃO DE VOOS DE TESTE | 97 |
| 6.4 | ANÁLISE DE DADOS DE DESEMPENHO | 99 |
| 6.4.1 | CENÁRIO 1 | 99 |
| 6.4.1.1 | RESULTADOS DOS VOOS | 100 |
| 6.4.2 | CENÁRIO 2 | 102 |
| 6.4.2.1 | RESULTADOS DOS VOOS | 102 |
| 6.4.3 | CENÁRIO 3 | 104 |
| 6.4.3.1 | RESULTADOS DOS VOOS | 105 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4.4 | CENÁRIO 4 | 107 |
| 6.4.4.1 | RESULTADOS DOS VOOS | 107 |
| 6.5 | ANÁLISE ESTATÍSTICA | 109 |
| 6.5.1 | NAVIO | 109 |
| 6.5.2 | HELICÓPTERO E PILOTOS | 112 |
| 6.5.2.1 | RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO HELICÓPTERO E PILOTOS | 121 |
| 6.6 | AVALIAÇÃO QUALITATIVA E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 122 |
| 6.6.1 | QUESTIONÁRIO, RESPOSTAS E AVALIAÇÃO | 123 |
| 7 | CONCLUSÃO | 135 |
| 7.1 | TRABALHOS FUTUROS | 137 |
| | REFERÊNCIAS | 139 |

1 INTRODUÇÃO

Os simuladores de voo são ferramentas essenciais para o treinamento de pilotos, proporcionando um ambiente seguro e controlado para o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de pilotagem. Eles possibilitam o treinamento dos pilotos em cenários complexos e desafiadores, que dificilmente podem ser encontrados em condições reais de voo. Um exemplo de cenário desafiador que pode ser simulado é o pouso de helicópteros no convoo de navios, onde fatores como o vento e o movimento da embarcação impõem desafios os pilotos, exigindo perícia no controle da aeronave e rápida tomada de decisão. Ao utilizar simuladores, os pilotos podem praticar repetidamente essas manobras, sem os riscos associados ao treinamento em situações reais.

A Realidade Virtual (RV) trouxe avanços significativos para os simuladores de voo, elevando o nível de imersão e realismo nos treinamentos. Com o uso de tecnologias avançadas de RV, os pilotos são inseridos em ambientes tridimensionais altamente detalhados, que replicam com fidelidade as condições visuais de uma cabine de voo. Sherman & Craig (14) destacam quatro elementos fundamentais que compõem a RV e desempenham um papel essencial na simulação: mundo virtual, imersão, *feedback* sensorial e interatividade. Para que um simulador seja eficaz no treinamento, é fundamental que esses elementos sejam bem implementados, proporcionando uma experiência realista e envolvente para o usuário.

Além disso, os simuladores de voo possibilitam a reprodução controlada de condições de emergência e falhas mecânicas, que seriam inviáveis ou extremamente arriscadas de serem simuladas em treinamentos com aeronaves reais. Situações críticas, como falha no sistema de propulsão, perda de instrumentos, pane hidráulica e condições meteorológicas adversas, podem ser simuladas de maneira segura, permitindo que os pilotos pratiquem os procedimentos corretos e desenvolvam respostas rápidas e eficazes diante de eventos inesperados. Simular cenários complexos é essencial para o treinamento, pois expõem os pilotos a altos níveis de estresse, sem comprometer a segurança da tripulação ou da aeronave. Além disso, a possibilidade de repetição contínua dessas simulações contribui para a internalização dos procedimentos de emergência que devem ser cumpridos, aprimorando o tempo de resposta e capacidade de tomada de decisão, contribuindo para a segurança das operações aéreas.

Os simuladores de voo representam uma solução econômica, segura e eficiente para o treinamento de pilotos, reduzindo significativamente os custos operacionais associados ao uso de aeronaves reais. Gastos com combustível, manutenção e suporte logístico são minimizados, permitindo que mais horas de treinamento sejam realizadas sem impactar o orçamento. Dessa forma, a adoção de simuladores otimiza o treinamento, consolidando-se como uma ferramenta indispensável na formação e capacitação de pilotos.

O estudo de Doozandeh (1), demonstra que a simulação desempenha um papel fundamental no adestramento de pilotos, proporcionando um ambiente seguro e repetitivo para a prática de diversas manobras. No entanto, os simuladores variam significativamente em termos de grau de realismo, sendo que um nível mais elevado de fidelidade normalmente está associado a custos mais altos.

A Figura 1 ilustra essa relação entre realismo, custo e eficácia do treinamento, evidenciando que mesmo um simulador de custo relativamente baixo pode contribuir significativamente para o treinamento dos pilotos. Além disso, observa-se que, a partir de um determinado ponto, o aumento no custo do simulador não impacta proporcionalmente o treinamento, resultando em uma relação custo-benefício desvantajosa.

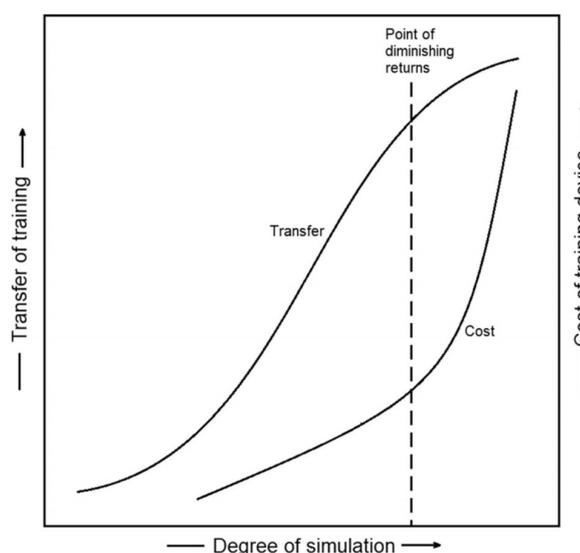


Figura 1 – Relação entre realismo, custo e impacto no treinamento (1).

Uma estratégia eficaz para reduzir significativamente o custo de um simulador, sem comprometer sua capacidade de contribuir para o treinamento, é especializá-lo em uma tarefa específica. Em vez de tentar replicar todas as funcionalidades de uma aeronave real, um simulador voltado para um tipo específico de manobra pode concentrar seus recursos em reproduzir com alta fidelidade os elementos críticos dessa operação. Dessa forma, torna-se possível alcançar um alto nível de eficácia no treinamento, ao mesmo tempo em que se mantém os custos reduzidos e o desenvolvimento mais acessível (1).

1.1 Contextualização e Motivação

A Marinha do Brasil, como instituição estratégica de Defesa, não se limita à operação de navios, mas também integra meios aeronavais, que são componentes fundamentais do Poder Naval. Esses meios incluem tanto aeronaves de asas fixas (aviões) quanto de asas rotativas (helicópteros), ampliando significativamente as capacidades operacionais

da Força. A incorporação desses meios potencializa atributos essenciais do Poder Naval, tais como mobilidade, permanência, versatilidade e flexibilidade, permitindo uma atuação mais eficaz em diversas missões (15).

- A mobilidade representa a capacidade de deslocar-se prontamente e a grandes distâncias, mantendo elevado nível de prontidão;
- A permanência indica a capacidade de operar, continuamente, com independência e por longos períodos, em áreas distantes e de grandes dimensões;
- A versatilidade permite alterar a postura militar, mantendo a aptidão para executar uma ampla gama de tarefas; e
- A flexibilidade significa a capacidade de organizar grupamentos operativos de diferentes valores, em função da missão, possibilitando seu emprego gradativo (15).

Essas capacidades são fundamentais para cumprir as Tarefas Básicas da Marinha, que incluem negar o uso do mar ao inimigo, controlar áreas marítimas, projetar poder sobre terra e contribuir para a dissuasão (15), reforçando a presença estratégica da Marinha e sua capacidade de proteger a soberania nacional.

Os helicópteros desempenham um papel fundamental na execução e apoio de diversos tipos de Operações como: apoio logístico, busca e resgate em combate, operações de ataque, operações antissubmarinos, operações anfíbias, operações de esclarecimento e operações especiais (15). Essas Operações demandam frequentes lançamentos e recolhimentos da aeronave no convoo do navio.

Decolagens e pousos no convoo de navios de guerra são procedimentos complexos e de alto risco, uma vez que ocorrem em um espaço confinado e sobre uma plataforma em movimento com seis graus de liberdade. O deslocamento e a rotação do navio em torno de seus eixos, influenciados pelo estado do mar, podem gerar oscilações intensas e irregulares, tornando o pouso ainda mais desafiador. Nessas condições, o piloto precisa demonstrar precisão no controle da aeronave, elevado nível de concentração e capacidade de tomada de decisão em tempo real. Além disso, fatores como condições climáticas adversas e operações noturnas intensificam a dificuldade da manobra, uma vez que a visibilidade reduzida e a influência do vento impactam significativamente a segurança da operação.

A Figura 2 apresenta o Helicóptero Esquilo (UH-12) realizando operações aéreas no convoo da Fragata Niterói (F40) e da Fragata Defensora (F41).



Figura 2 – Helicóptero Esquilo (UH-12) realizando operações aéreas no convoo da Fragata Niterói (F40) (2) e da Fragata Defensora (F41) (3), respectivamente.

Nesse contexto, um simulador de voo dedicado ao pouso de helicópteros no convoo de navios em movimento torna-se uma ferramenta indispensável para o treinamento dos pilotos, proporcionando a oportunidade de praticar esse tipo de manobra em cenários desafiadores dentro de um ambiente seguro e controlado.

Na MB, a Organização Militar (OM) responsável pela formação e adestramento dos pilotos é o Centro de Instrução e Adestramento Aeronaval Almirante José Maria do Amaral Oliveira (CIAAN), que possui diversos instrutores de voo experientes e altamente qualificados para conduzir a formação e o treinamento de pilotos. Além disso, o CIAAN dispõe de diversos simuladores dedicados a aeronaves de asas fixas e de asas rotativas. Parte desses simuladores são genéricos, ou seja, permitem a simulação de diferentes modelos de aeronaves, enquanto outros são projetados especificamente para um único tipo de aeronave.

Os simuladores genéricos possuem a vantagem de serem mais flexíveis, permitindo o treinamento em múltiplas aeronaves e facilitando a adaptação a diferentes perfis operacionais. No entanto, apresentam a desvantagem de não replicarem fielmente as características específicas de cada aeronave, especialmente no que diz respeito à resposta dos controles e ao comportamento aerodinâmico. Já os simuladores dedicados possuem a vantagem de oferecer uma experiência mais realista e imersiva, uma vez que são projetados para replicar com alta fidelidade os sistemas, a física de voo e a cabine de uma aeronave específica. Como desvantagem, esses simuladores são menos versáteis, limitados a um único modelo, além de exigirem investimentos mais altos em desenvolvimento e manutenção.

Os simuladores do CIAAN permitem o treinamento de uma ampla gama de procedimentos aeronáuticos. Dentre eles, dois se destacam por possuírem a capacidade de simular o pouso de helicópteros no convoo de navios em movimento:

- Simulador de Helicóptero SH-16 (Seahawk): Simulador dedicado exclusivamente à aeronave SH-16 Seahawk, adquirido sob encomenda da Lockheed Martin, fabricante do helicóptero, com software e hardware proprietários; e o

- Simulador Sintético: Simulador genérico, equipado com um cockpit físico, controles realistas e uma tela de projeção, utilizando o software X-Plane 8 para a simulação.

Ambos compartilham algumas limitações no que se refere a simular o pouso em navio, entre as quais destacam-se:

- Modelo de movimento do navio simplificado: A dinâmica de deslocamento e oscilação do navio são representadas de maneira previsível e repetitiva, diferindo da realidade operacional, onde os movimentos do convoo são variáveis e difíceis de prever;
- Incapacidade de simular condições severas de mar: Ambos os simuladores não reproduzem fielmente estados de mar agitado, tampouco os efeitos mais extremos de balanço e caturro do navio, impossibilitando o treinamento sob condições meteorológicas adversas.
- Modelos de navios distintos daqueles utilizados pela Esquadra da MB: Os simuladores incluem apenas modelos genéricos de navios pertencentes a marinhas estrangeiras, cujas dimensões e características diferem dos navios operados pela MB; e
- Sinalização náutica inadequada: A sinalização empregada nos simuladores não segue as normas e procedimentos da aviação naval da MB, o que pode comprometer a fidelidade do treinamento.

Além dessas limitações gerais, cada simulador apresenta limitações específicas:

- Simulador do SH-16: Oferece treinamento apenas para a aeronave SH-16 Seahawk, o que não atende adequadamente os pilotos qualificados para operar outros modelos, como o UH-12 Esquilo, utilizado como referência neste estudo.
- Simulador Sintético: Possui uma maior variedade de aeronaves disponíveis, incluindo o UH-12 Esquilo, porém os modelos de aeronaves e navios não interagem fisicamente entre si. Isso significa que, durante a simulação, a aeronave pode atravessar o convoo do navio sem efetuar um pouso realista, inviabilizando a prática adequada da manobra.

Em síntese, os simuladores disponíveis no CIAAN não reproduzem com fidelidade as condições reais enfrentadas durante o pouso em convoo, o que limita sua eficácia para atender às demandas específicas de adestramento dos pilotos da MB.

1.2 Metodologia

A metodologia adotada nesta pesquisa seguiu uma abordagem focada no desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo, denominado *SimPC* (*Simulador de Pouso em Convo*), capaz de reproduzir o pouso de um Helicóptero H125 Esquilo no convoio de uma Fragata Classe Niterói. O SimPC foi projetado para atender os requisitos específicos de adestramento de pilotos da MB em operações de pouso em convoio de navios. Como discutido anteriormente, os simuladores disponíveis no CIAAN apresentam limitações que comprometem a fidelidade da simulação neste tipo de operação. Diante desse cenário, o SimPC foi desenvolvido com o propósito de preencher essa lacuna, colocando-se como uma alternativa para o treinamento dos pilotos.

Os requisitos específicos são:

- Um modelo de voo realista para o helicóptero, garantindo que a resposta da aeronave aos comandos do piloto seja condizente com o comportamento de um helicóptero real;
- Para o navio, um modelo realista de flutuação, deslocamento, balanço e caturro, onde o navio interage dinamicamente com as ondas do mar, que também foram modeladas para refletir as condições reais de estado do mar;
- Sinalização náutica conforme as normas seguidas pela MB, garantindo que os procedimentos possam ser praticados de maneira fiel à operação real;
- Modelos de aeronave e navio que representam os meios efetivamente operados pela MB, proporcionando aos pilotos um ambiente de treinamento condizente com a realidade;
- Cenários realistas que possam simular condições climáticas variadas, abrangendo desde condições ideais para o pouso como situações extremas de baixa visibilidade e mau tempo;
- Módulo para o instrutor controlar os parâmetros da simulação, podendo ajustar a velocidade e o rumo do navio, bem como modificar as condições climáticas, a intensidade do vento e o estado do mar, possibilitando a criação de cenários progressivamente mais desafiadores.

A escolha da implementação do helicóptero H125 Esquilo no SimPC deve-se ao fato de ser uma aeronave recentemente adquirida pela Marinha do Brasil, mas que, atualmente, não possui previsão de receber um simulador dedicado no CIAAN. Essa lacuna motivou a inclusão do H125 no simulador, visando suprir a necessidade de capacitação dos pilotos que operam essa aeronave. Já a seleção da Fragata Classe Niterói como plataforma de

pouso no simulador justifica-se por ser a classe de navio ainda em atividade na MB que mais realiza operações no mar com esse tipo de helicóptero.

O método empregado nesta pesquisa também inclui a avaliação do SimPC, a qual foi realizada com a participação de pilotos experientes, que executaram uma série de exercícios para testar o simulador e fornecer *feedback* sobre sua eficácia. Após a realização de voos simulados, os pilotos preencheram um questionário de avaliação qualitativa, no qual classificaram o grau de realismo do simulador e sua potencial contribuição para o treinamento. Essa abordagem permitiu uma análise do desempenho do SimPC, possibilitando a identificação de pontos fortes e aspectos a serem aprimorados para torná-lo uma ferramenta útil para o adestramento dos pilotos da MB.

Este trabalho se delimita ao desenvolvimento do SimPC, aos experimentos realizados para avaliar sua eficácia e às análises qualitativas sobre o impacto da ferramenta no treinamento de pilotos militares. Embora a funcionalidade principal do SimPC seja voltada para o pouso em convoo, a metodologia apresentada neste estudo é suficientemente flexível para ser adaptada ao desenvolvimento de simuladores com finalidades mais amplas.

1.3 Contribuições

As contribuições desta dissertação são:

1. Apresentação de uma metodologia detalhada e replicável para o desenvolvimento de simuladores de voo de baixo custo, servindo como referência para futuros trabalhos;
2. Criação do simulador SimPC, uma ferramenta prática e funcional, que pode ser aprimorada e expandida em trabalhos futuros para incluir novos tipos de treinamento e funcionalidades;
3. Disponibilização de dados qualitativos sobre a contribuição do simulador para o treinamento de pilotos, auxiliando na validação de sua eficácia;
4. Evidências de que simuladores de baixo custo podem, em alguns casos, superar simuladores comerciais em tarefas específicas, especialmente por sua vantagem de serem altamente customizáveis;
5. Contribuição para a segurança da aviação, ao viabilizar treinamentos que reduzem os riscos em operações reais e permitem a simulação de situações perigosas que, de outra forma, seriam impraticáveis no treinamento convencional.

Acredita-se que este estudo ofereça uma contribuição significativa para a área da computação aplicada à simulação de voo, ao propor uma metodologia prática e econômica para o desenvolvimento de simuladores customizáveis em realidade virtual. O trabalho

explora técnicas computacionais para modelagem física de helicópteros e navios, proporcionando uma solução que atende às demandas específicas do treinamento de pilotos. Além disso, serve como referência para trabalhos futuros que busquem aprofundar os benefícios, limitações e aplicações de simuladores de baixo custo na área militar.

Embora o SimPC tenha sido projetado com foco no adestramento de pilotos militares da Marinha do Brasil para operações de pouso em convoo de navios de guerra, sua aplicação não se limita ao meio militar. O simulador é flexível ao ponto de permitir a inclusão de novas aeronaves, navios e cenários para o treinamento de pilotos civis. Com as devidas adaptações, o SimPC pode ser utilizado para o treinamento de pousos e decolagens em diferentes tipos de plataformas marítimas, como plataformas de petróleo, embarcações de apoio *offshore* e navios de pesquisa. Além disso, pode ser configurado para operações em aeródromos convencionais e helipontos urbanos, contribuindo para a formação e capacitação de pilotos de asas rotativas em múltiplos cenários operacionais. Essa versatilidade amplia o potencial do simulador como uma ferramenta eficaz e acessível para diversos setores da aviação.

1.4 Organização

O documento está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, a contextualização, metodologia empregada e contribuições científicas; o Capítulo 2 fornece a fundamentação teórica necessária para o entendimento das metodologias e modelos utilizados; o Capítulo 3 revisa os trabalhos relacionados, destacando as principais contribuições e lacunas na área de simulação de voo; o Capítulo 4 descreve detalhadamente o desenvolvimento do SimPC; o Capítulo 5 compara o simulador desenvolvido com outras soluções encontradas na literatura; o Capítulo 6 apresenta os experimentos realizados, os métodos de avaliação e os resultados obtidos; e, por fim, o Capítulo 7 discute as conclusões e propõe direções para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais que servirão como alicerces para uma melhor compreensão desta Dissertação, a saber, conceitos de Simulação, Modelo de um sistema e Realidade Virtual. Serão explorados os principais conceitos, suas definições, relevância e conexão com esta pesquisa.

2.1 Simulação

Simulação pode ser definida como o processo de reproduzir o comportamento de um sistema ou processo do mundo real ao longo do tempo. Seja realizada manualmente ou com o auxílio de computadores, a simulação consiste em criar uma representação artificial do sistema e acompanhar sua evolução, permitindo a análise e a obtenção de informações sobre as características e o desempenho do sistema real (16).

Para compreender a definição de ‘Simulação’ também é importante entender o conceito de ‘Sistema’, que é um conjunto de elementos interligados que interagem de forma coordenada ou dependente entre si, com o objetivo de alcançar um propósito ou cumprir uma determinada função. Sistema pode ser compreendido também como uma coleção de entidades que atuam e interagem juntas em prol da realização de algum objetivo lógico (16, 17).

A simulação é uma ferramenta adequada para vários propósitos, como por exemplo:

- Permitir o estudo e a experimentação de sistemas complexos;
- Adquirir conhecimento durante o desenvolvimento da simulação que servirá para melhorar o sistema em estudo;
- Alterar as variáveis do sistema e observar como elas interagem entre si;
- Servir como ferramenta pedagógica e de treinamento;
- Verificar soluções analíticas para problemas do sistema em estudo; e
- Visualizar previamente operações, facilitando o planejamento.

A seguir serão listadas algumas vantagens e desvantagens da simulação (16):

a) Vantagens da simulação:

- Novas políticas, procedimentos, regras e fluxo de informação podem ser explorados sem interferir no sistema real;

- Podem ser testadas hipóteses sobre como ou quando certo fenômeno acontece;
- O tempo pode ser comprimido ou expandido para investigar determinado fenômeno;
- Pode-se obter um discernimento mais claro a respeito de como as variáveis interagem; e
- Perguntas do tipo “E se...” podem ser respondidas.

b) Desvantagens da simulação:

- A construção do modelo requer treinamento especial;
- Os resultados da simulação podem ser difíceis de ser interpretados; e
- A modelagem e a análise dos resultados podem levar muito tempo e serem custosas.

No contexto militar, a simulação possui aplicação no treinamento de pilotos, comandantes e operadores, por meio de simuladores de aeronaves, navios, carros de combate, sistemas de guerra, combate a avarias, jogos de guerra, dentre outros. Praticamente qualquer tipo de operação, exercício e planejamento militar podem ser executados em simuladores.

Aplicando estes conceitos a esta pesquisa, a simulação será a imitação do voo de um helicóptero em um ambiente controlado, onde o piloto interage com o modelo da aeronave em um cenário virtual. Foram inseridos na simulação:

- o modelo físico de voo e o controle da aeronave;
- o cenário, com relevo, atmosfera, sol, nuvens, chuva, vento, neblina;
- o modelo físico do comportamento do mar, com ondas controláveis e interagindo fisicamente com o navio;
- o navio e seu modelo físico de flutuação e deslocamento;

O simulador criado permite que os pilotos pratiquem manobras de pouso no convoo de um navio em movimento, se familiarizem com este tipo de operação, pratiquem sob várias circunstâncias diferentes de estado do mar, visibilidade, condições meteorológicas e hora do dia. No ambiente simulado, é possível criar várias circunstâncias sobre as quais uma aeronave e o piloto podem estar submetidos, permitindo que a manobra seja praticada quantas vezes for necessário, sem risco e com baixo custo. Além do seu propósito específico de pouso em convoo, o simulador SimPC foi projetado de forma a permitir a implementação futura de novas funcionalidades.

2.2 Modelo de um sistema

Um modelo é uma representação simplificada de um sistema, criada com o propósito de estudá-lo e compreender seu comportamento. Na maioria dos casos, são considerados apenas os aspectos do sistema que influenciam diretamente o problema em análise. Apesar de ser uma simplificação, o modelo deve ser suficientemente detalhado para permitir conclusões relevantes e válidas sobre o sistema real. Além disso, diferentes modelos podem ser desenvolvidos para o mesmo sistema, dependendo dos objetivos específicos de cada investigação (16).

Um Modelo pode ser classificado como (16):

a) Matemático ou Físico

- Matemático: Usa notações simbólicas e equações matemáticas para representar o sistema. Utiliza relações lógicas e quantitativas. O modelo de simulação é um tipo particular de modelo matemático; e
- Físico: Quando construído um protótipo do sistema para que sejam realizados experimentos e/ou testes. Como exemplo podemos citar a construção de um navio em pequena escala para ter sua estabilidade testada numa piscina especial com ondas controladas.

b) Estático ou Dinâmico

- Estático: Não considera a passagem do tempo ou esta é irrelevante. O exemplo mais conhecido é o modelo de simulação de Monte Carlo; e
- Dinâmico: Representa sistemas que variam ao longo do tempo.

c) Contínuo ou Discreto

- Contínuo: O estado do sistema muda com o tempo de forma contínua. Por exemplo, uma aeronave num túnel de vento realizando testes aerodinâmicos; e
- Discreto: O estado do sistema muda em instantes discretos de tempo.

d) Determinístico ou Estocástico

- Determinístico: Não contém variáveis aleatórias. As variáveis de entrada são conhecidas, e, para um mesmo conjunto de variáveis de entrada, a saída será sempre a mesma; e
- Estocástico: Contém uma ou mais variáveis aleatórias de entrada. Entradas aleatórias resultam em saídas aleatórias.

A Figura 3 apresenta a relação entre os diferentes tipos de modelos de simulação. Destaca-se em azul o modelo mais comumente utilizado em simuladores de helicópteros, que também foi adotado para o desenvolvimento do simulador criado para esta pesquisa.

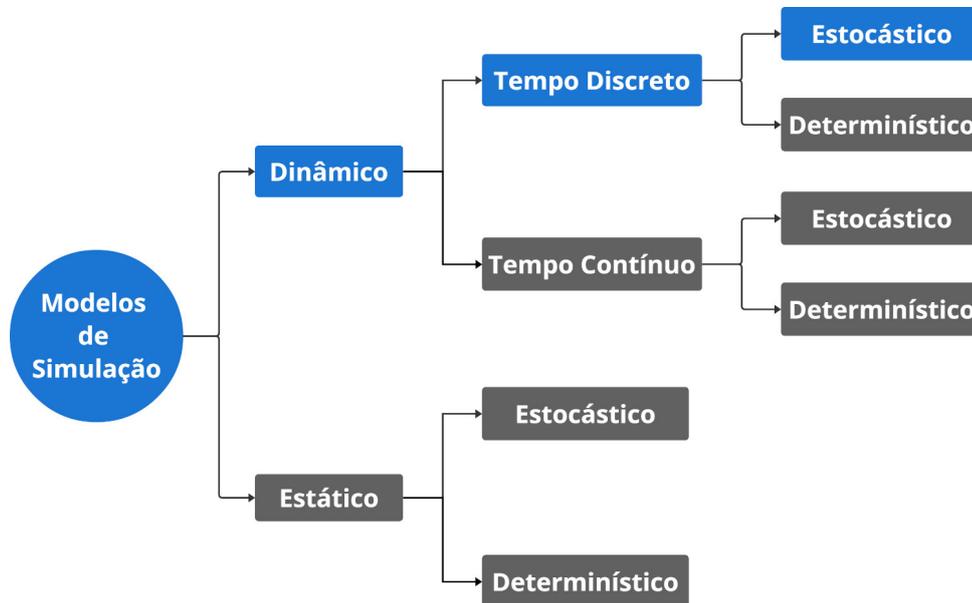


Figura 3 – Tipos de modelos de simulação

No desenvolvimento do simulador em um ambiente computacional, o modelo adotado é **matemático**, pois utiliza equações e algoritmos para representar e prever o comportamento do helicóptero, em contraste com modelos físicos, que dependem de componentes físicos tangíveis.

O modelo é classificado como **dinâmico**, uma vez que os elementos da simulação, como a posição da aeronave e do navio, as ondas do oceano, as condições climáticas e outros componentes do ambiente, variam ao longo do tempo. Essa característica reflete a evolução contínua do sistema durante a simulação.

Embora o voo de uma aeronave seja, por natureza, um sistema contínuo, o simulador é implementado como um modelo de **tempo discreto** devido ao ambiente computacional em que opera. Nesse contexto, cada quadro (ou *frame*) da simulação exhibe, de forma sequencial e discreta, o estado do sistema em intervalos de tempo específicos.

Por fim, o modelo do simulador é considerado **estocástico**, devido à presença de variáveis aleatórias que introduzem incertezas e diferentes possibilidades de estados no sistema. Um exemplo claro disso são os comandos de entrada aplicados pelo piloto, que variam em tempo real e influenciam diretamente o comportamento da aeronave durante a simulação.

2.3 Realidade Virtual

Definir a palavra “**realidade**” pode levar a discussões filosóficas complexas. No entanto, para os propósitos deste estudo, realidade pode ser entendida como o estado ou qualidade de ser real; algo que existe independentemente de ideias sobre ele; ou algo que constitui uma coisa real ou atual, em oposição ao que é meramente aparente (14). De forma simplificada, é um lugar que existe e que pode ser experienciado.

Já o termo “**virtual**” refere-se a algo que, em essência ou efetivamente, possui características reais, mas não de fato (14). Em outras palavras, a virtualidade permite a simulação de cenários e objetos que, embora não sejam fisicamente tangíveis, apresentam comportamento semelhante ao do mundo real.

Quatro elementos principais caracterizam a experiência de Realidade Virtual (RV) (14):

- a) Mundo Virtual: Refere-se ao conteúdo de um determinado meio, ou seja, a descrição de um conjunto de objetos em um espaço, juntamente com as regras e relações que os governam;
- b) Imersão: Define-se como a sensação de estar presente em um ambiente, seja por um estado mental puro ou alcançado por meio de representações físicas. A imersão física é uma característica central da RV, enquanto a imersão mental é o objetivo principal da maioria das experiências;
- c) Resposta Sensorial (*feedback*): É a capacidade de proporcionar estímulos sensoriais correspondentes às interações no ambiente virtual. Esses estímulos, como visão, audição e, em alguns casos, tato, criam uma sensação de presença e reforçam a experiência de imersão; e
- d) Interatividade: Representa a habilidade dos usuários de participar ativamente do ambiente virtual, influenciando-o por meio de suas ações. Inclui manipulação de objetos virtuais, interação com elementos do cenário, tomada de decisões que alteram a experiência e recepção de *feedback* em tempo real, tornando a experiência dinâmica e envolvente.

Na área de simuladores de voo militares, a RV tem se mostrado uma ferramenta indispensável ao longo das últimas décadas. Essa tecnologia permite criar ambientes altamente realistas e imersivos que replicam com precisão as condições de voo e situações desafiadoras ou perigosas de serem reproduzidas em um voo real. Isso oferece aos pilotos um ambiente seguro para desenvolver habilidades motoras, tomar decisões em tempo real e se familiarizar com o manejo dos controles e instrumentos da aeronave, como fariam em um cenário real.

Um exemplo significativo de aplicação da RV em simuladores de voo é o simulador de helicóptero SH-16 Seahawk da Marinha do Brasil, localizado no CIAAN em São Pedro da Aldeia, RJ, conforme ilustrado na Figura 4. Desenvolvido em parceria com a US Navy, o projeto do simulador incluiu mais de 2.600 requisitos técnicos, cobrindo desde qualificações para voo e procedimentos de emergência até navegação por instrumentos e lançamento de armamentos (18).



Figura 4 – Simulador de Helicóptero SH-16 Seahawk no CIAAN.

O simulador desenvolvido nesta pesquisa incorpora os elementos característicos da Realidade Virtual (RV) para criar um mundo virtual que reproduz as condições reais enfrentadas pelos pilotos durante o pouso em um navio de guerra. O ambiente simulado permite configurar variáveis como clima, estado do mar, vento e visibilidade, proporcionando aos pilotos uma experiência imersiva que simula os desafios do pouso com um bom grau de realismo. Esses cenários foram projetados para aprimorar as habilidades dos pilotos, bem como prepará-los para situações adversas.



Figura 5 – Estrutura do simulador no CIAAN.

A estrutura na qual o software foi integrado conta com uma tela de amplo campo de visão e uma cabine real de helicóptero equipada com seus controles, proporcionando uma resposta sensorial visual e tátil. A Figura 5 mostra a estrutura utilizada. Essa interação recria a experiência operacional de um helicóptero real, permitindo aos pilotos vivenciar

situações semelhantes às encontradas em voo. A combinação de imersão e interatividade torna o simulador uma ferramenta eficaz para o adestramento, contribuindo de maneira significativa para a formação e capacitação de pilotos.

2.4 Blade Element Theory

A *Blade Element Theory (BET)* é uma técnica utilizada para modelar as forças aerodinâmicas atuantes em hélices, asas e rotores. Esse método divide cada pá em pequenos elementos discretos ao longo de seu comprimento, permitindo o cálculo individualizado das forças de sustentação e arrasto em cada segmento (4). A principal vantagem desta técnica é a capacidade de avaliar individualmente as forças atuantes em cada seção da pá, simplificando os cálculos, eliminando a necessidade de realizar cálculos globais mais complexos para determinar a resultante desses esforços.

Na Figura 6, observa-se a representação esquemática de uma pá de hélice genérica, que possui um raio total R e um elemento da pá (destacado na cor azul) com corda c e largura dr , sendo r a distância do elemento ao centro de rotação da hélice. Sobre cada elemento são calculadas as forças com base na interação do fluxo de ar com a pá.

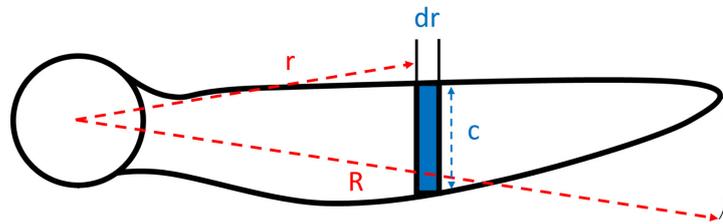


Figura 6 – Modelo BET - Elemento de pá

A Figura 7 detalha a decomposição das forças aerodinâmicas em um elemento específico. Nessa representação, as forças de sustentação dL e arrasto dD dependem do ângulo de ataque α , velocidade relativa do fluxo de ar V_r e dos coeficientes aerodinâmicos de sustentação C_l e de arrasto C_d , que são obtidos empiricamente em ensaios de laboratório (6). O modelo calcula ainda a força tangencial dT e a força radial dR , que contribuem para o empuxo e torque do rotor, respectivamente.

No SimPC, o modelo BET foi aplicado para calcular a sustentação e arrasto provocados pelas pás do rotor principal, do rotor de cauda e do estabilizador horizontal do helicóptero. Cada pá foi subdividida em múltiplos elementos, permitindo o cálculo dessas forças. Além disso, o modelo foi também aplicado para calcular as forças provocadas pela interação do fluxo de ar com a carenagem da aeronave.

De forma análoga, o mesmo princípio de subdivisão em elementos foi utilizado no SimPC para modelar o casco do navio. O casco foi dividido em pequenos segmentos, nos

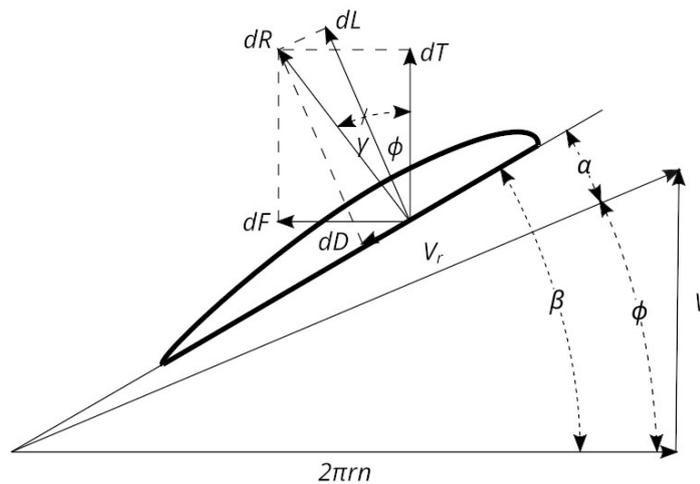


Figura 7 – Modelo BET - Perfil de asa e forças atuantes (4).

quais foram calculadas forças de empuxo, arrasto e pressão hidrodinâmica. Essa abordagem possibilitou uma simulação realista da interação entre o navio e as ondas.

A resolução do modelo BET está diretamente relacionada à quantidade de subdivisões realizadas ao longo das pás ou superfícies analisadas. Quanto maior o número de elementos discretos, maior será a fidelidade do modelo, permitindo representar com mais precisão as forças aerodinâmicas ou hidrodinâmicas atuantes. No entanto, essa maior resolução aumenta significativamente a carga computacional, tornando essencial encontrar um equilíbrio adequado entre a precisão requerida pela simulação e os recursos computacionais disponíveis. Os detalhes da implementação do modelo BET no SimPC, incluindo as equações matemáticas e parâmetros de simulação, foram descritos com maior profundidade na Seção 4.2.

2.5 Envelope

Devido aos movimentos do navio e ao espaço confinado do convés, as manobras de pouso e decolagem no convoo de um navio de guerra são extremamente desafiadoras e perigosas, especialmente sob condições meteorológicas adversas. Nessas circunstâncias, o helicóptero não será autorizado a operar (19). O **Envelope** é utilizado para definir os limites operativos dentro dos quais um helicóptero pode operar com segurança no convés de um navio específico. Esses limites levam em consideração fatores como intensidade e direção do vento relativo, balanço e caturro do navio, e são determinados para cada combinação particular de helicóptero e navio. A definição do envelope é feita por meio uma série de testes de voo no mar (5), considerando as características específicas tanto do navio quanto da aeronave.

A Figura 8 ilustra um exemplo de envelope, utilizado pela Marinha do Reino Unido. Nesse caso, os limites estabelecem que o balanço (*roll*) do navio não pode exceder 6° para

nenhum dos bordos, enquanto o caturro (*pitch*) não deve ultrapassar 2° para vante ou ré do navio. Quanto ao vento relativo, os círculos concêntricos na figura representam a intensidade do vento, variando de 0 a 50 nós, enquanto as marcações externas indicam a direção do vento relativo em um intervalo de 0 a 180° para ambos os bordos. A linha negra irregular define os limites operacionais para a combinação específica de navio e aeronave.

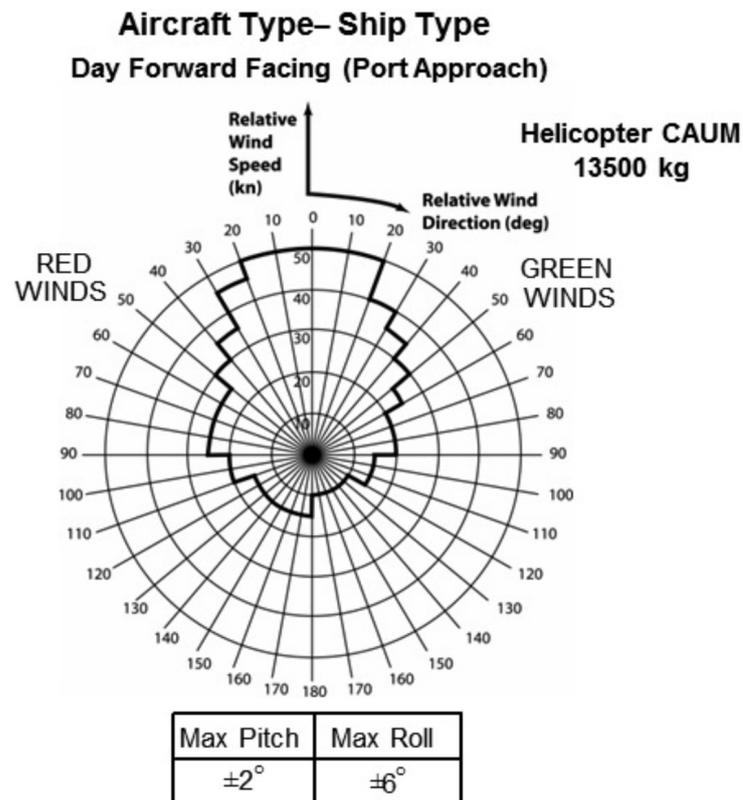


Figura 8 – Um exemplo de envelope com os limites operativos (5).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é uma metodologia de pesquisa utilizada para coletar, identificar e analisar criticamente documentos científicos disponíveis, como artigos, atas de conferências, livros e dissertações, por meio de um procedimento sistemático (20). Esta abordagem desempenha um papel fundamental na identificação de lacunas, tendências e oportunidades de pesquisa em diferentes áreas do conhecimento.

No contexto desta dissertação, foi realizada uma RSL com o objetivo de explorar o estado da arte na área de simuladores de helicópteros voltados para o treinamento militar, particularmente no que tange ao pouso em convoo de navios em movimento. Este capítulo apresenta a metodologia aplicada, os resultados obtidos e a análise dos trabalhos encontrados.

3.1 Metodologia aplicada

Para conduzir esta RSL, foi aplicada a metodologia proposta por Carrera-Rivera et al. (21), reconhecida por sua organização clara e por seguir um método amplamente estabelecido na comunidade científica. Esse método pode ser resumido nas seguintes etapas principais:

- Formulação de Questões de Pesquisa (QP): Identificar lacunas na literatura e direcionar a busca por informações relevantes;
- Aplicação do critério PICOC (*Population, Intervention, Comparison, Outcome, and Context*): Estruturar os objetivos da RSL em palavras-chave pesquisáveis, facilitando a elaboração das QPs;
- Criação de uma string de busca: Desenvolver uma sequência lógica de termos para a pesquisa em plataformas científicas;
- Definição de critérios de inclusão e exclusão: Estabelecer parâmetros claros para selecionar os documentos científicos mais relevantes;
- Avaliação da Qualidade (AQ): Aplicar critérios rigorosos para filtrar ainda mais os documentos com base em sua metodologia, validação e aplicabilidade;
- Criação de um ranking de relevância: Ordenar os documentos de acordo com o grau em que atendem às QPs formuladas; e
- Seleção final dos documentos: Identificar e utilizar os documentos mais relevantes após a aplicação de todos os filtros.

Esse processo sistemático e replicável garantiu que os documentos selecionados fossem não apenas pertinentes, mas também de alta qualidade e relevância para os objetivos desta pesquisa.

3.1.1 Busca e seleção dos estudos

A pesquisa foi guiada por três **Questões de Pesquisa (QP)** formuladas para investigar:

- quais plataformas e softwares são mais adequados para o desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo;
- quais tipos de modelo aerodinâmico são utilizados para simular o comportamento físico de um helicóptero; e
- se os simuladores de voo militares podem simular adequadamente um pouso de helicóptero no convoo de um navio em movimento.

O **critério PICOC** (21) foi adotado para desdobrar os objetivos da revisão em palavras-chave pesquisáveis. Entre os termos selecionados destacam-se: *simulator*, *helicopter*, *aerodynamic model*, *training device*, *ship's platform helideck*, *military e training improvement*. A organização lógica dessas palavras-chave resultou na criação de uma *string de busca* direcionada à identificação dos documentos científicos mais alinhados às Questões de Pesquisa (QP) formuladas.

Em seguida, definiu-se as **bases de dados** científicas para aplicação da *string* de busca. As plataformas selecionadas foram *Scopus* (22), *IEEE Digital Library* (23) e *ACM Digital Library* (24), reconhecidas por sua relevância e ampla utilização nas áreas de engenharia e ciência da computação. Essas escolhas tiveram por objetivo o acesso a um conjunto abrangente e de alta qualidade de documentos relacionados ao tema em investigação.

Os artigos selecionados foram submetidos aos **critérios de inclusão e exclusão**, avaliando fatores como relevância, período, idioma, tipo de literatura, impacto científico e acessibilidade. Além disso, foi realizada uma **Avaliação de Qualidade (AQ)**, que analisou aspectos metodológicos, procedimentos de validação e verificação, bem como a aplicação prática e resultados obtidos com os simuladores estudados. Cada documento foi pontuado com base em sua relevância em relação às QP e à conformidade com os critérios de AQ. A partir dessas pontuações, os artigos foram ranqueados, permitindo a identificação dos trabalhos mais aplicáveis e alinhados aos objetivos desta pesquisa.

A metodologia empregada, permitiu destacar os trabalhos mais aplicáveis, fornecendo as informações necessárias para o desenvolvimento do simulador proposto. Este

processo contribuiu para identificar lacunas no estado da arte e orientar os esforços desta pesquisa em direção a soluções práticas. A seguir, são detalhados os resultados dessa análise, evidenciando as contribuições existentes e as lacunas a serem preenchidas pelo trabalho aqui apresentado.

A Tabela 1 apresenta os trabalhos científicos mais relevantes encontrados na revisão, bem como um resumo do objetivo, método, contribuição e limitações de cada um deles.

Tabela 1 – Resumo das Referências

| | REFERÊNCIA | OBJETIVO | MÉTODO | CONTRIBUIÇÃO | LIMITAÇÕES | PUBLICADO EM |
|----|---|---|---|---|---|---|
| a) | César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches (25). | Construção de uma plataforma móvel para o cockpit de um simulador. | Construção de um simulador com plataforma móvel e avaliação dos resultados. | Estudo empírico do uso das plataformas móveis em simuladores, limitações, vantagens e desvantagens. | Graus de liberdade da plataforma; Fidelidade do movimento; Eficácia no treinamento; Custos. | IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering. |
| b) | Antônio Doneda, et al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML into a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training (26). | Criação de um simulador de baixo custo para treinamento de Oficial de Lançamento e Pouso (OLP). | Criação do simulador utilizando Unity3D e de uma luva para captura dos gestos. | Solução de baixo custo para treinamento do OLP. | Captura dos gestos; Simulação de cenários mais desafiadores. | 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). |
| c) | Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device (27). | Construção de um Simulador de Voo com componentes encontrados no mercado. | Desenvolvimento de um simulador de alta fidelidade com componentes de baixo custo. | Criação de simuladores de alta fidelidade com componentes comerciais. | Falta de estudo com pilotos profissionais; Custo de alguns componentes. | Theoretical Issues in Ergonomics Science – Journal. |
| d) | Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Confined Platform (28). | Apresentar um algoritmo para pouso automático de um helicóptero numa plataforma móvel. | Um modelo dinâmico desenvolvido no Flightlab e validado com dados de voos de teste. | Algoritmo para pouso automático em plataformas móveis. | - Falta de dados reais de convoos de navios para teste do algoritmo de previsão de movimento; | IEEE. |
| e) | Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Virtual Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation (29). | Desenvolvimento de simulador virtual para drone quadrotor. | Criação de um simulador utilizando Unity 3D. | framework acessível e adaptável para criar simuladores realistas de UAVs. | Falta de colisões e interação com o ambiente; Feedback apenas visual. | MDPI – Journal, Switzerland. |
| f) | Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation (30). | Fazer a modelagem dinâmica de um helicóptero para um simulador de voo. | Implementação do modelo matemático em Visual C++ e comparação com dados reais de voo. | Dados comparativos do modelo matemático e dados reais. | Complexidade computacional do modelo; Interações ambientais; | 3ª International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT) |
| g) | Neda Taymourtash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations (31). | Investigar a interação aerodinâmica entre um helicóptero e um navio. | Teste em túnel de vento com modelo físico do navio e do helicóptero em pequena escala. | Base de dados detalhada, para modelagem de simulações de pouso de helicópteros | Baixa resolução dos dados; Necessita avaliar o modelo sob condições complexas. | Aerospace Science and Technology 115. |
| h) | Ieuan Owen, et. al. (2021). The NATO generic destroyer – a shared geometry for collaborative research into modelling and simulation of shipboard helicopter launch and recovery (19). | Estudar a influência do formato das fragatas no fluxo de ar e no pouso de helicópteros no convoo. | Comparação em túnel de vento de um modelo padrão de formato de fragata com um novo modelo. | Dados a respeito da interação dinâmica entre helicóptero e navio. | Simulador depende de recursos computacionais intensivos; Não integração com dados de voo reais. | Ocean Engineering 228. |
| i) | Aláez, D. et al. (2022) HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane (32). | Desenvolver de um simulador usado para treinar pilotos do drone Marvin UAV VTOL. | Incorporação do modelo do drone junto com seus parâmetros físicos no X-Plane. | Solução completa alternativa ao simulador comercial do Marvin. | Dependência de dados do UAV Marvin; Eficácia do treinamento. | MDPI – Journal, Switzerland. |
| j) | Yanting Huang, et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint (33). | Método para pouso de aeronave não tripulada em convoo de navio. | Análise visual do convoo e aplicação de algoritmo de previsão de movimento. | Método para pouso automático em plataformas móveis. | Ausência de validação prática; Limitação em simular condições de mar severas. | IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems. |
| k) | Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter (34). | Estudo da estabilidade do rotor principal para helicópteros de alta velocidade. | Análise em túnel de vento do modelo matemático. | Modelo detalhado para desenvolvimento de helicópteros de alta velocidade. | Complexidade do modelo exigindo alto poder computacional. | 5th International Conference on Control and Robotics (ICCR). |
| l) | Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions (35). | Uso de RA para auxiliar o pouso de helicóptero em convoo de navio em movimento. | Modelo de análise e previsão da posição do navio e uso de RA apresentando ao piloto a melhor janela para pouso. | Ferramenta e método para auxiliar a tomada de decisão do piloto no pouso de helicóptero. | Ausência de pilotos experientes; Simulações simplificadas do ambiente, helicóptero e navio. | Nature science jornal. |
| m) | Weihan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart latform (36). | Apresentar um modelo matemático para a simular a dinâmica de pouso de um helicóptero num navio. | Modelo para controle do helideck ativo e da dinâmica de colisão de pouso do helicóptero. | Helideck com superfície horizontal contínua; Modelo cinemático do movimento do navio. | Dependência de simulações para validar os modelos; Simulação limitada de condições severas (vento e mar). | Ocean Engineering 297. |

3.2 Análise dos trabalhos relacionados

Nesta seção, será apresentado um breve resumo de cada trabalho relacionado, destacando seus objetivos, contribuições, limitações e lacunas. Essa análise permitiu identificar áreas onde esta pesquisa pode contribuir cientificamente para o campo da simulação de aeronaves, especialmente no contexto militar. Os resumos visam contextualizar o estado da arte e evidenciar como este trabalho se posiciona em relação às iniciativas existentes, reforçando sua relevância e potencial impacto na área.

- a) Villacís et al. (25) descreve o desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo, utilizando uma abordagem de sistemas ciberfísicos (CPS) e design mecatrônico. O objetivo principal foi criar um sistema integrado para o treinamento de pilotos, aprimorando habilidades de controle de aeronaves. Para isso, uma *plataforma inercial de Stewart* com três graus de liberdade foi desenvolvida, incorporando atuadores mecânicos, controle eletrônico e software baseado no motor *Unity 3D* (37). A metodologia incluiu o uso de *Extreme Programming* para garantir qualidade no software e validações realizadas com pilotos profissionais que utilizam o *Microsoft Flight Simulator* como referência.

O artigo contribui ao apresentar uma integração bem-sucedida entre uma plataforma física e um ambiente de simulação virtual, utilizando tecnologias acessíveis para simulação de voo em tempo real. Uma das limitações identificadas é o uso de uma plataforma com apenas três graus de liberdade, que pode restringir a fidelidade do movimento em cenários mais complexos. Além disso, o estudo destaca a necessidade de expandir testes quantitativos e aprofundar análises sobre a eficácia do simulador no treinamento. Uma lacuna a ser explorada é a aplicação dessa abordagem para outros tipos de aeronaves ou condições de voo, como operações em ambientes marítimos ou situações de emergência.

- b) Doneda et al. (26) apresenta uma solução de baixo custo para otimizar o treinamento dos militares responsáveis pela sinalização durante o pouso de helicópteros em navios de guerra da Marinha do Brasil, integrando tecnologias de Realidade Virtual (RV) e Aprendizado de Máquina (AM). O objetivo foi desenvolver uma simulação de sinalização visual de helicópteros, replicando cenários operacionais reais para melhorar o desempenho desses militares. A abordagem envolveu a criação de um ambiente virtual detalhado, modelado com ferramentas de *RV*, complementado por algoritmos de *AM* para avaliar e personalizar o treinamento. A implementação incluiu testes práticos com pessoal militar para validar a eficácia da simulação.

O estudo oferece uma contribuição significativa ao propor a integração de *RV* e *AM* como ferramentas acessíveis para treinamento militar, evidenciando melhorias na retenção de conhecimento e resposta em cenários simulados. Contudo, as limitações

incluem a necessidade de maior refinamento na interação homem-máquina e na precisão dos algoritmos de *AM* para prever erros. Além disso, há lacunas no estudo, como a avaliação a longo prazo do impacto da solução no desempenho operacional e a extensão da aplicação para outros tipos de aeronaves ou contextos navais mais desafiadores.

- c) Lung-Nan Wu (27) apresenta o desenvolvimento de um dispositivo de treinamento de simulação de voo (*FSTD*) de baixo custo e alta fidelidade, baseado em uma réplica do *cockpit* da aeronave *Beech 1900C*. O objetivo principal foi criar uma solução acessível para treinar pilotos e realizar pesquisas acadêmicas na área de aviação. A metodologia envolveu a construção de um *cockpit* em escala real com instrumentação funcional, um sistema de controle de voo com *feedback* de força e um sistema de projeção visual de três canais. O núcleo computacional foi desenvolvido com o software de simulação *X-Plane* (38) e suportado por um *cluster* de computadores conectados em rede local, integrado a módulos personalizados e placas controladoras *Arduino*.

A principal contribuição do estudo está na viabilidade de desenvolver simuladores de alta fidelidade com componentes comerciais (*COTS*), reduzindo os custos e o tempo de desenvolvimento. O uso do *X-Plane* (38) permitiu simulações aerodinâmicas precisas, especialmente em condições críticas de voo. Contudo, limitações incluem a ausência de uma plataforma de movimento e o alto custo relativo de alguns componentes, como o sistema de projeção visual. Lacunas incluem a falta de avaliação extensiva com pilotos e a possibilidade de aplicar a metodologia a outros tipos de aeronaves ou contextos operacionais, como missões navais.

- d) Sebastian Topczewski et. al. (28) apresenta o desenvolvimento e teste de um sistema de controle automático para pouso de helicópteros em plataformas confinadas e móveis, como o convés de um navio. O objetivo foi criar um sistema eficiente que integre controle automático e algoritmos de previsão do movimento da plataforma, minimizando riscos em operações complexas. Utilizando o ambiente *FLIGHTLAB* para modelagem dinâmica do helicóptero e do navio, o método de controle *Linear Quadratic Regulator (LQR)* foi implementado e validado com dados de voo reais. O sistema prevê o movimento da plataforma utilizando um algoritmo autoregressivo e realiza a aproximação, o *hover* e o pouso final de forma automatizada.

Este trabalho contribui ao propor uma solução integrada que combina previsão de movimento e controle automático em tempo real, destacando sua eficácia em condições ambientais adversas, como vento forte e mar agitado. Uma limitação é a dependência de sensores de alta precisão e de dados detalhados de movimento do convés, o que pode dificultar a implementação prática em plataformas operacionais. Além disso, lacunas incluem a avaliação com pilotos em simuladores e testes reais para validar a aceitação e a eficácia do sistema.

- e) Mora-Soto et al. (29) apresenta um *framework* para construção de simuladores virtuais realistas de veículos aéreos não tripulados (*UAVs*) para teleoperação humana, utilizando um quadrotor como caso de estudo. O objetivo foi criar um simulador que combina realismo dinâmico, interatividade humana e ambiente virtual detalhado. O método empregado incluiu modelagem detalhada do quadrotor, simulação dinâmica na *Unity 3D* (37) e integração de um algoritmo de teleoperação ajustado por otimização metaheurística. A simulação foi ajustada com base em dados reais de voo para garantir maior fidelidade às condições do mundo real.

O artigo contribui ao oferecer um *framework* acessível e adaptável para criar simuladores realistas de *UAVs*, enfatizando a integração de um modelo dinâmico detalhado e um ambiente 3D interativo. Uma das limitações é que a simulação não aborda colisões realistas ou interações detalhadas com o ambiente, restringindo a aplicabilidade em cenários mais complexos. Além disso, o sistema de feedback para o usuário é limitado à visualização, sem incluir respostas táteis ou auditivas. Uma lacuna importante é a falta de testes extensivos para avaliar a eficácia no treinamento de operadores humanos em condições variadas.

- f) Wei Wang et. al. (30) aborda a modelagem dinâmica e o desenvolvimento de sistemas para simulação de voo de helicópteros, com foco em criar um ambiente de simulação que replica com precisão os comportamentos físicos e aerodinâmicos do helicóptero. O objetivo foi desenvolver um modelo matemático abrangente que incluísse forças, momentos e características de voo em cenários como *hovering* e manobras em tempo real. A metodologia incluiu o uso de algoritmos genéticos híbridos para ajuste de parâmetros e integração de bibliotecas matemáticas avançadas em um módulo de visualização para simulações em tempo real.

O artigo contribui significativamente ao propor uma abordagem robusta para modelagem e simulação de helicópteros, incorporando algoritmos avançados para melhorar a precisão. As limitações incluem a complexidade computacional do modelo, que pode restringir sua aplicabilidade a sistemas com alta capacidade de processamento. Além disso, o estudo carece de validação prática com pilotos em ambientes operacionais e não explora detalhadamente interações ambientais adversas, como vento ou turbulência, que são essenciais para simulações marítimas.

- g) Neda Taymourtash et. al. (31) investiga a interação aerodinâmica entre um modelo de helicóptero e um modelo de fragata simplificada durante operações de pouso em convés. Foram realizadas campanhas experimentais em túnel de vento, inicialmente para caracterizar o escoamento sobre o convés do navio em diferentes condições de vento, seguidas de testes com o helicóptero em trajetórias de aproximação e pouso. As medições incluíram forças e momentos no rotor, além de levantamentos de velocidade usando Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV*). Um modelo

de distorção de fluxo foi desenvolvido para representar os efeitos do escoamento no desempenho do rotor durante as manobras de pouso.

O trabalho contribui com uma base de dados experimental detalhada, adequada para modelagem de simulações de alta fidelidade em operações de pouso de helicópteros em conveses de navios. A inclusão de medições em escala maior que outros estudos da literatura é um destaque. Contudo, limitações incluem a resolução insuficiente para capturar efeitos de instabilidade de alta frequência, devido a restrições nos equipamentos experimentais. Lacunas incluem a necessidade de avaliar como o modelo de distorção de fluxo se comporta em condições mais dinâmicas ou complexas, como variações rápidas de vento.

- h) Ieuan Owen et. al. (19) apresenta a geometria genérica do destróier da *OTAN* (*NATO-GD*) como uma plataforma compartilhada para pesquisas colaborativas sobre a interface dinâmica helicóptero-navio. O objetivo principal foi melhorar o entendimento e a modelagem do fluxo aerodinâmico (*airwake*) em torno do convés de pouso, considerando o movimento do navio. Foram utilizados estudos experimentais em túnel de vento, simulações com Dinâmica dos Fluidos Computacional (*CFD*) e dados de modelos dinâmicos de helicópteros. O NATO-GD foi projetado para representar destróieres modernos, com foco em cenários realistas de movimento do navio, permitindo testes de validação e desenvolvimento de metodologias de simulação.

A principal contribuição do estudo é fornecer uma plataforma comum para validar e comparar métodos de modelagem do *airwake* e seu impacto na operação de helicópteros. A introdução do NATO-GD representa um avanço em relação ao modelo anterior (*Simple Frigate Shape*) por incorporar características de navios modernos e movimentos realistas. Contudo, limitações incluem a dependência de recursos computacionais intensivos para simulações *CFD* complexas e a ausência de integração prática com dados de voo reais em ambientes operacionais. Lacunas incluem a exploração limitada de como a interação dinâmica afeta o desempenho do piloto durante o pouso em condições extremas.

- i) Aláez, D. et al. (32) descreve o desenvolvimento de um simulador de voo *hardware-in-the-loop* (*HIL*) para treinar pilotos de *UAVs VTOL* (decolagem e pouso vertical), utilizando o software *X-Plane* (38) e o controlador de voo *Veronte Autopilot*. O objetivo foi criar um ambiente de simulação realista que incluía condições complexas, como efeitos do vento, efeito solo e falhas simuladas. Para isso, foram desenvolvidos *plugins* customizados que integram dados meteorológicos em tempo real e cálculos aerodinâmicos baseados em simulações *CFD*. O simulador foi validado em testes práticos, replicando cenários reais de voo do *UAV Marvin*.

A contribuição principal é a criação de um sistema de treinamento robusto que combina simulação de alta fidelidade com integração de hardware, permitindo que pilotos treinem em um ambiente seguro e econômico. As limitações incluem a dependência de dados específicos do UAV Marvin e a complexidade de expandir o simulador para outras configurações de aeronaves. Além disso, há lacunas na avaliação da eficácia do treinamento com operadores humanos em termos de retenção de habilidades e desempenho em situações operacionais reais.

- j) Yanting Huang et al. (33) propõe um controle baseado em visão para pouso autônomo de helicópteros não tripulados em navios em movimento, respeitando restrições de visibilidade. O objetivo foi desenvolver um controlador robusto que utilize apenas sensores visuais e inerciais, dispensando medições de velocidade linear relativa. O método incluiu um preditor de movimento do navio baseado em um modelo autorregressivo (AR), controle deslizante robusto para acompanhar alvos visuais, e redes neurais modificadas para estimar incertezas dinâmicas. Simulações em *MATLAB* (39) demonstraram a eficácia do sistema em cenários com diferentes níveis de perturbações externas.

O trabalho contribui ao introduzir um controle adaptativo de pouso que não requer medições diretas de velocidade linear, ao mesmo tempo em que lida com perturbações externas e restrições de visibilidade. Limitações incluem a ausência de validação prática com sistemas reais e a dependência de simulações para avaliar o desempenho. Além disso, lacunas incluem a necessidade de estender o modelo para condições marítimas mais severas e validar o impacto da predição do movimento do navio em situações reais.

- k) Xinfan Yin et al. (34) apresenta um modelo analítico de aerodinâmica de rotor não estacionário para helicópteros híbridos compostos de alta velocidade. O objetivo foi criar um modelo que represente com precisão as características não lineares e variáveis no tempo desses helicópteros. Baseando-se na teoria do elemento de pá, o modelo foi derivado utilizando transformações vetoriais para calcular as velocidades relativas dos elementos das pás e os esforços aerodinâmicos correspondentes. O modelo foi validado por meio de simulações numéricas no *Simulink* do *Matlab* (39) e experimentos em túnel de vento no centro de pesquisa aerodinâmica da China, com resultados indicando alta consistência e confiabilidade entre os métodos.

O estudo contribui significativamente ao fornecer um modelo detalhado e validado para análise e desenvolvimento de estratégias de controle para helicópteros híbridos compostos. Contudo, limitações incluem a ausência de testes com sistemas completos em ambientes operacionais e a complexidade do modelo, que requer alto poder computacional. Além disso, lacunas no estudo incluem a aplicação prática em

condições mais dinâmicas, como operações de voo próximas ao solo ou em ambientes marítimos com ventos variáveis.

- l) Mathieu Thomas et. al. (35) investigou a percepção de “*deck-landing-ability*” (capacidade de pouso em convés) por participantes sem experiência em pilotagem, com e sem o uso de uma interface de Realidade Aumentada (*AR*) projetada para melhorar a segurança em pousos de helicópteros em navios. O objetivo foi desenvolver uma visualização que facilitasse decisões sobre quando tentar ou abortar o pouso, considerando janelas de segurança baseadas na velocidade de toque no convés. O método incluiu simulações com helicópteros virtuais operados em um laptop, variando configurações como altitude inicial e parâmetros de oscilação do navio, com análises do impacto da *AR* no desempenho e na percepção das condições seguras de pouso.

O estudo demonstrou que a interface de *AR* reduziu significativamente tentativas de pouso em condições inseguras e melhorou o timing de pousos dentro das janelas seguras. A pesquisa contribui para o entendimento de como interfaces baseadas em affordances podem melhorar a segurança em manobras críticas. Limitações incluem a ausência de pilotos experientes nos testes e o uso de simulações simplificadas em vez de ambientes de treinamento mais imersivos. Lacunas incluem a falta de integração de modelos dinâmicos mais detalhados para o helicóptero e o navio e a aplicação prática do sistema em simuladores de voo reais.

- m) Weihan Qiu et. al. (36) propõe o uso de um helideck ativo baseado na plataforma de *Stewart* para operações de pouso de helicópteros em navios, abordando os desafios associados ao movimento irregular do navio e ao impacto do pouso. O objetivo foi desenvolver modelos dinâmicos e cinemáticos que minimizem as forças instantâneas máximas atuantes (*MIAF*) nas pernas da plataforma durante o pouso. A metodologia envolveu a aplicação da equação de Lagrange, do princípio do trabalho virtual e de um modelo de amortecimento com mola linear para modelar o impacto do pouso. Simulações numéricas validadas com software demonstraram a eficácia dos modelos propostos, incluindo estratégias de planejamento de trajetória para reduzir a velocidade relativa no momento do pouso.

O artigo oferece contribuições significativas ao apresentar um modelo matemático abrangente para helidecks ativos e uma abordagem inovadora para planejar a trajetória da plataforma superior, reduzindo as forças de impacto em até 49,3%. Uma limitação importante é a dependência de simulações para validar os modelos, sem protótipos físicos ou testes práticos em condições marítimas reais. Além disso, lacunas incluem a necessidade de avaliar o desempenho em operações com variabilidade ambiental extrema, como condições severas de vento e mar.

3.3 Resumo das Limitações e lacunas científicas encontradas

Nesta seção serão abordadas as principais limitações e lacunas encontradas nos trabalhos relacionados, observando sempre o foco da pesquisa que é o pouso de um helicóptero no convoo de um navio em movimento. As limitações e lacunas que não estão relacionadas com o foco da pesquisa foram desconsideradas.

3.3.1 Tipo de simulador utilizado

Podemos classificar em quatro tipos os simuladores utilizados pelos pesquisadores nos trabalhos relacionados:

1. **Software comercial:** São simuladores prontos, disponíveis para compra em lojas online. Esses simuladores variam em grau de realismo, desde modelos voltados para entretenimento até ferramentas robustas utilizadas na indústria aeronáutica. Também conhecidos como “soluções de prateleira” permitem que o pesquisador escolha a opção mais adequada à sua pesquisa dentre várias alternativas. Os simuladores comerciais mais utilizados nos trabalhos relacionados incluem o *X-Plane* (o mais utilizado), *Microsoft Flight Simulator* e *FLIGHTLAB*.

- Vantagens: Ferramentas prontas para uso, sem necessidade de desenvolvimento adicional;
- Desvantagens: Geralmente oferecem pouca ou nenhuma flexibilidade de customização, podendo não atender a requisitos específicos de pesquisa.

2. **Customizado:** Um simulador customizado é uma ferramenta desenvolvida sob medida para atender a requisitos específicos de simulação, permitindo a implementação de funcionalidades personalizadas que não seriam possíveis ou facilmente adaptáveis em simuladores comerciais. Esses simuladores são criados utilizando plataformas de desenvolvimento flexíveis, como motores de jogos (*game engines*), que oferecem liberdade para modelar sistemas, criar ambientes virtuais e programar comportamentos conforme as necessidades do estudo ou aplicação. Como exemplo de *game engines* temos a *Unreal*, *Godot* e *Unity3D*. Entre elas, a *Unity3D* (37) foi a mais utilizada nos trabalhos relacionados que optaram por essa solução.

O desenvolvimento de simuladores próprios permite implementar funcionalidades específicas de acordo com os objetivos da pesquisa, proporcionando maior flexibilidade e controle. No entanto, essa abordagem exige conhecimento técnico especializado e pode demandar um tempo considerável de desenvolvimento.

- Vantagens: Altamente personalizável, permitindo atender a requisitos específicos; e

- Desvantagens: Necessita de habilidades avançadas em desenvolvimento e pode levar mais tempo até estar funcional.
3. **Physical Flight Simulator (PFS):** São dispositivos de treinamento que replicam a experiência de pilotar uma aeronave em um *cockpit* e ambiente virtual idênticos ao real. Esses simuladores incluem uma cabine de comando física, controles realistas, e sistemas que reproduzem com precisão os movimentos, sons e outros aspectos do voo.
- Vantagens: Representam o estado da arte em simulação, sendo a solução mais completa utilizada para treinamento profissional; e
 - Desvantagens: Alto custo, grande necessidade de espaço físico, e limitações de customização, pois modificações geralmente só podem ser realizadas pelo fabricante.

Alternativamente, a construção de *cockpits* customizados usando equipamentos disponíveis no mercado é uma possibilidade, como demonstrado por Lung-Nan Wu (27). Contudo, essa abordagem, embora menos custosa, ainda requer investimentos financeiros consideráveis e conhecimentos específicos em áreas como eletrônica e automação.

4. **Modelo físico em escala reduzida:** Consistem em representações simplificadas e em escala reduzida de aeronaves, frequentemente utilizadas em estudos de aerodinâmica em túneis de vento ou hidrodinâmica e estabilidade para o caso de navios. Esses modelos são mais adequados para análises relacionadas ao design e desenvolvimento de projetos de engenharia, não sendo aplicáveis para o treinamento de pilotos, que é o foco desta pesquisa.

Dado o foco desta pesquisa no pouso em convoo de navios em movimento, uma operação com diversas particularidades, e considerando as limitações das soluções comerciais para atender a essas especificidades, optou-se pelo desenvolvimento de um simulador próprio, customizado. A plataforma escolhida para implementar o software de simulação foi a *Unity* (37), devido à sua flexibilidade, sendo capaz de atender às necessidades específicas do estudo. Além disso, a *Unity* foi a mais utilizada nos trabalhos relacionados que também adotaram soluções customizadas. Alinhando-se à proposta deste estudo de desenvolver um simulador de baixo custo, a escolha da *Unity* reforça essa abordagem, já que a plataforma é gratuita e acessível para projetos de pesquisa.

3.3.2 Modelo físico do helicóptero e navio

3.3.2.1 Modelo do helicóptero

Com base nos artigos analisados, os métodos para modelagem da física que governa as aeronaves podem ser classificados em três abordagens principais:

- **Modelagem Física Completa:** Alguns estudos desenvolveram modelos dinâmicos detalhados da física da aeronave, baseados em equações diferenciais e princípios fundamentais, como a equação de Lagrange, o princípio do trabalho virtual e modelos de amortecimento e rigidez. Esses modelos foram calibrados com dados reais ou validados por simulações específicas, permitindo uma representação precisa das interações aerodinâmicas e dinâmicas. Exemplos incluem o artigo sobre o helideck ativo baseado na plataforma de Stewart (36), que utilizou modelagem matemática detalhada para capturar as forças e movimentos durante o pouso, e o trabalho sobre a modelagem aerodinâmica de helicópteros híbridos de alta velocidade (34), que derivou modelos a partir da teoria do elemento de pá para analisar comportamentos não estacionários;
- **Utilização de simuladores comerciais com aeronaves customizadas:** Outros artigos empregaram simuladores comerciais, como o *X-Plane* (38), para simular o comportamento das aeronaves. Nesses casos, os pesquisadores ajustaram parâmetros específicos do modelo da aeronave para corresponder às condições reais de operação. Essa abordagem é útil para reduzir o esforço de desenvolvimento, mas pode limitar a flexibilidade e a fidelidade em situações altamente específicas. Por exemplo, o estudo sobre o HIL para UAVs VTOL (32) utilizou o *X-Plane* como núcleo do simulador, adicionando módulos personalizados para representar efeitos como vento e interação com o solo; e
- **Uso de modelos de aeronave prontos dos simuladores comerciais:** Uma abordagem mais simplificada foi a utilização direta de modelos prontos disponíveis em simuladores comerciais, sem modificações ou calibrações significativas. Essa estratégia foi vista em trabalhos focados mais na interface ou na interação entre sistemas, como a pesquisa sobre a sinalização visual para pouso com Realidade Aumentada, onde os modelos das aeronaves eram ferramentas para validar a eficácia das interfaces visuais e não o foco principal do estudo.

Em resumo, os métodos variaram entre modelagem física detalhada, calibração de parâmetros em simuladores e o uso direto de modelos prontos, dependendo do foco e dos objetivos de cada estudo.

Para o desenvolvimento do simulador customizado desta pesquisa, optou-se pela utilização da *Blade Element Theory (BET)* (4). Nesse modelo, as superfícies ae-

rodinâmicas da aeronave, são subdivididas em elementos discretos, sobre os quais as forças aerodinâmicas são calculadas individualmente. Este princípio também foi aplicado para determinar o arrasto e as forças resultantes da pressão do vento sobre a fuselagem, dividindo-a em elementos para calcular os esforços em cada região.

Como referência para o estado da arte, o software comercial *FLIGHTLAB* é amplamente utilizado na indústria aeronáutica e se destaca por incorporar modelagem avançada com alta fidelidade. De acordo com sua descrição oficial, é um pacote de software baseado em elementos finitos para modelagem e simulação de aeronaves de asa rotativa, asa fixa, multirotores e configurações experimentais (40). Apesar de ser uma solução robusta, a complexidade técnica e o custo elevado (licença do software acima de 100 mil dólares) tornam sua aplicação restrita a um público específico.

No contexto desta pesquisa, buscou-se uma modelagem que equilibre realismo dinâmico com simplicidade e facilidade de implementação. A metodologia proposta, baseada na BET (4), é compatível com os objetivos de baixo custo e acessibilidade, garantindo que os resultados sejam adequados para os objetivos para uma simulação realista.

3.3.2.2 Modelo do navio

Entre os trabalhos analisados que abordaram o movimento do navio e o pouso em convoo, destacam-se duas categorias principais:

- Simuladores customizados:
 - Weihan Qiu, et. al. (36) que utilizou um simulador customizado para modelar a interação entre o navio e o helideck ativo. A modelagem física do movimento do navio foi baseada em equações dinâmicas derivadas do sistema de coordenadas não inercial e no uso do operador de amplitude de resposta (*RAO*, *Response Amplitude Operator*). A dinâmica do navio foi incorporada ao modelo como entradas para os movimentos oscilatórios do convés, simulando condições marítimas complexas. O sistema foi calibrado com espectros de ondas reais para simular o comportamento do navio em estados de mar moderados. A abordagem permitiu uma integração precisa dos movimentos do navio com a plataforma ativa e os impactos resultantes no pouso de helicópteros; e
 - Neda Taymourtash, et. al. (31) que utilizou modelagem aerodinâmica detalhada para capturar os efeitos do escoamento de ar sobre o convés de um modelo simplificado de fragata. Os movimentos do navio foram representados em um ambiente controlado de túnel de vento, com oscilações prescritas no convés para replicar os movimentos típicos em condições marítimas. Embora simplificado, o estudo forneceu dados experimentais valiosos para validar modelos de interação helicóptero-navio.

- Simuladores comerciais:
 - Ieuan Owen, et. al. (19) que empregou um simulador comercial integrado a CFD para modelar os efeitos aerodinâmicos do fluxo de ar ao redor do navio (airwake). Os movimentos do navio foram simplificados e controlados pelos parâmetros do simulador, que incluíam oscilações pré-programadas ou ajustadas para replicar estados de mar específicos. Não houve modelagem física direta dos movimentos do navio no nível detalhado, sendo a ênfase nas interações aerodinâmicas.

Embora o estudo de Weihan Qiu, et. al. (36) tenha apresentado uma modelagem mais detalhada das ondas do mar, nenhum dos trabalhos analisados modelou com precisão as forças físicas atuantes no navio, optando por simplificações como movimentos oscilatórios derivados de equações. Essas simplificações, embora adequadas para alguns cenários, podem não capturar a complexidade da interação entre o navio e as ondas do oceano.

Para atingir o resultado esperado, esta pesquisa utilizou para modelar o comportamento físico do navio, o mesmo princípio do modelo BET, que consiste na subdivisão do casco em pequenos elementos, e em cada um deles aplicar a força de empuxo gerada pela pressão hidrostática, força de pressão hidrodinâmica e força de arrasto por fricção na superfície, com cada elemento do casco interagindo com o modelo matemático criado para descrever as ondas do mar. Modelo este que foi descrito mais detalhadamente na Seção 4.2.2.1 encontrada mais adiante.

Nesta pesquisa, para modelar o comportamento físico do navio, adotou-se uma abordagem baseada na subdivisão do casco em elementos discretos, similar à BET (4). Para cada elemento, foram calculadas forças de empuxo, pressão hidrodinâmica e arrasto por fricção, que interagem com o modelo matemático das ondas, conforme descrito detalhadamente nas Seções 4.2.2.1 e 4.3.2. Essa abordagem busca representar de maneira mais realista a interação dinâmica entre o navio e o ambiente marítimo.

3.3.3 Utilização de pilotos militares experientes

A validação de estudos envolvendo simuladores de voo requer a participação de pilotos experientes, cuja expertise é fundamental para avaliar a fidelidade e aplicabilidade desses dispositivos de treinamento em cenários reais. A opinião desses profissionais permite identificar inconsistências, validar os modelos implementados e assegurar que as simulações ofereçam um nível de realismo adequado às exigências operacionais. Além disso, a inclusão de pilotos experientes em testes contribui para uma avaliação mais prática do impacto das simulações no treinamento e na segurança.

Entre os artigos analisados, alguns se destacaram pela integração de pilotos em seus experimentos. O estudo feito por Aláez, D. et al. (32) incluiu pilotos em testes práticos, focando na validação da usabilidade do sistema em cenários operacionais complexos. A experiência dos operadores permitiu ajustar parâmetros do simulador, garantindo maior aderência às condições reais de voo. De forma semelhante Antônio Doneda, et. al. (10) avaliou a eficácia da interface visual com os militares responsáveis pela sinalização que possuem treinamento especializado, como forma de validar o estudo.

Por outro lado, vários trabalhos apresentaram lacunas importantes devido à ausência de pilotos experientes na validação. O estudo de Weihan Qiu, et. al. (36) sobre helidecks ativos baseados na plataforma de Stewart e o trabalho de Xinfan Yin, et al. (34) sobre aerodinâmica de helicópteros híbridos de alta velocidade, limitaram-se a simulações e validações experimentais, sem incorporar testes práticos com o emprego de pilotos. Essa ausência pode representar uma limitação, pois os resultados obtidos podem não capturar adequadamente os desafios enfrentados pelo pilotos em condições reais.

A falta de participação de pilotos experientes na validação de simuladores é uma lacuna comum em vários estudos, muitas vezes devido às restrições de custo, disponibilidade de profissionais ou foco em aspectos técnicos. Contudo, a inclusão desses profissionais é essencial para avaliar a aplicabilidade prática das simulações e garantir que os modelos desenvolvidos sejam eficazes tanto para treinamento quanto para operações.

Conclui-se que a utilização de pilotos experientes nos estudos analisados é um diferencial para validar a fidelidade e aplicabilidade dos simuladores. Embora alguns trabalhos relacionados tenham conseguido utilizar pilotos na validação, outros apresentaram esta lacuna. Para esta pesquisa foram utilizados pilotos militares com experiência de pouso em convoo de navios de guerra para validação do estudo, conforme detalhado na Seção 6.2. A participação desses profissionais garantiu que o simulador atendesse aos critérios operacionais reais, oferecendo dados valiosos para avaliar a eficácia e o realismo do sistema desenvolvido.

3.3.4 Funcionalidade de pouso em convoo de navio em movimento

Entre os trabalhos relacionados, 7 apresentaram simuladores com funcionalidades específicas para pouso em decks de navios. O trabalho de Weihan Qiu, et al. (36) destacou-se por integrar um *helideck* ativo baseado na plataforma de *Stewart*, capaz de simular os movimentos oscilatórios do convés e os impactos dinâmicos no pouso. Essa abordagem proporcionou um alto nível de fidelidade, especialmente ao modelar as forças resultantes do contato com o convés. Da mesma forma, o estudo de Neda Taymourtash, et al. (31) utilizou um túnel de vento para analisar as condições aerodinâmicas em torno de um modelo simplificado de fragata, considerando oscilações prescritas no convés para replicar movimentos reais.

Por outro lado, o artigo de Ieuan Owen et al. (19) explorou a funcionalidade de pouso em decks utilizando um simulador comercial integrado a *CFD* para modelar o *airwake* ao redor do navio. Apesar de a simulação focar na interação aerodinâmica, os movimentos do navio foram representados de maneira simplificada, utilizando oscilações pré-definidas. Isso permitiu uma análise mais detalhada da interação helicóptero-navio, embora com menor fidelidade na representação do comportamento físico do navio em ambientes marítimos variáveis.

A funcionalidade de pouso em decks ou convoos de navios foi abordada sob óticas distintas, com diferentes níveis de complexidade, variando entre modelagens físicas detalhadas, simulações experimentais e simplificações em simuladores comerciais. Apesar das diferenças, esses trabalhos evidenciam a relevância de considerar as condições dinâmicas e aerodinâmicas do convés para garantir maior realismo e eficácia nos simuladores. Na presente pesquisa, o foco em operações de pouso em convoo busca integrar essas características, detalhando a modelagem do comportamento do navio e sua interação com o mar e o helicóptero.

3.3.5 Estudo da contribuição do simulador para o treinamento dos pilotos

Avaliar o impacto de um simulador no treinamento de pilotos é fundamental para validar sua eficácia como ferramenta de instrução e identificar sua contribuição no desenvolvimento das habilidades de pilotagem. Essa etapa é crucial para garantir que a tecnologia empregada no simulador tenha uma contribuição significativa para o treinamento.

Entre os trabalhos relacionados analisados, destaca-se o estudo de Doneda, et al. (10) sobre a integração de Realidade Aumentada em sinalização visual para pousos de helicópteros. Apesar do simulador neste caso não ser voltado para os pilotos, mas sim para os militares responsáveis pelas sinalizações no convoo, o trabalho investigou como a interface influenciava a segurança do pouso, destacando melhorias na tomada de decisão e mitigando possíveis riscos para o pouso.

Por outro lado, o estudo de Aláez, D. et al. (32) para UAVs VTOL incluiu testes com pilotos para avaliar a eficácia do sistema em operações reais. Os resultados demonstraram que o simulador proporcionou um ambiente seguro para experimentar condições complexas, como efeitos do vento e interação com o solo.

Entretanto, muitos artigos relevantes não realizaram estudos do impacto do simulador no treinamento. Por exemplo, o trabalho sobre *helidecks* ativos (36) e o artigo sobre a modelagem de helicópteros híbridos de alta velocidade (34) limitaram-se à validação técnica por meio de simulações e dados experimentais, sem verificar se estes sistemas poderiam contribuir com o treinamento, o que pode representar uma lacuna no estudo.

Conclui-se que, embora alguns estudos tenham considerado o impacto dos simuladores no treinamento, essa etapa foi suprimida em outros trabalhos onde sua inclusão seria pertinente. Na presente pesquisa, foi realizada uma avaliação qualitativa para medir o impacto do simulador no treinamento de pilotos. Essa avaliação foi conduzida por meio de questionários aplicados aos pilotos militares após os testes com o simulador criado, conforme detalhado no Capítulo 6, contribuindo para a validação do sistema desenvolvido.

4 O SIMULADOR DE POUSO EM CONVOO (SIMPC)

Este capítulo apresenta o **Simulador de Pouso em Convoos (SimPC)**, um protótipo de simulador de voo em realidade virtual desenvolvido como ferramenta principal desta pesquisa para o treinamento de pilotos. O SimPC foi projetado com o objetivo de proporcionar aos pilotos um ambiente de treino realista, que simule as condições desafiadoras encontradas ao realizar pousos em plataformas navais em movimento. Serão abordados os principais passos do desenvolvimento e recursos implementados, como a modelagem da física que governa o comportamento da aeronave e do navio, o ambiente (mar, céu, atmosfera, vento etc), módulo do instrutor, comunicação via rede e o hardware utilizado.

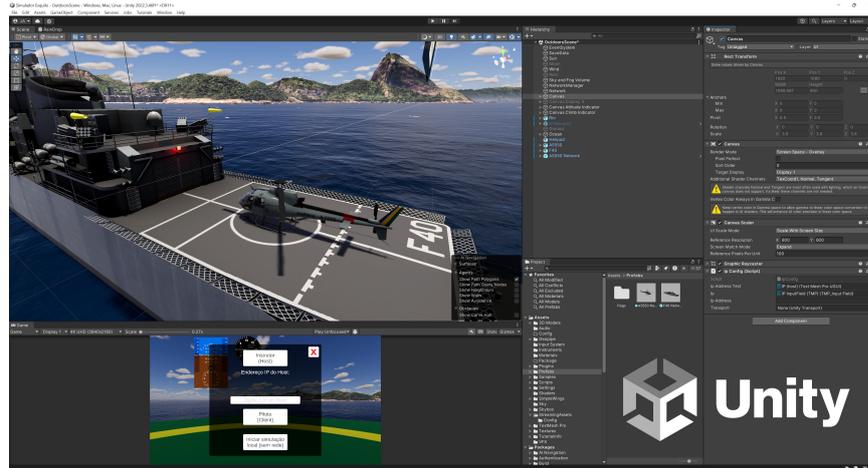
4.1 Softwares utilizados

Esta seção apresenta os principais softwares utilizados para o desenvolvimento do SimPC. A escolha dessas ferramentas foi guiada pela necessidade de manter o projeto de baixo custo, aproveitando versões gratuitas e de código aberto disponíveis: *Unity* (*freemium*), *Blender* e *Gimp* (*opensource*) e *Visual Studio* (*software* proprietário).

4.1.1 Unity

A *Unity* (37), também chamada de *Unity3D* ou *Unity Engine*, é uma plataforma de desenvolvimento para jogos (*game engine*) e conteúdos interativos em 2D e 3D. É compatível com diversas plataformas, como Windows, Linux, Android, Xbox, iOS etc. Utiliza o **C#** como principal linguagem de programação. Disponibiliza versões gratuitas e pagas, sendo utilizada para este projeto a versão 2022.3.46f1, licenciada gratuitamente por meio da *Unity Personal*.

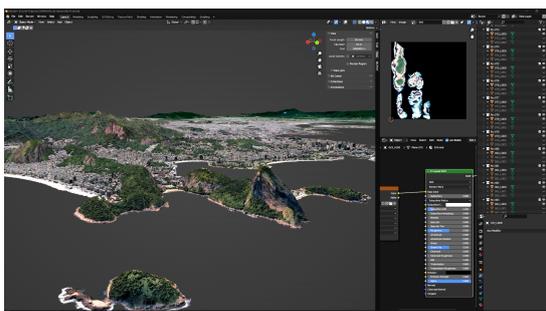
A Figura 9 mostra a interface da Unity, onde foram implementados o ambiente gráfico 3D, a física da aeronave, a comunicação via rede, a interface de configuração da simulação, a configuração dos controles (*joysticks*), os algoritmos e as demais regras de funcionamento do simulador. Como principal plataforma de desenvolvimento, a Unity centralizou a criação dos aspectos fundamentais do projeto, enquanto as demais ferramentas, apresentadas a seguir, foram utilizadas de forma complementar para as tarefas específicas de modelagem 3D, texturização e escrita do código.

Figura 9 – Interface da *Unity*.

4.1.2 Blender

O *Blender* é uma suíte gratuita e de código aberto para criação de conteúdo 3D. Ele oferece suporte a toda a *pipeline* de 3D — modelagem, *rigging*, animação, simulação, renderização, composição e rastreamento de movimento, incluindo edição de vídeo e criação de jogos (41).

Para este projeto, foi utilizada a versão 3.6.0, sendo empregada principalmente na criação dos modelos 3D do relevo da região do Rio de Janeiro, ilustrado na Figura 10a, do navio, apresentado na Figura 10b, e da aeronave, representada nas Figuras 10c e 10d, além de outros modelos menores que compõem o simulador.

(a) Interface do *Blender* e Rio em 3D

(b) F40 - Fragata Niterói



(c) Helicóptero H125 - Esquilo



(d) Helicóptero H125 - Esquilo (cabine)

Figura 10 – Interface do *Blender* e Modelos 3D presentes no SimPC

O modelo 3D da região do Rio de Janeiro foi criado com base nos dados do *Google Earth* onde as feições foram extraídas bloco a bloco utilizando o software *Render Docs* em conjunto com o navegador *Google Chrome*. Cada um dos blocos foi importado no *Blender*, passando por um processo de limpeza e simplificação de malha (*mesh*), recorte, texturização e, por fim, todos os blocos foram unidos em um mosaico em escala real.

O modelo compreende toda a região delimitada entre a Barra de Guaratiba (a oeste), Arraial do Cabo (a leste), a cidade do Rio de Janeiro (ao sul) e Petrópolis (ao norte).

Os modelos 3D do Helicóptero H125 Esquilo e da Fragata Classe Niterói foram cedidos pelo Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV) para esta pesquisa.

4.1.3 Gimp

O *Gimp* (42) é um editor de imagem multiplataforma, gratuito e de código aberto, amplamente utilizado para criar e editar texturas utilizadas em projetos na Unity. Neste projeto foi utilizada a versão 2.10.34. A Figura 11 apresenta a interface do *Gimp* com a textura do navio. Dentre outras texturas criadas e editadas para o simulador podemos citar as texturas do helicóptero, oceano, bandeiras, terreno, elementos de interface do usuário, sinalização náutica, efeitos especiais, ambiente etc.

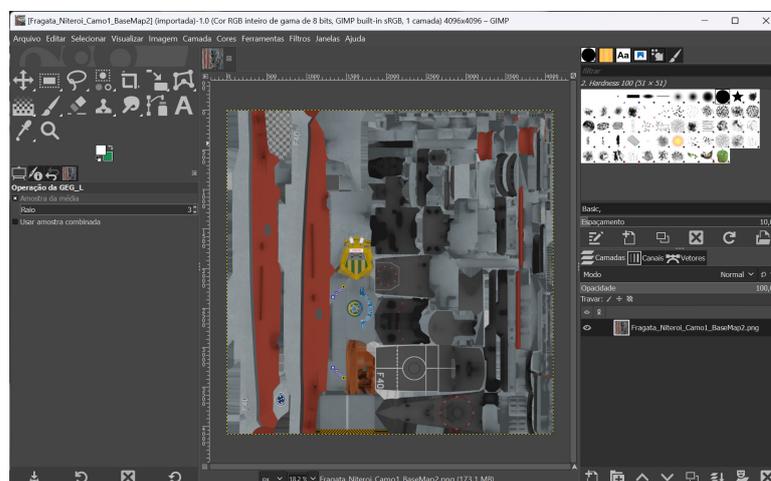


Figura 11 – Interface do *Gimp*.

4.1.4 Visual Studio

O *Microsoft Visual Studio* (43) é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), amplamente utilizado para o desenvolvimento de aplicações em diversas linguagens de programação, incluindo o **C#**, que é a linguagem usada pela Unity. Para este projeto foi utilizada a edição gratuita *Visual Studio Community 2022* Versão 17.7.4.

4.2 Modelos Físicos

Nesta seção será apresentado como foi criado o modelo físico que governa o comportamento da aeronave e do navio, bem como as forças que atuam sobre eles.

O modelo BET foi aplicado, subdividindo a aeronave e o navio em pequenas partes, onde cada uma delas recebe um conjunto específico de forças que representam os esforços exercidos pela interação dessas partes com o fluido no qual se deslocam (ar e água). A atuação conjunta dessas forças gera uma aceleração linear e angular no objeto, considerando sua massa, ou seja, seu momento de inércia e momento angular.

Com a aplicação de equações simples da Física e da Matemática, cada força se baseou em apenas duas fórmulas básicas, a segunda Lei de Newton, definida pela Equação 4.1 e a Equação do Arrasto, definida pela Equação 4.2 (6):

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}, \quad (4.1)$$

onde, \vec{F} é a força em Newtons (N), m é a massa da aeronave ou navio (kg) e \vec{a} é o vetor aceleração (m/s^2); e

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vec{v} \cdot v \cdot C_d \cdot A, \quad (4.2)$$

onde, \vec{F}_d é a força do arrasto (*drag*) em Newtons (N), ρ é a densidade ou massa específica do fluido no qual o objeto se desloca, \vec{v} é o vetor velocidade relativa entre o objeto e o fluido, v é o módulo desse vetor, C_d é o coeficiente de arrasto (determinado experimentalmente) e A é a área frontal do objeto.

4.2.1 Aeronave

A aeronave selecionada para ser modelada no SimPC foi o helicóptero H125 (Esquilo), fabricado pela *Airbus*. A escolha foi motivada pelo fato dessa aeronave ter sido recentemente adquirida para ser incorporada à frota da Marinha do Brasil, enquanto o CIAAN, órgão responsável pela formação de pilotos, ainda não dispõe de um simulador específico dedicado a esse modelo.

Em relação à aerodinâmica de um corpo, independentemente de quão complexa seja sua forma, as forças e os momentos aerodinâmicos que atuam sobre ele possuem duas origens principais (6):

- A distribuição de pressão sobre a superfície do corpo (p); e
- A distribuição de tensão de cisalhamento sobre a superfície do corpo (τ).

A Figura 12 apresenta um esboço dessas forças.

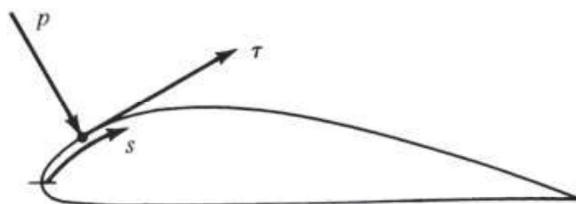
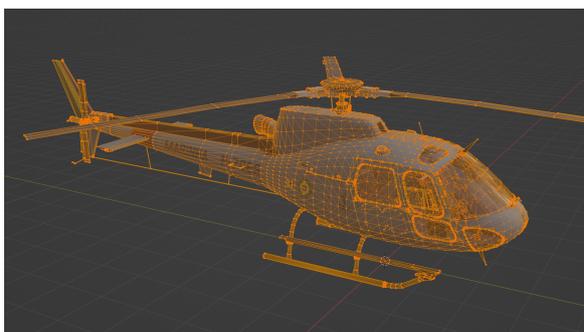


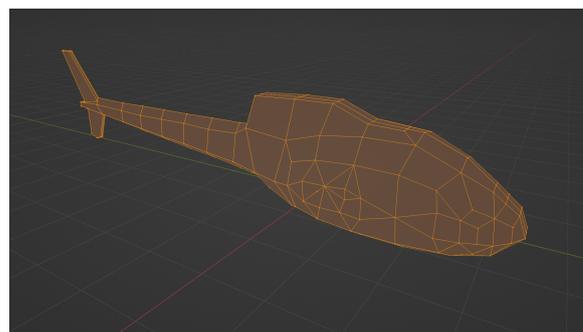
Figura 12 – Ilustração da pressão e da tensão de cisalhamento em uma superfície aerodinâmica (6).

4.2.1.1 Carenagem

O modelo 3D original da carenagem possui aproximadamente 70 mil polígonos, como pode ser visto na Figura 13a, tornando inviável, do ponto de vista computacional, aplicar forças individualmente em cada um deles. Para mitigar esse problema, foi criado no *Blender* um modelo 3D simplificado (*low poly*) com apenas 222 polígonos, ilustrado na Figura 13b, que serviu como base para a aplicação das forças necessárias.



(a) Modelo detalhado (*high poly*).



(b) Modelo simplificado (*low poly*).

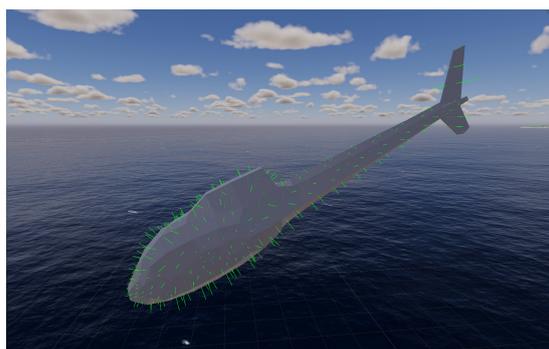
Figura 13 – Modelo 3D da carenagem da aeronave.

Esse modelo simplificado foi importado na *Unity*, onde foi desenvolvido um código em *C#* para calcular a área de cada polígono, determinar seus pontos centrais e os vetores normais a cada polígono. Na Figura 14(a), cada vetor verde representa um polígono. Em cada um dos 222 pontos centrais, foram aplicadas duas forças principais:

- a força de arrasto por pressão (\vec{F}_p) provocada pela pressão sobre a superfície; e
- a força de arrasto por fricção na superfície (\vec{F}_f) provocada pela tensão de cisalhamento.

A Figura 14(b) mostra os vetores de força de arrasto por pressão, representados em roxo. Já a Figura 14(c) ilustra em amarelo as forças de arrasto por fricção na superfície da carenagem, enquanto a aeronave se desloca para vante.

As forças aplicadas consideram a combinação do vetor que representa o vento (que será detalhado mais adiante) com o vetor velocidade de deslocamento da aeronave em cada ponto analisado.



(a) Modelo 3D simplificado da carenagem

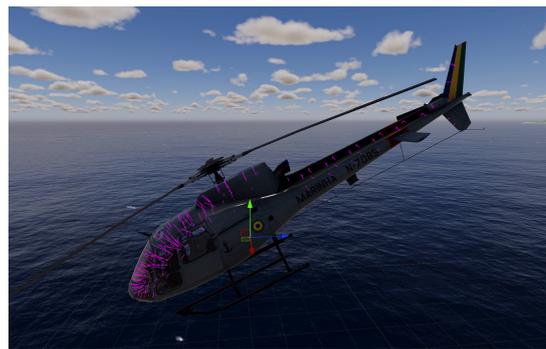
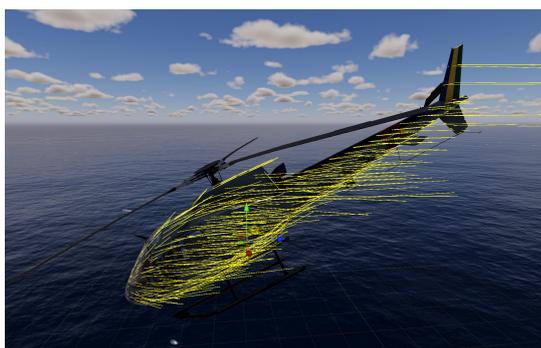
(b) Forças de arrasto por pressão (\vec{F}_p)(c) Forças de arrasto por fricção na superfície (\vec{F}_f)

Figura 14 – Forças aplicadas sobre a carenagem da aeronave

A força de arrasto por pressão atua na direção normal à superfície do ponto de aplicação, conforme apresentado na Figura 12, com sentido oposto ao deslocamento, e possui intensidade proporcional à densidade do fluido (ρ), ao vetor velocidade (\vec{v}), ao coeficiente de arrasto por pressão (C_p) e à área da superfície ou polígono (A), conforme descrito na Equação 4.2 da Força de Arrasto.

Já a força de arrasto por fricção na superfície apresenta a mesma direção do deslocamento do fluido, sendo tangente à superfície, conforme apresentado na Figura 12. Sua intensidade é calculada pela mesma Equação 4.2, porém utilizando o coeficiente de arrasto por fricção (C_f), que, por sua vez, é significativamente menor que o coeficiente de arrasto por pressão (C_p). De acordo com Anderson (6), (C_f) depende de fatores como o formato e a rugosidade da superfície. Para fins de simplificação, foi considerado $C_f = 10\%.C_p$.

A soma vetorial de todas essas forças, distribuídas nos polígonos, resulta na força aerodinâmica total e nos momentos aplicados sobre a carenagem da aeronave.

Essa abordagem possibilitou a execução dos cálculos de forma eficiente, mantendo um nível de realismo adequado para a simulação sem comprometer o desempenho do sistema.

4.2.1.2 Rotor principal

O rotor principal é o componente aerodinâmico de maior relevância em um helicóptero, sendo responsável por gerar sustentação, permitir o deslocamento e proporcionar o controle da aeronave. A modelagem física de um rotor é algo bastante complexo, pois diversas forças atuam sobre suas pás, gerando múltiplos efeitos que influenciam diretamente no comportamento dinâmico do helicóptero.

Para o desenvolvimento do SimPC, foram modeladas as duas principais forças que atuam nas pás, representadas na Figura 15a, a saber, a força de sustentação e a força de arrasto. Outros efeitos e forças, como o batimento das pás, a força centrífuga, a precessão giroscópica, a assimetria de sustentação, a torção das pás e o efeito cone, foram abstraídos do modelo. Essa decisão foi tomada de forma a atingir um bom balanço entre a fidelidade do comportamento dinâmico, a complexidade associada à modelagem desses fenômenos e o custo computacional, focando apenas nos fenômenos de maior relevância, de forma a atingir o propósito do simulador.

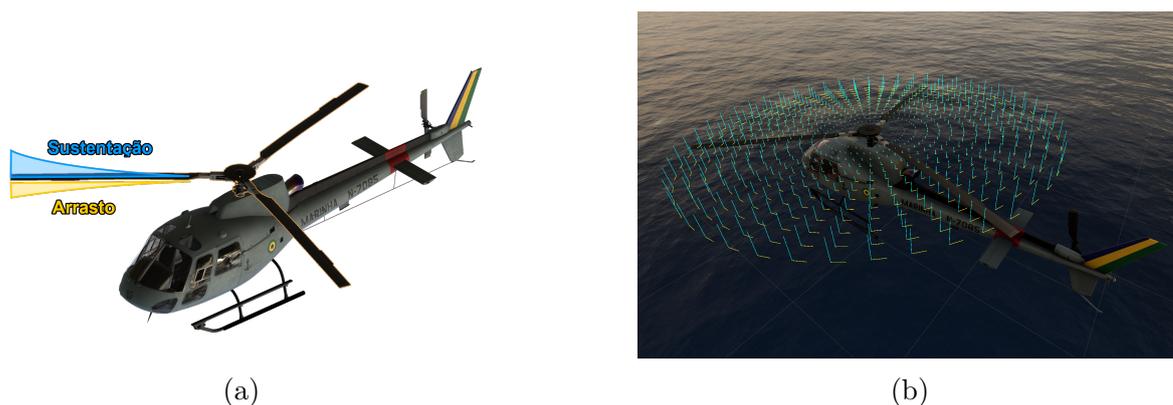


Figura 15 – Principais forças que atuam sobre as pás do rotor.

A Figura 15b apresenta os vetores que representam as forças aplicadas, no ciano as forças de sustentação e em amarelo as forças de arrasto.

Para o cálculo das forças de sustentação (*lift*) e de arrasto (*drag*), aplica-se a Equação 4.2 do arrasto, com a particularidade de que a variável A (área) corresponde à área da superfície da pá do rotor, conforme descrito por Anderson (6). A velocidade (v) com que a pá se desloca também exerce influência significativa na sustentação, variando proporcionalmente ao quadrado dessa velocidade. Na Figura 15b, observa-se que as forças de sustentação e arrasto são mais intensas nos elementos da pá localizados próximos às extremidades, devido às maiores velocidades lineares instantâneas (velocidades radiais) nessa região. Em termos práticos, pás com maior superfície de contato com o fluido e maior velocidade tendem a gerar maiores forças de sustentação e arrasto.

Os helicópteros são classificados como aeronaves de asas rotativas, pois as pás do rotor principal funcionam, essencialmente, como asas em movimento. Cada asa possui

uma seção de aerofólio (ou perfil aerodinâmico) conforme ilustrado na Figura 16a, cujas características influenciam diretamente os coeficientes de sustentação (C_l) e de arrasto (C_d).

O *National Advisory Committee for Aeronautics* (*NACA*), precursor da *NASA* e fundado em 1915, desempenhou um papel fundamental nos avanços da engenharia aeronáutica ao desenvolver uma série de perfis aerodinâmicos padronizados, amplamente conhecidos como perfis *NACA*, ilustrados na Figura 16b. Esses perfis possuem designações específicas que determinam características aerodinâmicas distintas, sendo amplamente utilizados no projeto de asas, hélices e rotores de helicópteros. Para a modelagem do helicóptero H125 Esquilo no SimPC, adotou-se o perfil aerodinâmico ***NACA-0012*** (44).

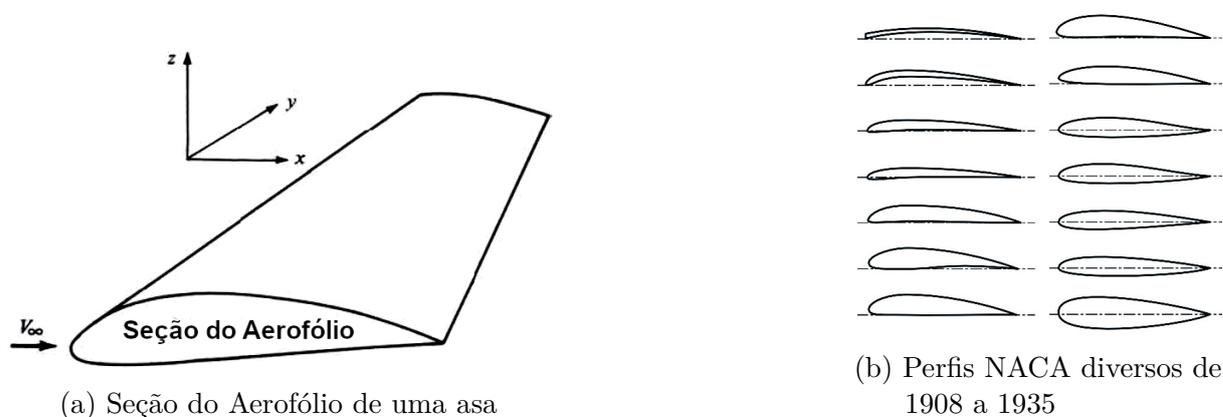


Figura 16 – Seções de Aerofólio (6).

A Figura 17a (7) apresenta o gráfico do coeficiente de sustentação (C_l) (eixo das ordenadas) em função do ângulo de ataque (α) da pá (eixo das abscissas) para o perfil aerodinâmico *NACA-0012*. Esse tipo de gráfico é obtido empiricamente por meio de ensaios em túnel de vento, onde o valor do coeficiente é medido sob diferentes condições de velocidade do fluido, turbulência e ângulo de ataque.

Observa-se que, para valores de (α) entre 0° e 12° , o coeficiente de sustentação (C_l) aumenta progressivamente até atingir um valor máximo local. Em outras palavras, nesse intervalo, ocorre um aumento na sustentação gerada pela pá. No entanto, a partir de $\alpha \approx 12^\circ$, ocorre um fenômeno conhecido como *stall* ou perda de sustentação. Segundo Anderson (6), esse efeito ocorre devido ao desprendimento das camadas limites de ar que percorrem a superfície da asa, resultando em um aumento significativo da turbulência e, conseqüentemente, na redução abrupta da sustentação.

Em um helicóptero, os controles disponíveis ao piloto permitem atuar diretamente sobre o ângulo de ataque (α) das pás do rotor, de forma a ajustar a sustentação gerada conforme a necessidade. Essa variação ocorre tipicamente dentro do intervalo de 0° a 12° , evitando, assim, a ocorrência do *stall*. Detalhes adicionais sobre os controles do piloto serão apresentados em seções subsequentes.

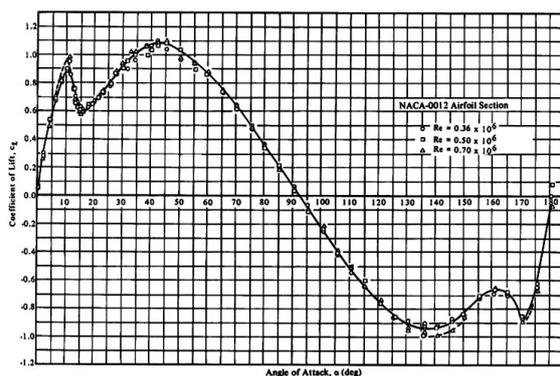
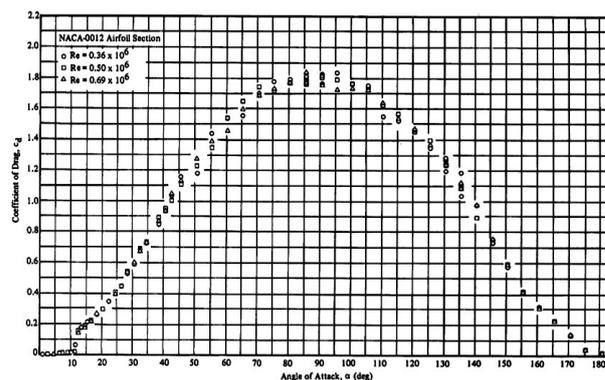
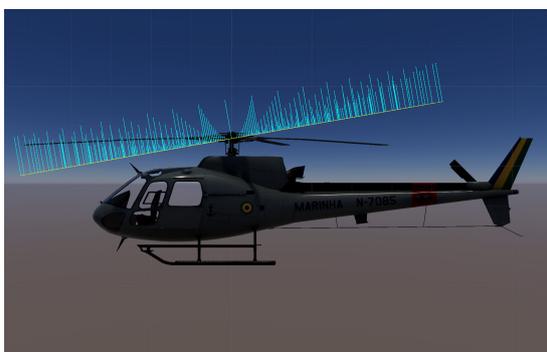
(a) Coeficiente de Sustentação C_l (b) Coeficiente de Arrasto C_d

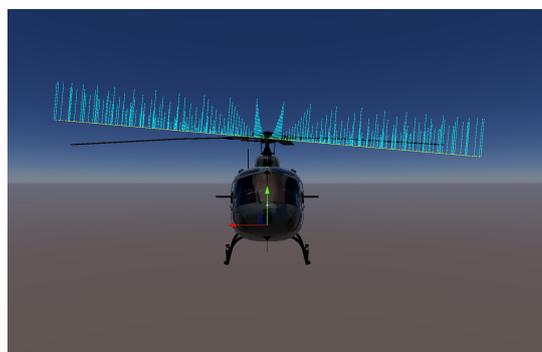
Figura 17 – Coeficientes para o perfil NACA-0012 (7).

De forma análoga, a Figura 17b apresenta o gráfico do coeficiente de arrasto (C_d) em função do ângulo de ataque (α). Nota-se que o C_d aumenta gradualmente à medida que α cresce, atingindo seu valor máximo quando $\alpha = 90^\circ$. Embora o piloto possa controlar o ângulo de ataque dentro do intervalo ideal $[0^\circ, 12^\circ]$, é importante destacar que, como a velocidade relativa entre a aeronave e o vento foi considerada e implementada no simulador, situações específicas podem levar ao *stall*. Isso pode ocorrer principalmente durante a execução de manobras abruptas, quando as pás podem momentaneamente exceder o limite de sustentação eficiente.

Outra característica implementada no SimPC foi a inclinação do mastro do rotor principal, que apresenta uma inclinação de $5,0^\circ$ para vante (frente), ilustrada na Figura 18a e de $0,5^\circ$ para bombordo (esquerda), representada na Figura 18b. As inclinações foram propositalmente exageradas nas figuras para facilitar a visualização. Esses ajustes são realizados por razões de engenharia e desempenho, relacionadas ao equilíbrio, aerodinâmica e controle da aeronave.



(a) Inclinação para vante



(b) Inclinação para bombordo

Figura 18 – Inclinação do mastro do rotor principal.

- (a) Inclinação para vante: Compensa a força de translação, uma vez que a força de sustentação não está perfeitamente alinhada com o centro de gravidade da aeronave.

Esse ajuste minimiza a necessidade de correções constantes por parte do piloto. Quanto maior a inclinação para vante, maior será a tendência da aeronave inclinar-se para frente durante o voo.

- (b) Inclinação para bombordo: Compensa o torque gerado pelo rotor principal, que tende a causar um deslizamento lateral da aeronave (*drift lateral*). Esse ajuste estabiliza a aeronave em voo pairado, equilibrando as forças laterais e garantindo um voo mais controlado e estável.

4.2.1.3 Efeito Solo

O efeito solo ocorre quando o rotor principal do helicóptero opera próximo ao solo. A massa de ar impulsionada para baixo interage com o solo, criando uma zona de alta pressão que altera o fluxo de ar, reduzindo o arrasto induzido nas pás e aumentando a força de sustentação. A Figura 19 ilustra as mudanças no fluxo de ar e como os vórtices nas pontas das pás diminuem sob a influência do efeito solo.

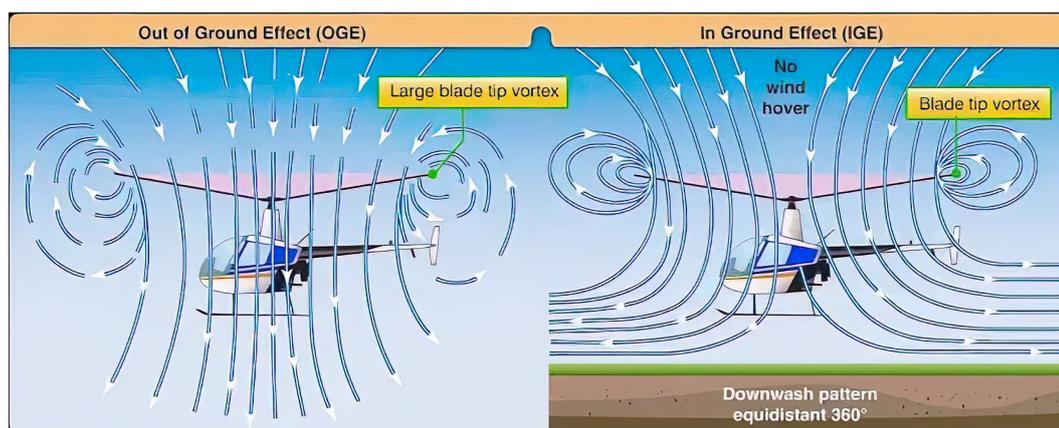


Figura 19 – Efeito Solo (8).

Esse efeito atinge sua intensidade máxima quando o plano do rotor está no ponto mais próximo ao solo e desaparece progressivamente à medida que a aeronave decola e se afasta do solo. Quando a distância do plano do rotor ao solo (Z) é maior que duas vezes o seu diâmetro (D), ou seja, $Z > 2D$, o efeito torna-se desprezível e imperceptível para o piloto (45). Em condições máximas, o efeito solo pode gerar um aumento aproximado de 30% na força de sustentação da aeronave.

A Figura 20 apresenta dados obtidos em ensaios laboratoriais realizados com diferentes tipos de rotores, submetidos a condições que simulam o efeito solo, permitindo a medição da variação na força de sustentação (9). No gráfico, o eixo X representa a razão entre a distância do rotor ao solo e o raio do rotor, enquanto o eixo Y indica a taxa de variação na força de sustentação. Esses dados demonstram a influência da proximidade do solo sobre a eficiência do rotor, evidenciando o aumento de sustentação à medida que a distância entre o rotor e o solo diminui.

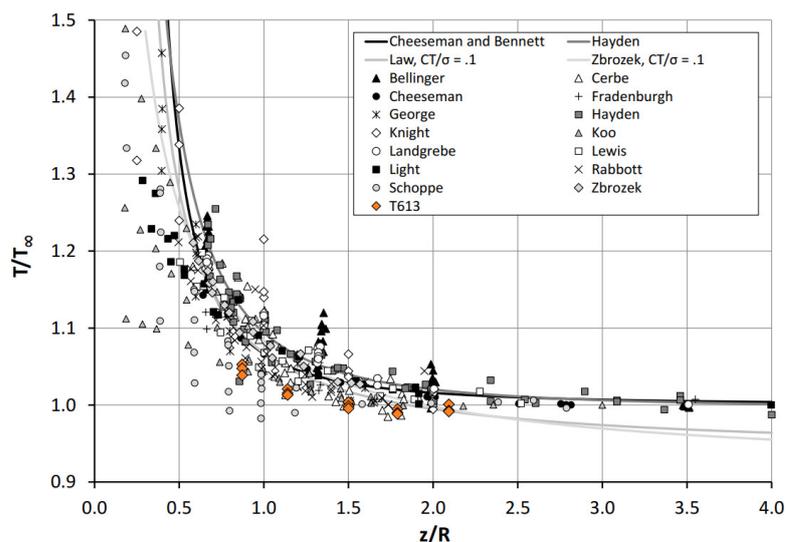


Figura 20 – Aumento da força de sustentação em função da distância do rotor ao solo para variados rotores (9).

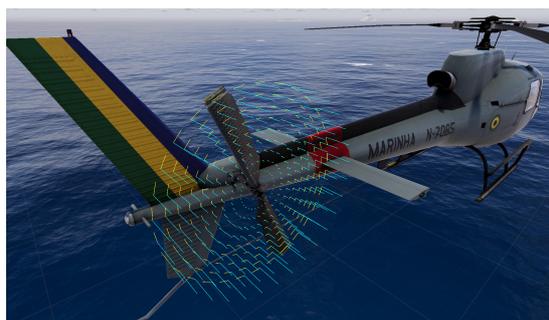
No contexto do simulador, o efeito solo foi implementado para simular o comportamento da aeronave em pousos em convoo. A simulação considera, inclusive, a transição do voo pairado (*hovering*) sobre o mar para o *hovering* sobre o convoo do navio. Essa transição resulta em um ganho adicional de sustentação devido à maior proximidade do plano do rotor em relação ao convoo, aumentando o efeito solo. Na prática, essa implementação reflete o aumento de sustentação que ocorre durante essa manobra, contribuindo para uma simulação mais realista.

4.2.1.4 Rotor de cauda

Ao rotor de cauda atribui-se a função de neutralizar o torque gerado pelo rotor principal, que, de outra forma, faria a fuselagem girar no sentido oposto ao das pás do rotor principal. Além disso, ele proporciona o controle direcional da aeronave em torno do eixo vertical (*yaw*), auxiliando a manter a estabilidade durante o voo, principalmente em baixas velocidades. A Figura 21 ilustra os vetores das forças de sustentação, em ciano, e as forças de arrasto, em amarelo.

As forças geradas pelo rotor de cauda têm origem semelhante às do rotor principal e são regidas pela mesma Equação 4.2 do arrasto. Contudo, há uma particularidade: o passo das pás do rotor de cauda pode variar entre valores positivos e negativos, conforme ilustrado nas Figuras 21d e 21c, respectivamente, resultando em uma força de sustentação perpendicular ao eixo longitudinal da aeronave.

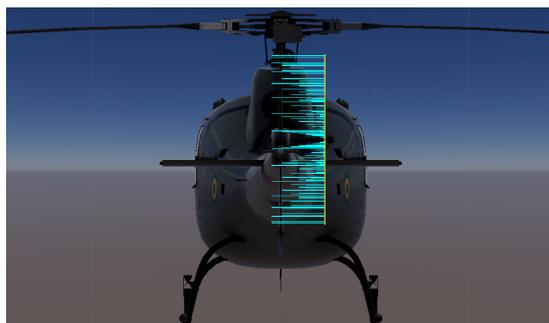
As pás do rotor de cauda possuem rotação anti-horária, tendo como referência a aeronave vista por boreste, conforme a Figura 21b. A resultante das forças de arrasto nas pás cria um pequeno torque que tende a levantar a cauda do helicóptero, independentemente do passo ser positivo ou negativo, pois o arrasto é sempre contrário ao movimento das pás,



(a) Visão em perspectiva



(b) Visão lateral



(c) Guinada para boreste



(d) Guinada para bombordo

Figura 21 – Rotor de cauda - Forças aplicadas

cujo sentido de rotação não se altera.

Além disso, as Figuras 21c e 21d revelam que o centro do rotor de cauda não é alinhado com o eixo central da aeronave. Essa configuração gera um torque resultante não nulo em todos os eixos, contribuindo para dinâmicas adicionais no comportamento do helicóptero.

4.2.1.5 Estabilizador horizontal e vertical

Os estabilizadores horizontal e vertical são superfícies aerodinâmicas fixas localizadas no cone de cauda da aeronave, e tem como principal função garantir a estabilidade e o equilíbrio longitudinal durante o voo, conforme ilustrado na Figura 22. Atuam como uma alavanca que contrabalança as forças geradas pelo rotor principal e pelo centro de gravidade da aeronave, prevenindo movimentos indesejados de arfagem (*pitch*) e de guinada (*yaw*).

O estabilizador horizontal possui um perfil aerodinâmico semelhante ao de uma asa, mas atua de forma invertida, gerando uma força para baixo em vez de uma sustentação para cima. Essa força impede que a cauda da aeronave se eleve além do desejado, mantendo o equilíbrio longitudinal. Além disso, o estabilizador também gera uma força de arrasto contrária ao movimento da aeronave, ajudando a amortecer oscilações de arfagem e garantindo maior estabilidade durante o voo. A Figura 23a ilustra os vetores das forças para baixo, em ciano, e as forças de arrasto, em amarelo.

O estabilizador vertical desempenha um papel mais específico na estabilidade dire-

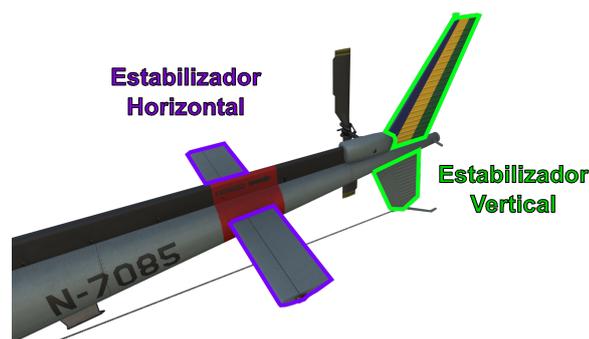
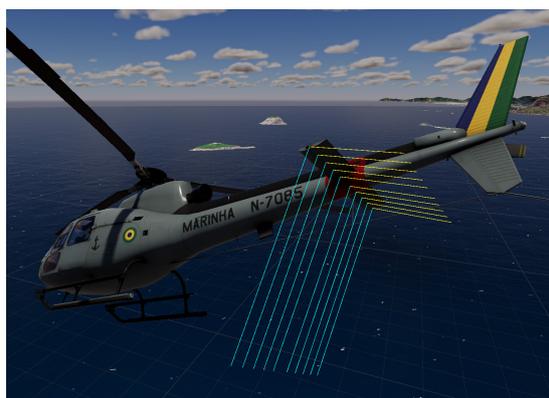
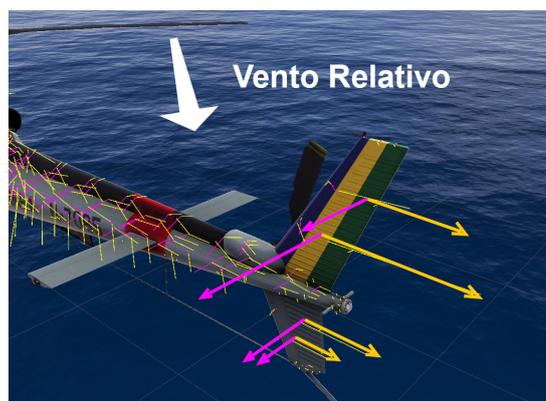


Figura 22 – Estabilizador horizontal e vertical

cional da aeronave. Ele atua gerando uma força que contrabalança movimentos indesejados de guinada, ou seja, desvios laterais do eixo vertical. Essa força impede que a cauda oscile lateralmente além do necessário, ajudando a manter a aeronave alinhada na direção do voo. Além disso, o estabilizador vertical também contribui para minimizar o impacto de perturbações aerodinâmicas, garantindo maior controle e estabilidade em diversas condições de voo. A Figura 23b ilustra os vetores da força de pressão causada pelo vento, em magenta, e as forças de arrasto por fricção na superfície, em amarelo.



(a) Forças no estabilizador horizontal



(b) Forças no estabilizador vertical

Figura 23 – Forças atuando nos estabilizadores.

4.2.1.6 Colisores

Na Unity, os colisores servem para configurar a física de colisão entre objetos. Eles definem o formato e o comportamento das interações físicas (37). Quanto mais complexo o formato do colisor, maior será o custo computacional para realizar os cálculos físicos. Para otimizar o simulador, os colisores da aeronave foram configurados da seguinte forma: quatro colisores em formato de paralelepípedo para os esquis e estabilizadores, um cilíndrico para as pás do rotor principal e dois baseados em um modelo simplificado de poucos polígonos para a carenagem da aeronave. Isso garantiu um bom equilíbrio entre fidelidade física e custo computacional. A Figura 24 ilustra em estrutura de arame o formato dos colisores.

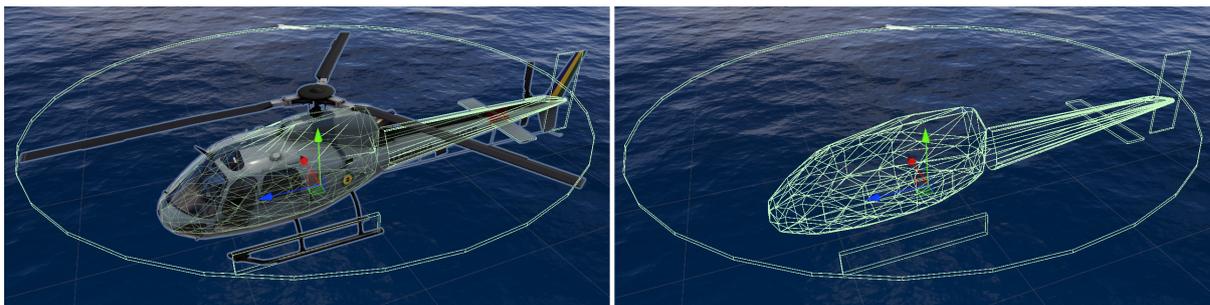


Figura 24 – Colisores

Além de definir de que forma ocorrerão as colisões em si, os colisores são responsáveis pela forma como o motor de física da Unity irá distribuir a massa associada ao objeto. No caso do SimPC, a aeronave foi configurada com uma massa de 2370 kg, valor aproximado especificado pelo fabricante (*Airbus*) (11) sob condições padrão de voo. Essa massa é distribuída uniformemente pelos volumes dos colisores, impactando diretamente no momento de inércia (I), calculado com base na massa (m) de cada elemento (i) e sua distância ao eixo de rotação (r), conforme a Equação 4.3:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad (4.3)$$

O momento de inércia determina a resistência à mudança na velocidade de rotação da aeronave, influenciando seu momento angular (L), onde ω é a velocidade angular (rad/s), de acordo com a Equação 4.4:

$$L = I \cdot \omega \quad (4.4)$$

Assim, o formato e a posição dos colisores impactam significativamente na forma como o helicóptero irá reagir às diversas forças aplicadas sobre ele. No SimPC, os colisores também assumem a função de criar uma interação física realista entre o navio e o helicóptero no momento do contato entre eles.

4.2.1.7 Movimentos do helicóptero e controles

A resultante das forças que atuam sobre o helicóptero pode provocar três movimentos básicos. A Figura 25 ilustra esses movimentos:

- *Rolamento*: Movimento em torno do eixo longitudinal, resultando em curvas ou deslizamentos laterais;
- *Arfagem*: Movimento em torno do eixo transversal, abaixando ou levantando o nariz da aeronave, o que provoca perda ou ganho de altitude e velocidade;

- *Guinada*: Movimento em torno do eixo vertical, que altera a proa e rumo da aeronave.

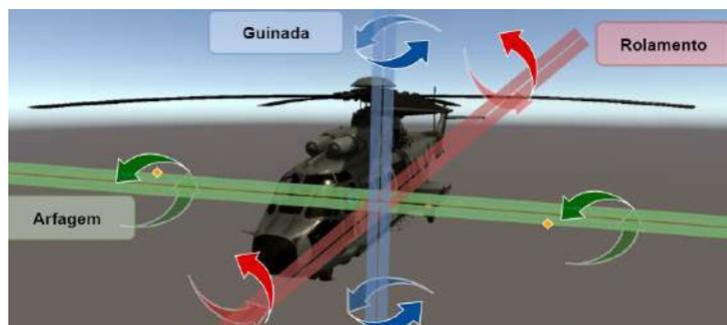


Figura 25 – Três movimentos básicos de um helicóptero (10).

O piloto controla a aeronave por meio de três alavancas de comando, que podem ser vistas na Figura 26:

- *Cíclico (Cyclic)*: Responsável por inclinar o disco do rotor principal, permitindo o controle do movimento para frente, para trás e para os lados. O cíclico altera diretamente a direção do helicóptero ao desviar o vetor de sustentação produzido pelo rotor;
- *Coletivo (Collective)*: Controla simultaneamente o ângulo de ataque de todas as pás do rotor principal, alterando a sustentação gerada. Este controle é utilizado para subir ou descer o helicóptero de forma vertical;
- *Pedais (Pedals)*: Controlam o ângulo de passo do rotor de cauda, responsável por contrabalançar o torque gerado pelo rotor principal. Isso permite ao piloto realizar guinadas, ajustando a direção da aeronave em torno do eixo vertical.



Figura 26 – Controles do helicóptero H125 Esquilo.

Além desses controles, algumas aeronaves possuem o controle de *Acelerador (Throttle)*, utilizado para ajustar as RPM do rotor principal. No entanto, no caso do helicóptero H125 Esquilo modelado no SimPC, o controle do acelerador é automatizado pelo sistema da aeronave, dispensando intervenção direta do piloto.

4.2.1.8 Instrumentos do painel

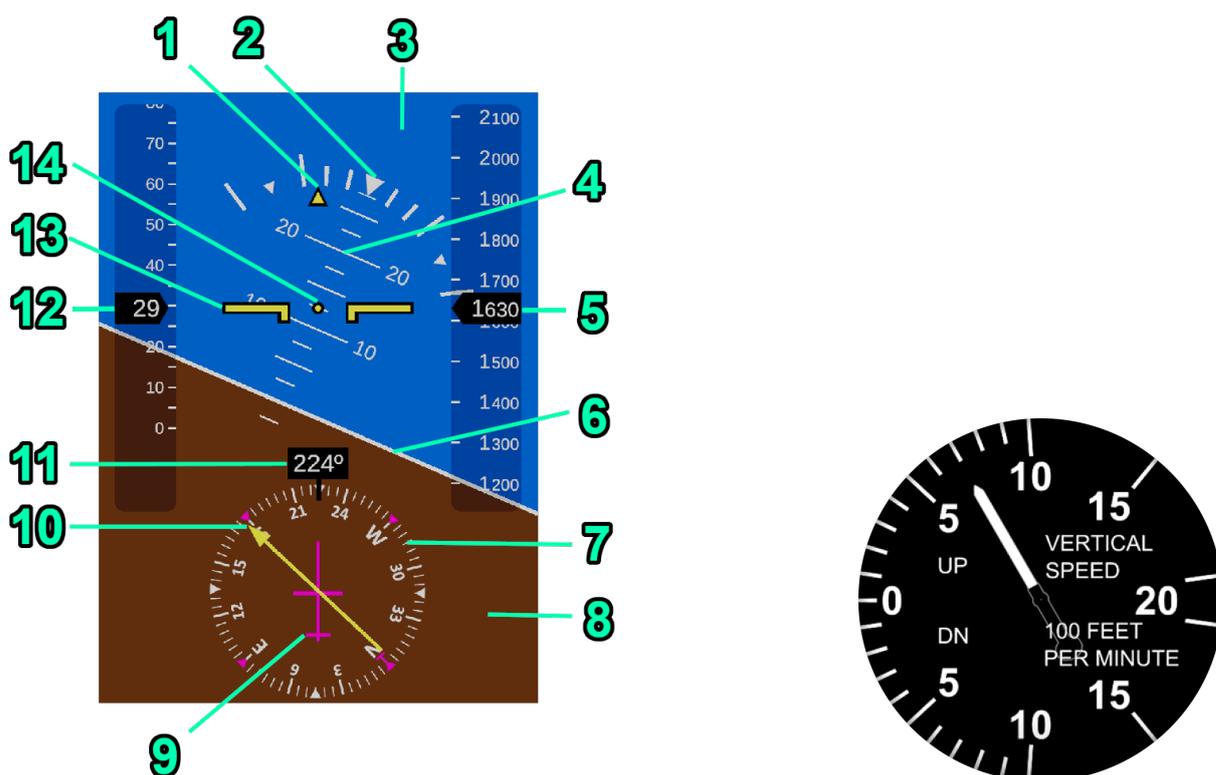
O helicóptero H125 é equipado com uma série de instrumentos no painel, projetados para diversas funções, como navegação, monitoramento de parâmetros mecânicos e de voo, e comunicações via rádio, conforme ilustrado na Figura 27. No entanto, como o foco desta pesquisa é o pouso no convoo da fragata, apenas os instrumentos básicos necessários para essa manobra foram implementados. A seleção desses instrumentos foi realizada com a ajuda dos instrutores experientes do CIAAN, especializados em pousos em navios de guerra, que ajudaram a identificar os instrumentos cruciais para o treinamento.



Figura 27 – Painel do Helicóptero H125 Esquilo (11).

Os indicadores dos instrumentos foram condensados em um único *display*, ilustrado na Figura 28a, que inclui o indicador de atitude (*attitude indicator*), o indicador de situação horizontal (*Horizontal Situation Indicator - HSI*), o indicador de altitude (*altitude indicator*) e o indicador de velocidade do ar (*airspeed indicator*). Além disso, o SimPC inclui o indicador de subida (*climb indicator*), representado na Figura 28b, que mede a taxa de subida ou descida da aeronave em pés por minuto, crucial para o pouso suave. Este indicador ajuda a prevenir impactos severos no convoo, alertando o piloto caso a taxa de descida seja excessiva, o que pode resultar em danos à aeronave ou até mesmo em acidentes fatais.

1. Ponteiro de inclinação lateral (*bank pointer*): Mostra o ângulo de inclinação lateral da aeronave;
2. Escala de inclinação lateral (*bank scale*): Mostra a escala de inclinação com os marcadores posicionados a 0°, 10°, 20°, 30°, 45° e 60°, para ambos os lados;
3. Fundo azul ou esfera (*blue background or sphere*): Quando o indicador de atitude está nesta região, o nariz da aeronave aponta para o céu;
4. Barras de inclinação (*pitch bars*): Marcam de 0° a 90° para cima e para baixo o valor da atitude (*pitch*);



(a) *Display* indicador de atitude, situação horizontal, altitude, e velocidade

(b) Indicador de subida (*climb*).

Figura 28 – Instrumentos disponíveis no painel da aeronave.

5. Indicador de altitude (*altitude indicator*): Indica o valor da altitude barométrica da aeronave em pés;
6. Barra de horizonte (*horizontal bar*): Indica a posição relativa do horizonte;
7. Rosácea da bússola (*compass card*): Indica o rumo verdadeiro da aeronave. Graduada no intervalo de 0° a 360°;
8. Fundo marrom ou esfera (*brown background or sphere*): Quando o indicador de atitude está nesta região, o nariz da aeronave aponta para o solo;
9. Símbolo miniatura da aeronave (*miniature aircraft symbol*): Representa a posição relativa da aeronave vista por cima;
10. Indicador de desvio de rota (*Course Deviation Indicator (CDI)*): Aponta o desvio lateral da aeronave em relação à rota programada. No caso do SimPC indica a posição do navio;
11. Indicador de rumo (*course*): Indica o rumo verdadeiro da aeronave no intervalo de 0° a 360°;
12. Indicador de velocidade do ar (*airspeed indicator*): Indica a velocidade relativa do ar em nós;

13. Miniatura da aeronave (*miniature aircraft*): As barras horizontais amarelas indicam a posição relativa do eixo transversal da aeronave (vista por trás). No caso de um avião, as asas; e
14. Indicador de atitude (*attitude indicator*): Indica o ângulo de atitude da aeronave, ou seja, a inclinação do seu eixo longitudinal ou para onde aponta o nariz.

4.2.1.9 Código em C# do helicóptero

O código responsável por governar a física e o controle do helicóptero foi desenvolvido com enfoque na personalização e flexibilidade, permitindo a alteração das características da aeronave e dos parâmetros de calibração. Essa abordagem possibilita também a inclusão de outros modelos de helicópteros com diferentes propriedades, ampliando a aplicabilidade do sistema a diversas configurações aeronáuticas. Entre as configurações disponíveis estão:

- Posição do centro de massa da aeronave;
- Curvas dos coeficientes de sustentação (C_l) e arrasto (C_d);
- Número de pás do rotor principal e do rotor de cauda;
- Subdivisões das pás no modelo *Blade Element Theory* (BET);
- Dimensões das pás;
- Inclinações lateral e para vante do mastro;
- Rotações por minuto (RPM);
- Sensibilidade dos controles: cíclico, coletivo e pedais;
- Parâmetros da câmera;
- Curva de intensidade do Efeito Solo;
- Posição dos rotores;
- Dimensões, posição e demais parâmetros do estabilizador horizontal; e
- Instrumentos de navegação do painel;

4.2.2 Navio

A Fragata Niterói (F40), representada na Figura 29, foi escolhida como modelo para o SimPC, sendo o primeiro de uma série de seis navios encomendados pela Marinha do Brasil (MB). A embarcação realizou sua primeira saída ao mar em 1976, ano em que



Figura 29 – Fragata Niterói (F40) (12).

também foi incorporada à armada da MB (12). Representando a *Classe Niterói*, a fragata deu nome a essa classe de navios que ainda permanece ativa e em operação.

O navio possui 129,2 metros de comprimento, 13,5 metros de boca e 5,9 metros de calado, com deslocamento padrão de 3.200 toneladas e capacidade de atingir uma velocidade máxima de 30,5 nós (12). O navio foi projetado para operar uma aeronave orgânica, possuindo um convoo e um hangar próximo à popa, sendo capaz de operar com diversos tipos de helicópteros, inclusive, com o H125 Esquilo.

4.2.2.1 Modelo 3D e forças no casco do navio

Semelhante ao problema da carenagem do helicóptero discutido na Seção 4.2.1.1, o modelo 3D do casco do navio também foi simplificado para permitir a aplicação de forças no simulador sem comprometer significativamente o desempenho computacional. A Figura 30 apresenta o modelo simplificado.

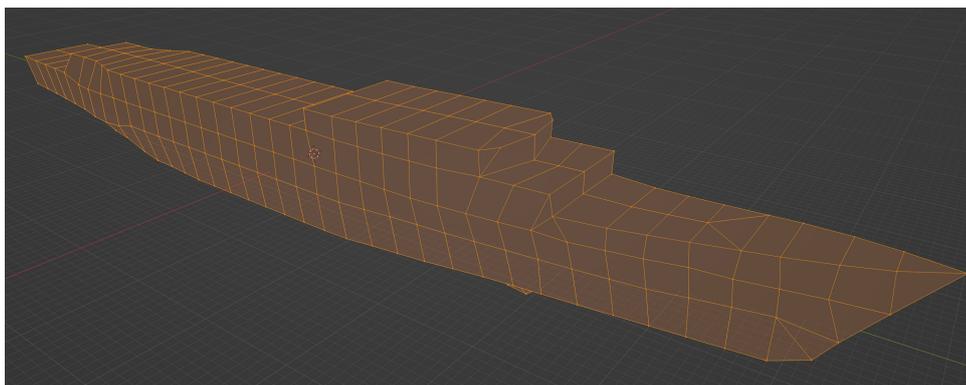


Figura 30 – Modelo 3D com poucos polígonos do casco do navio

Foi desenvolvido um código em **C#** para calcular e armazenar, em uma matriz, a área, o ponto central e o vetor normal de cada um dos 397 polígonos que compõem o casco. Em cada polígono foram aplicadas três forças principais:

- Força provocada pela pressão hidrostática (\vec{F}_{ph}), definida pela Equação 4.7;
- Força provocada pela pressão dinâmica (\vec{F}_{pd}), definida pela Equação 4.9; e
- Força de arrasto por fricção na superfície do casco (\vec{F}_f), definida pela Equação 4.10.

A Pressão (P) é definida como a razão entre a componente perpendicular da Força (F) aplicada sobre uma superfície e a Área (A) dessa superfície:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.5)$$

Segundo o Princípio de Pascal, a pressão hidrostática (P) em N/m^2 é dada pelo produto entre a densidade (ρ), a aceleração da gravidade (g) e a profundidade (h):

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (4.6)$$

Para determinar a força hidrostática (\vec{F}_{ph}) exercida sobre a área (A) de cada polígono, na direção do vetor normal (\vec{N}), combina-se as Equações (4.5) e (4.6), resultando em:

$$\vec{F}_{ph} = \rho \cdot g \cdot h \cdot A \cdot \vec{N} \quad (4.7)$$

A pressão dinâmica (q) é derivada da equação de Bernoulli e depende da velocidade relativa (v) entre o navio e a água:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (4.8)$$

A força de pressão dinâmica (\vec{F}_{pd}), considerando a pressão exercida pela água ao colidir com o casco, é obtida combinando as Equações (4.5) e (4.8):

$$\vec{F}_{pd} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot \vec{N} \quad (4.9)$$

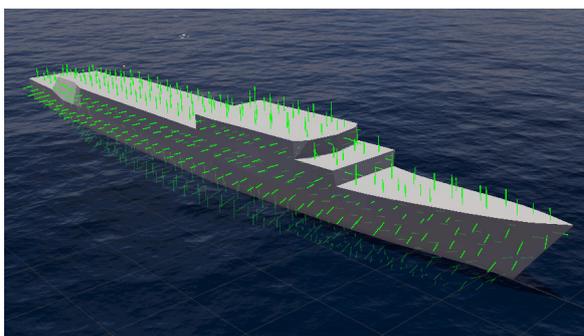
A força de arrasto por fricção (\vec{F}_f), provocada pela tensão de cisalhamento, é calculada como:

$$\vec{F}_f = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \vec{v} \cdot v \cdot C_f \cdot A \quad (4.10)$$

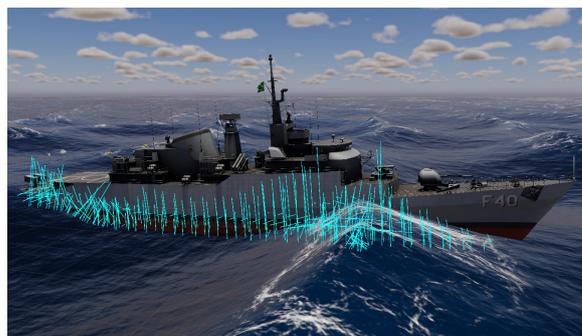
O coeficiente de arrasto por fricção (C_f) varia de acordo com a interação entre o casco do navio e a água, sendo calibrado empiricamente.

A Figura 31 ilustra as forças aplicadas ao casco do navio:

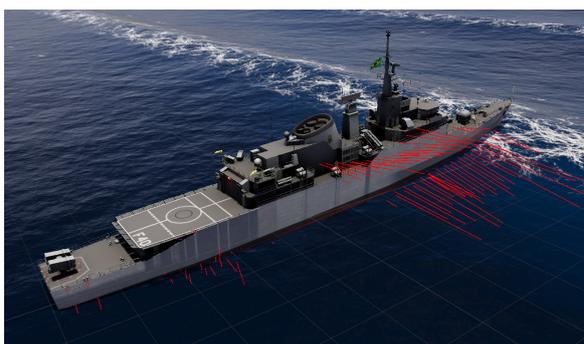
- Verde: vetores normais a cada polígono que compõe o casco, indicados na Figura 31a;
- Ciano: forças de pressão hidrostática (\vec{F}_{ph}), responsáveis pela flutuação, indicados na Figura 31b;
- Vermelho: forças de pressão dinâmica (\vec{F}_{pd}), que oferecem resistência ao deslocamento, indicados na Figura 31c; e
- Amarelo: forças de arrasto por fricção (\vec{F}_f), também responsáveis por resistir ao movimento, indicados na Figura 31d.



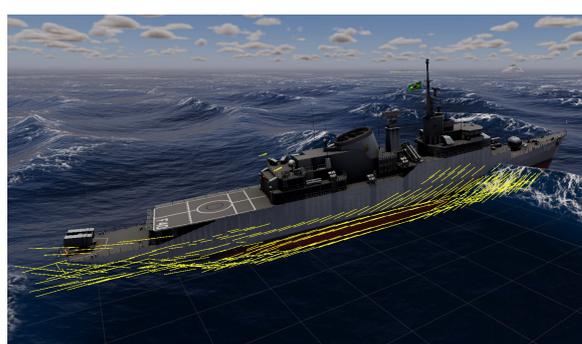
(a) Vetores normais ao casco.



(b) Forças de pressão hidrostática.



(c) Forças de pressão dinâmica.



(d) Forças de arrasto por fricção.

Figura 31 – Forças aplicadas ao casco do navio.

A soma vetorial dessas forças resulta na força de empuxo que mantém o navio flutuando e no arrasto total que gera resistência ao deslocamento e à rotação. Apesar das simplificações empregadas no modelo, ele oferece uma aproximação realista para a flutuação e o deslocamento do navio em meio às ondas.

4.2.2.2 Propulsão

A Fragata Niterói utiliza um sistema de propulsão combinado, composto por quatro motores a diesel ou duas turbinas a gás, acoplados a dois eixos com hélices de passo variável (12). Para modelar esse sistema no simulador, foram aplicadas ao casco duas forças de propulsão, uma representando o eixo de boreste e outra o de bombordo, ilustrados na Figura 32.

A direção dessas forças coincide com os eixos correspondentes. As forças podem assumir valores positivos, para acelerar o navio à vante, ou negativos, para desacelerá-lo ou movê-lo à ré. A variação da força é limitada por dois valores:

- *Limite superior*: corresponde à força necessária para atingir a velocidade máxima de 30,5 nós; e
- *Limite inferior*: é equivalente à metade do valor do limite superior, porém negativo, devido ao menor desempenho hidrodinâmico das hélices ao operar em passo negativo. Esse comportamento ocorre porque o formato das pás das hélices é projetado para máxima eficiência quando impulsionam o navio à vante. Quando configuradas para um passo negativo (máquinas atrás), a eficiência é reduzida.

Adicionalmente, a variação da força não é instantânea, mas progressiva, simulando o comportamento real de um sistema de hélices de passo variável, que demanda tempo para reagir mecanicamente aos comandos dados.

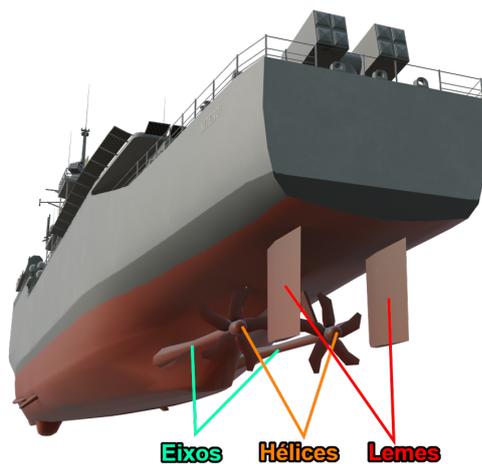


Figura 32 – Eixos, hélices e lemes do navio

4.2.2.3 Leme

A Fragata Niterói possui dois lemes posicionados logo atrás dos hélices, ilustrados na Figura 32. Essa configuração permite aproveitar o fluxo de água acelerado gerado pelos hélices, aumentando a eficiência dos lemes e a manobrabilidade do navio.

No SimPC, o sistema de lemes foi modelado aplicando forças ao casco na posição correspondente aos lemes de boreste e bombordo. Essas forças são direcionadas lateralmente, fazendo com que a popa do navio se mova para o bordo desejado, alterando assim o rumo do navio.

A intensidade máxima da força gerada pelos lemes foi definida empiricamente, baseada no momento em que o navio atinge sua taxa máxima de curva de giro.

Analogamente ao sistema de propulsão, a variação das forças aplicadas pelos lemes é progressiva, simulando o comportamento real de resposta mecânica de um leme. Essa abordagem contribui para uma representação mais fiel das manobras realizadas pela Fragata Niterói no SimPC.

4.2.2.4 Piloto automático

O instrutor do exercício é o militar responsável por controlar diversos parâmetros da simulação, incluindo a operação do navio. Suas atribuições englobam também a condução de outras tarefas do adestramento, como a comunicação via rádio, a verificação do cumprimento da fraseologia padrão, a avaliação do desempenho do aluno e a identificação de eventuais erros. Além disso, o instrutor é responsável por assegurar que o piloto em treinamento execute corretamente os procedimentos previstos. Essas responsabilidades exigem alta concentração, o que torna inviável que o instrutor se encarregue dos detalhes operacionais da simulação, como o controle e a manobra do navio.

Para que o instrutor tenha mais tempo para se concentrar nas tarefas mais importantes do adestramento, foi criado um programa com a função de piloto automático para manobrar o navio. Esta abordagem permite que o instrutor apenas defina o rumo e a velocidade desejados, enquanto o piloto automático executa as manobras necessárias.

Após o instrutor definir o rumo e a velocidade que o navio deve assumir, o piloto automático calcula as forças a serem aplicadas aos lemes e aos propulsores para alcançar as condições estabelecidas. O modelo físico implementado responde ao conjuntos de forças aplicadas deslocando e rotacionando o navio, somente então o navio responde às forças atuantes, garantindo um comportamento realista na simulação. A Figura 33 ilustra o esquema do funcionamento do piloto automático, destacando suas principais etapas.

As funções do piloto automático se limitam a ajustar as forças no leme e no sistema de propulsão, de maneira que o navio atinja o rumo e a velocidade configurados pelo instrutor.

Para o **controle da propulsão**, foi implementado o algoritmo do Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), muito utilizado no controle de processos em plantas industriais (13). Como o navio está sujeito a diversas forças externas e variáveis, o piloto automático não possui conhecimento direto da força exata necessária para atingir a

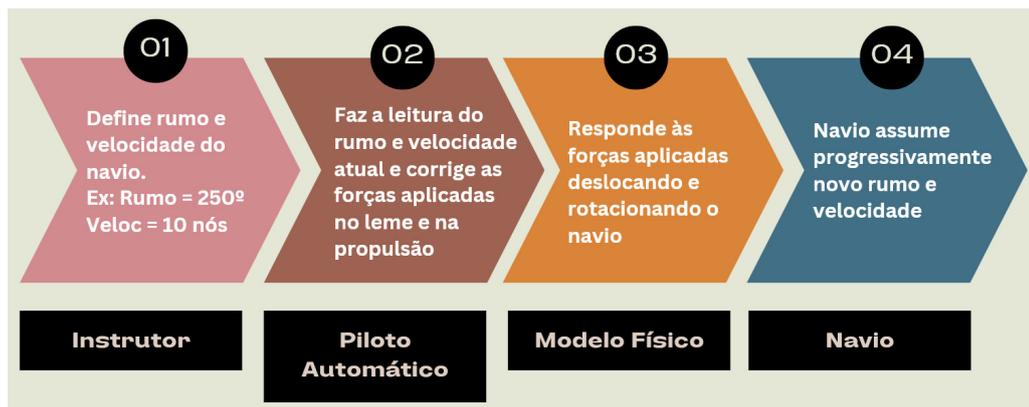


Figura 33 – Controle do navio - Piloto Automático

velocidade definida pelo instrutor. O piloto automático tem acesso apenas à velocidade desejada e à velocidade atual do navio.

O controlador PID opera calculando continuamente o erro $e(t)$, ou seja, a diferença entre a velocidade desejada e a velocidade atual. A partir desse erro, o controlador determina uma nova força de propulsão $u(t)$, ajustando-a ao longo do tempo para reduzir o erro a zero. Assim, a velocidade atual do navio converge para a velocidade desejada.

A função $u(t)$ de um controlador PID é dada por(13):

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.11)$$

onde:

- $u(t)$: saída do controlador, que representa a força de propulsão;
- K_p : ganho proporcional, responsável pela reação imediata ao erro;
- K_i : ganho integral, que reduz erros residuais ao longo do tempo;
- K_d : ganho derivativo, que antecipa mudanças no erro e melhora a estabilidade do sistema;
- $e(t)$: erro em função do tempo t ; e
- τ : variável ou tempo de integração.

A Figura 34 apresenta um gráfico ilustrativo, utilizando dados genéricos, que demonstra como um controlador PID ajusta a variável controlada ao longo do tempo para convergir ao valor de referência. No SimPC, a variável controlada é a força da propulsão, enquanto o valor de referência corresponde à velocidade desejada.

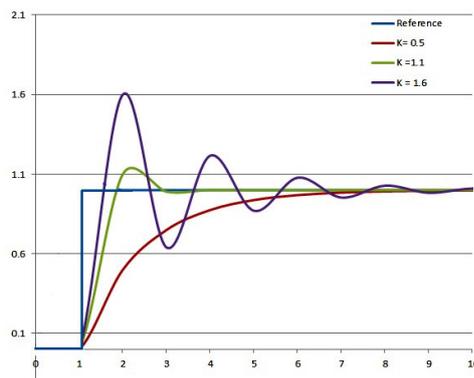


Figura 34 – Controlador PID (13).

A calibração dos parâmetros K_p , K_i e K_d foi realizada empiricamente, de modo a garantir que o piloto automático ajustasse a velocidade do navio de forma realista, simulando o comportamento esperado em condições operacionais.

Ao utilizar um controlador Proporcional-Integral (PI), ou seja, zerando o ganho derivativo K_d , observou-se que a velocidade final do navio apresentou oscilações significativas em torno do valor desejado. Esse comportamento é indesejável, pois dificulta o pouso do helicóptero ao gerar variações imprevisíveis na velocidade do convoo. Por outro lado, ao empregar um controlador Proporcional-Derivativo (PD), zerando o ganho integral K_i , as oscilações foram amortecidas, proporcionando uma resposta mais estável. No entanto, o erro estacionário permaneceu presente, fazendo com que o navio não atingisse com precisão a velocidade definida pelo instrutor.

Utilizando a configuração completa dos ganhos K_p , K_i e K_d , ou seja, aplicando um controlador PID, tanto as oscilações quanto o erro estacionário foram eliminados. Apesar da necessidade de um ajuste mais refinado dos parâmetros, essa configuração proporcionou o melhor desempenho, garantindo estabilidade e precisão na velocidade do navio.

Analogamente ao controle da propulsão, o piloto automático não possui conhecimento direto da força exata necessária para atuar no **leme**, dispondo apenas do rumo desejado e do rumo atual do navio. A Figura 33, que ilustra o esquema de funcionamento do piloto automático, também se aplica ao sistema de controle do leme.

O rumo pode variar em um intervalo de 0° a 360° . Para o controle do leme, foi desenvolvido e implementado um algoritmo dedicado, que funciona da seguinte maneira:

- *Erro superior a 15°* : Se a diferença entre o rumo atual e o rumo desejado for maior que 15° , será aplicada a força máxima no leme, direcionando-o totalmente para o bordo que reduz a diferença. Nesse caso, o piloto automático faz o navio guinar o mais rápido possível em direção ao rumo desejado.
- *Erro inferior ou igual a 15°* : Se a diferença for menor ou igual a 15° , a força aplicada ao leme diminui progressivamente, seguindo uma relação de decaimento descrita por

uma equação de segundo grau em função do erro. Assim, a força e o erro convergem para zero de forma suave e gradativa.

A Figura 35 apresenta o gráfico que relaciona a força aplicada ao leme em função do valor do erro.

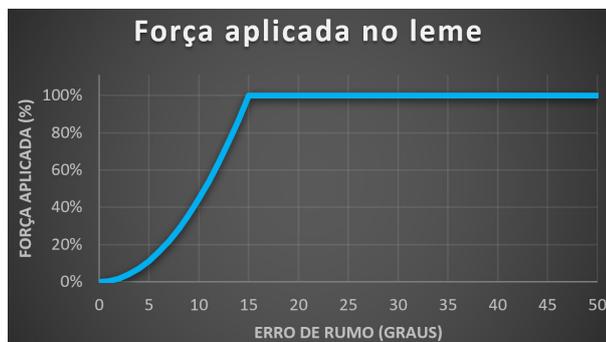


Figura 35 – Gráfico da força aplicada ao leme em função do erro de rumo

4.2.2.5 Colisores

Os colisores aplicados ao navio seguem a mesma lógica descrita na Seção 4.2.1.6 para os colisores da aeronave. De forma resumida, esses colisores têm como objetivo:

- Configurar a física de colisão entre o navio e a aeronave;
- Distribuir uniformemente a massa de 3.200 toneladas atribuída ao navio;
- Calcular o momento de inércia (I) do navio, conforme a Equação 4.3; e
- Determinar o momento angular (L), de acordo com a Equação 4.4.

A Figura 36 apresenta, em estrutura de arame, o formato dos colisores utilizados para essas funções.

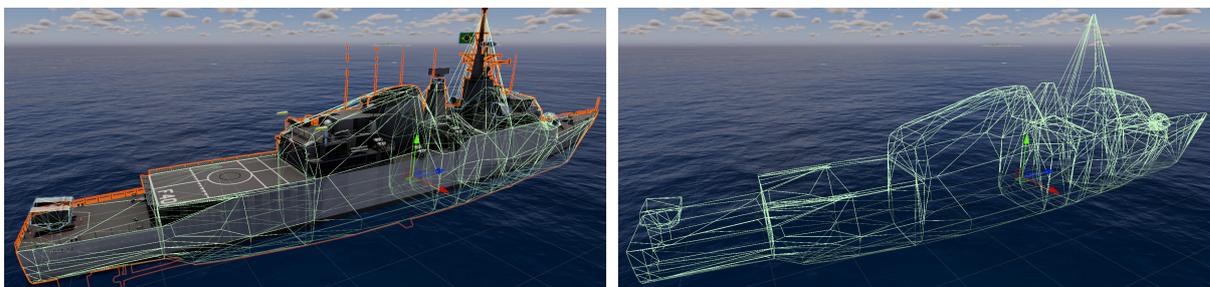


Figura 36 – Colisores do navio

4.2.2.6 Código em **C#** do navio

O código responsável por governar a física e o controle do navio foi desenvolvido para ser personalizável e flexível, permitindo a alteração das características e parâmetros de calibração do navio. Possibilita também a inclusão de outros modelos de navios com diferentes características, ampliando a aplicabilidade do SimPC para diversos meios navais. Entre as configurações disponíveis estão:

- Posição e centro de massa do navio;
- Valor do coeficiente de arrasto (C_f);
- Quantidade de eixos propulsores e lemes;
- Inserção de cascos com formatos e resolução diferentes;
- Velocidade máxima do navio e curva de giro.

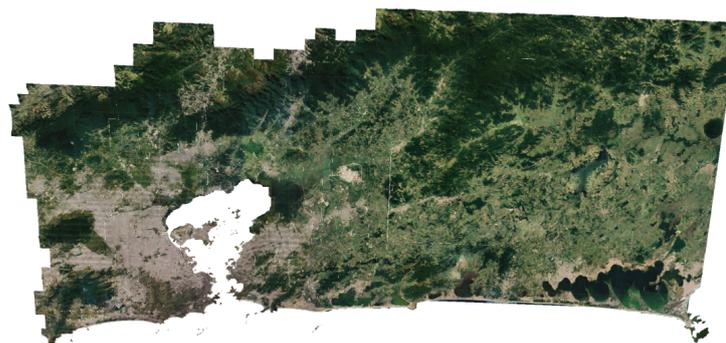
4.3 O ambiente da simulação

Nesta seção, serão apresentados os detalhes de implementação da parte gráfica do ambiente de simulação, incluindo o modelo 3D da região com suas características geográficas, a representação do mar e a influência das ondas na simulação, além da modelagem do céu, da atmosfera, do vento, da chuva e da iluminação diurna e noturna. Esses elementos foram desenvolvidos com o objetivo de aprimorar a imersão do piloto e, simultaneamente, interagir de forma realista com os modelos físicos do helicóptero e do navio.

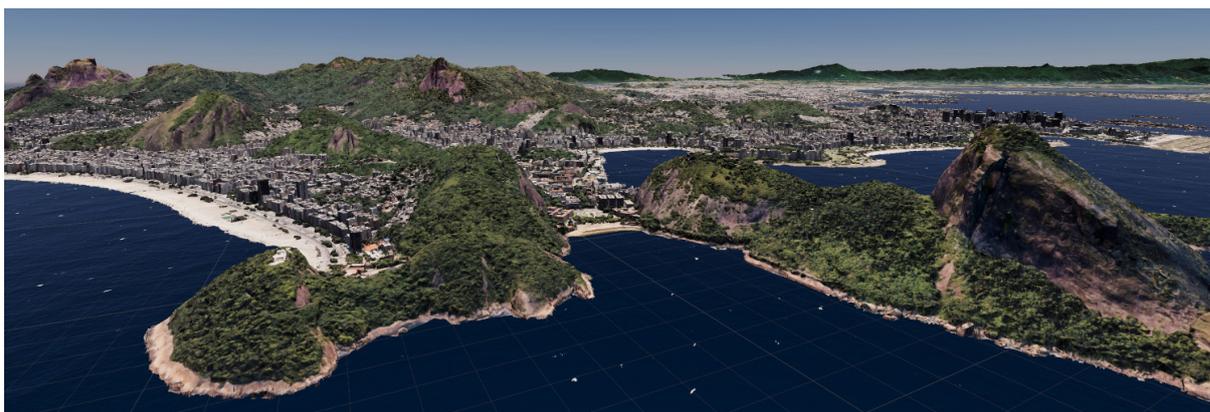
4.3.1 Região e relevo

A região selecionada para ambientar a simulação corresponde à cidade do Rio de Janeiro e suas proximidades, abrangendo uma área de aproximadamente 180 km por 80 km, representada na Figura 37a. O modelo 3D foi extraído do Google Earth, incorporando relevo, construções e texturas realistas do local.

Para a extração das feições, foram utilizados o navegador *Google Chrome*, o software *Render Docs* e o *Blender* (41) para edição. O processo envolveu a extração dos modelos em blocos, totalizando 130 unidades. Cada bloco foi submetido às etapas de recorte, limpeza de polígonos (*mesh*) e tratamento das texturas. Após essa preparação, os blocos foram montados em um mosaico de escala real e importados para a *Unity* (37). O resultado pode ser visto na Figura 37b.



(a) Região modelada



(b) Relevo, construções e texturas

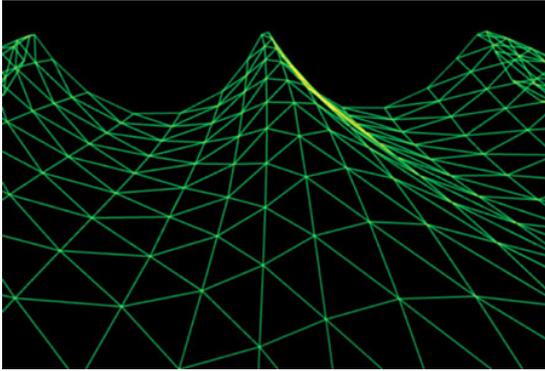
Figura 37 – Modelo 3D da região do Rio de Janeiro

4.3.2 Mar

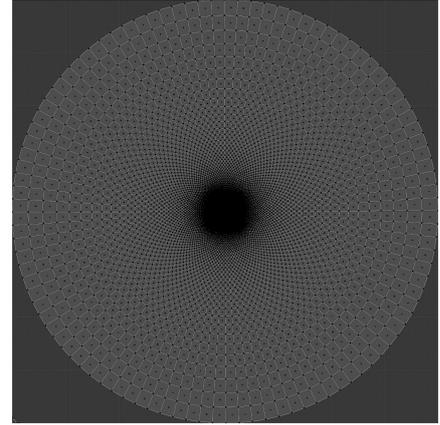
Para garantir o realismo do pouso em convoo, foi fundamental implementar um modelo que representasse fielmente o comportamento das ondas do mar e suas interações com o navio. A simulação de corpos d'água apresenta desafios significativos na computação, e, ao longo do tempo, diversos métodos foram desenvolvidos. Um desses métodos, que proporciona um bom equilíbrio entre realismo e custo computacional, é a função de onda conhecida como **Gerstner Waves** (46) ou **Trochoidal wave**. A Figura 38a ilustra uma malha modelada por essa função.

Para aplicar o modelo no SimPC foi necessário criar no *Blender* (41) uma malha 3D plana em formato de círculo contendo 7.601 vértices, que pode ser vista na Figura 38b, e tem a função de representar visualmente o mar. No SimPC, a malha é posicionada de forma centralizada em relação ao navio, acompanhando sua posição. Próximo ao centro, a densidade de vértices da malha é máxima, diminuindo gradualmente à medida que se aproxima das bordas. Essa técnica foi implementada para assegurar alta fidelidade visual do mar nas proximidades do navio, ao mesmo tempo em que reduz a carga de processamento nas regiões mais distantes, próximas ao horizonte.

A posição P de cada vértice da malha é calculada pela função de onda, conforme a



(a) Gerstner Waves (46).



(b) Malha plana do oceano

Figura 38 – Modelo de ondas e malha utilizada

Equação 4.12 (46):

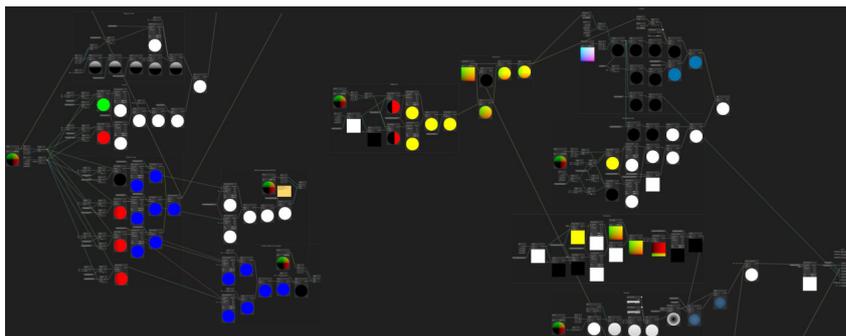
$$P(x, y, t) = \begin{pmatrix} x + \sum(Q_i A_i \times D_{i.x} \times \cos(\omega_i D_i \cdot (x, y) + \varphi_i t)), \\ y + \sum(Q_i A_i \times D_{i.y} \times \cos(\omega_i D_i \cdot (x, y) + \varphi_i t)), \\ \sum(A_i \sin(\omega_i D_i \cdot (x, y) + \varphi_i t)), \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

onde:

- Q é a inclinação da onda;
- A é a amplitude da onda;
- D é o vetor da direção da onda;
- ω é o comprimento de onda;
- φ é a velocidade de onda; e
- t é o tempo.

A quantidade de ondas é configurável, contudo, um aumento no número de ondas acarreta maior carga de processamento. Para equilibrar a qualidade visual e o desempenho, foram utilizadas três ondas. Além da quantidade, parâmetros como inclinação, amplitude, direção, velocidade e comprimento de cada onda individual também podem ser ajustados.

O modelo Gerstner Waves define apenas a geometria da malha. Para renderizá-la na simulação, foi desenvolvido um *shader*, que calcula luz e cores para os objetos. Esse *shader* foi criado utilizando a ferramenta *Shader Graph* da *Unity* (37), que permite a programação lógica por meio de diagramas de blocos, conforme ilustrado na Figura 39. Cada bloco representa uma função matemática que define características como cor, textura, refletância, transparência e vetores normais da superfície.

Figura 39 – Shader do oceano - Diagrama de blocos do *Shader Graph*

A Figura 40 apresenta o resultado final alcançado com a aplicação do modelo *Gerstner Waves* e do *shader* desenvolvido. Ressalta-se que o modelo matemático das ondas não se limita a um impacto visual, como também influencia diretamente a flutuabilidade do navio, permitindo que o modelo físico do navio interaja com o comportamento das ondas.



Figura 40 – Mar - Resultado final

4.3.3 Céu e atmosfera

Para a renderização do céu, das nuvens e da neblina, foram utilizados, respectivamente, os componentes *Physically Based Sky*, *Volumetric Clouds* e *Fog*, disponíveis nativamente no motor gráfico *Unity* (37). Esses recursos permitem personalizar o cenário de forma flexível, como ilustrado na Figura 41.

O *Physically Based Sky* simula as interações físicas da luz solar com a atmosfera, permitindo ajustes de parâmetros como a composição e a dispersão atmosférica, reproduzindo fenômenos como o alaranjado do pôr do sol ou o azul profundo em altitudes elevadas. Já o *Volumetric Clouds* possibilita a configuração detalhada de nuvens volumétricas, incluindo tipos como cúmulos, cirros e estratos, além de densidade, opacidade e movimentação. O *Fog*, por sua vez, controla a presença de neblina no ambiente, modulando densidade e dispersão com base na distância e nas condições climáticas desejadas.



Figura 41 – Condições variadas de céu, atmosfera, nuvens e neblina

A densidade atmosférica (ρ) varia com a altitude, sendo maior nas proximidades do solo. Essa característica tem impacto direto na sustentação e no arrasto gerados pelas pás do helicóptero, conforme descrito na Equação 4.2 do arrasto. Em baixas altitudes, a maior densidade do ar proporciona maior sustentação, mas também aumenta o arrasto, resultando em maior torque no rotor principal. Conseqüentemente, o helicóptero tende a rotacionar mais rapidamente sobre o próprio eixo.

Além da altitude, parâmetros como temperatura, umidade e a presença de gases poluentes podem influenciar o valor de ρ . Entretanto, para o SimPC, foi implementado o modelo de atmosfera padrão apresentado por Anderson (6), que fornece uma base consistente para representar a relação entre densidade, altitude e outros fatores atmosféricos.

4.3.4 Vento

O vento relativo é um dos principais fatores que influenciam a dinâmica de voo de um helicóptero. Ele interage diretamente com a carenagem e as pás do rotor, aumentando o arrasto e influenciando a sustentação. Além do helicóptero, outros objetos no ambiente simulado também são significativamente impactados pelo vento:

- O Navio: O vento cria uma pressão sobre sua área vélica, gerando resistência ao deslocamento e podendo alterar sua trajetória.
- Birutas: Instaladas próximas ao convoo, servem como referência visual para os pilotos identificarem a direção e a intensidade do vento relativo. As duas birutas podem ser

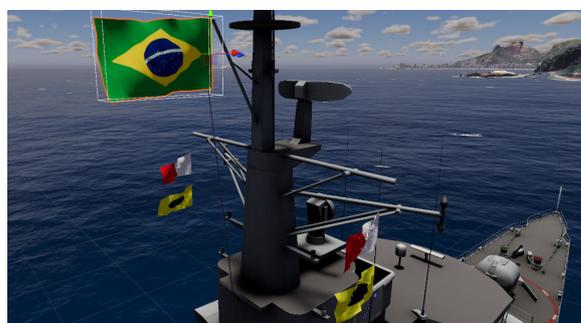
vista na Figura 42a;

- Bandeiras: Localizadas nos mastros, são utilizadas como sinalização náutica e também servem como referência para identificar o vento relativo. As bandeiras podem ser vistas na Figura 42b; e
- Chuva: As partículas de chuva simuladas reagem ao vento, alterando sua trajetória e contribuindo para o realismo do cenário.

No SimPC, o vento pode ser configurado para vir de qualquer direção, com intensidades variáveis entre 0 e 100 nós, permitindo ajustar as condições ambientais de acordo com os cenários de treino desejados.



(a) Birutas e convoo



(b) Bandeiras no mastro principal

Figura 42 – Sinalização náutica sob influência do vento

4.3.5 Chuva

A chuva é um dos fatores ambientais mais desafiadores durante operações aéreas com helicópteros em navios, impactando significativamente a visibilidade do piloto e aumentando a complexidade das manobras de pouso a bordo. Além disso, exerce influência psicológica ao elevar os níveis de estresse e demandar maior concentração, especialmente quando combinada com outros elementos, como vento forte e iluminação reduzida. Essa interação cria um ambiente operacional dinâmico e desafiador. A simulação precisa da chuva é essencial para preparar os pilotos para cenários realistas, nos quais múltiplos fatores climáticos atuam de forma simultânea.

Para simular esse fenômeno, foi utilizada a ferramenta *VFX Graph* da *Unity* (37). O *VFX Graph* aproveita o processamento da placa de vídeo para gerar milhões de partículas simultâneas com eficiência, minimizando o impacto no desempenho do sistema. Cada partícula de chuva possui uma posição real no ambiente 3D, comporta-se de forma independente e reage a fatores como gravidade, direção e intensidade do vento.

Além disso, a intensidade da chuva pode ser ajustada pelo instrutor, permitindo configurar diferentes níveis de dificuldade nos cenários de treinamento. Em condições

de alta intensidade, também são simulados borrifos, ampliando o realismo visual e a complexidade da operação. A Figura 43 ilustra o resultado final alcançado.

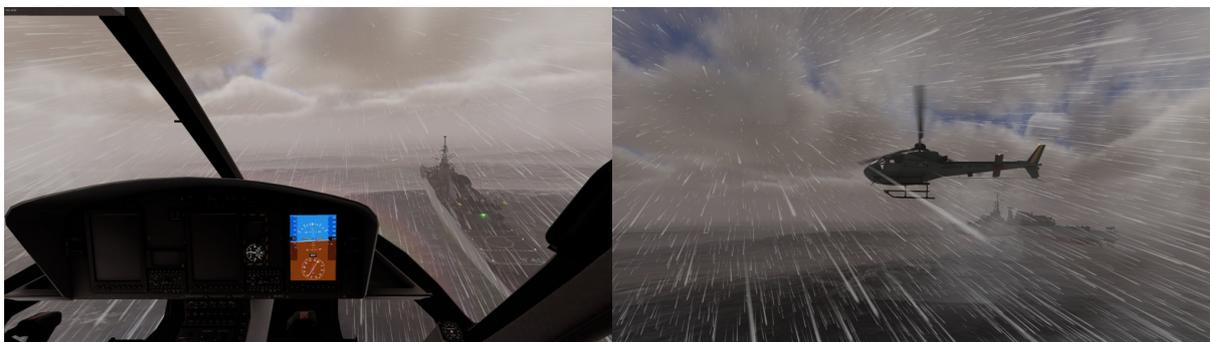


Figura 43 – Efeito de chuva

4.3.6 Iluminação noturna e diurna

A iluminação desempenha um papel importante na imersão e no realismo de um simulador de voo. Durante o dia, a iluminação precisa representar as variadas condições de visibilidade, com ambientes claros e ensolarados a nublados e com luz reduzida. Já à noite, a iluminação simula os desafios de voar praticamente sem referências visuais externas, exigindo do piloto navegar predominantemente pelos instrumentos e interpretar corretamente as luzes de navegação utilizadas pelos navios.

Na Marinha do Brasil, operações com aeronaves embarcadas em condições de visibilidade severamente reduzida, como durante a noite, sob neblina, chuva intensa ou em estado adverso do mar, são proibidas devido à complexidade e ao alto risco das manobras de pouso e decolagem, mesmo em cenários meteorológicos e de visibilidade favoráveis. No entanto, situações de emergência ou contextos de combate podem exigir a realização dessas operações em condições extremas. Para esses casos, o simulador desempenha um papel fundamental ao permitir que os pilotos treinem e se preparem para enfrentar situações adversas sem exposição a riscos reais.

As luzes de navegação do navio foram implementadas no SimPC seguindo as normas do Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar (RIPEAM), que define um conjunto de regras para prevenir colisões. Adicionalmente, holofotes foram incluídos para iluminar o convoo, auxiliando os pilotos durante as operações noturnas. A Figura 44 ilustra o resultado final alcançado com a inclusão das luzes de navegação.

4.4 Módulo do Instrutor e Comunicações via rede

O papel do instrutor é fundamental em um simulador de voo, pois ele não apenas monitora o desempenho dos pilotos, mas também ajusta os parâmetros do cenário para criar situações específicas de treinamento, reproduzindo desafios variados que os pilotos

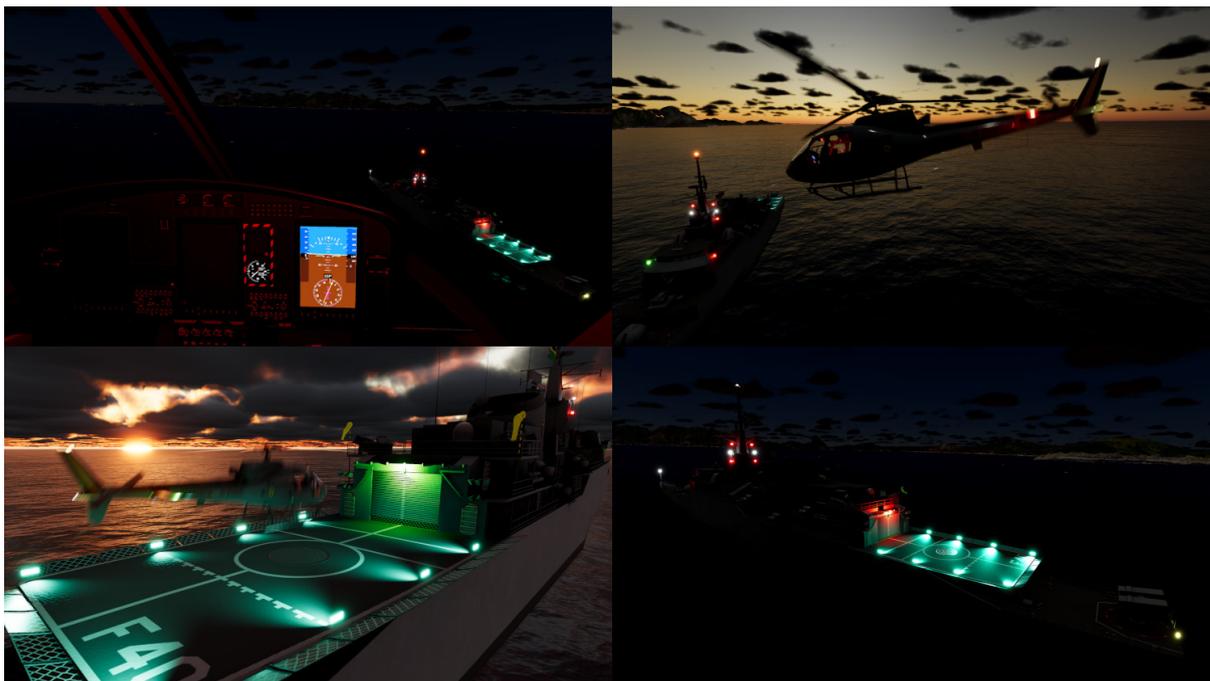


Figura 44 – Iluminação Noturna

podem encontrar em operações reais. Além disso, o instrutor pode intervir a qualquer momento, fornecendo orientações ou modificando as condições da simulação para atender aos objetivos do exercício.

Para permitir esse nível de controle, foi desenvolvido um módulo instrutor dedicado, executado em um computador distinto e conectado via rede ao computador que opera a simulação principal. A comunicação entre os computadores é realizada utilizando o pacote *Netcode for GameObjects*, uma solução oficial da *Unity* (37) para desenvolvimento de aplicações *multiplayer* ou baseadas em rede. Esse pacote fornece uma estrutura que permite sincronizar dados e eventos entre diferentes máquinas, garantindo que as modificações feitas pelo instrutor sejam refletidas de forma imediata no ambiente de simulação.

A Figura 45 apresenta a interface do módulo instrutor, a qual permite alterar:

- Navio:
 - Rumo e velocidade;
 - Luz no convoo (vermelha ou verde);
 - Iluminação do convoo;
 - Luzes de navegação;
 - Bandeiras Hotel e India; e
 - Leitura do rumo, velocidade, balanço e caturro do navio.

- Ambiente:

- Hora do dia (iluminação);
 - Visibilidade (névoa ou neblina);
 - Chuva;
 - Vento (rumo e intensidade);
 - Lua (iluminação noturna);
 - Estado do mar na escala *Beaufort* (47); e
 - Nuvens.
- Helicóptero:
 - Vista do painel;
 - Farol; e
 - Luzes de navegação.

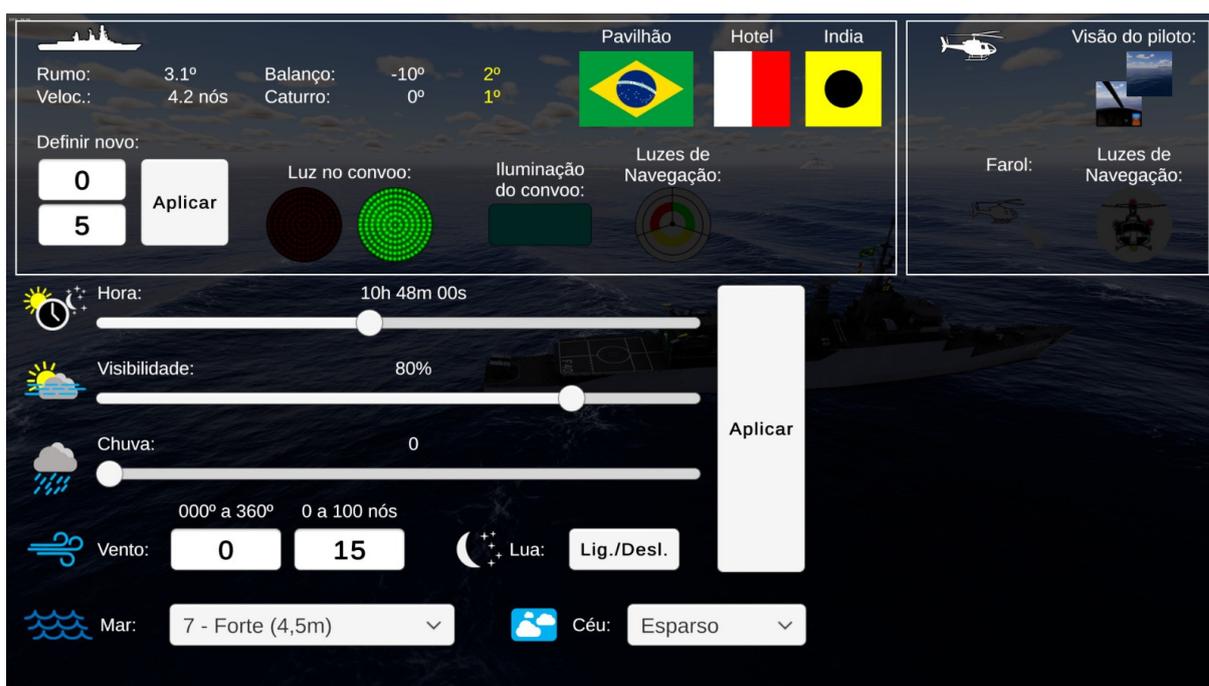


Figura 45 – Módulo do instrutor

A leituras do valores de balanço e caturro são fundamentais para garantir que o piloto execute o pouso dentro do envelope determinado para o conjunto helicóptero-navio, evitando situações de risco. Durante as operações aéreas, a bandeira **Hotel** é içada no mastro principal do navio, sinalizando que a embarcação está realizando operações aéreas. Quando o pouso está autorizado, a bandeira **India** é içada, fornecendo uma indicação clara ao piloto.

Além disso, o estado do mar pode ser configurado no SimPC com base nos 13 graus da escala *Beaufort* (47), que variam desde o grau 0, representando calmaria total sem

ondas, até o grau 12, que simula condições extremas de furacão, com ondas que podem atingir até 14 metros de altura.

O módulo do instrutor também permite acompanhar a simulação de diferentes perspectivas, seja por meio de uma câmera livre, que oferece visão ampla do ambiente, ou por uma câmera em terceira pessoa, configurada para seguir o helicóptero ou o navio. Essas opções garantem ao instrutor uma visão flexível da manobra, facilitando a avaliação do desempenho dos pilotos e a identificação de possíveis melhorias.

4.5 Hardware utilizado

- *PC desktop*: Placa de vídeo Nvidia GeForce RTX 2080 super, processador Intel Core i7-9700KF 3.60GHz, memória RAM 32GB DDR4, utilizado para rodar a simulação;
- *Notebook Alienware x14*: Placa de vídeo Nvidia GeForce RTX 3060 Laptop, processador Intel Core i9-12900HK 5GHz, memória 16GB DDR5, utilizado para rodar o módulo do instrutor;
- Acessórios básicos genéricos: Modem, caixas de som, monitor, teclado, mouse e demais periféricos.
- Estrutura do Simulador Sintético do CIAAN: cabine de helicóptero com controles de cíclico, coletivo, pedais e 3 projetores e telas.

5 COMPARAÇÃO COM TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, será apresentada uma comparação entre trabalhos relacionados e o SimPC. A comparação será realizada de acordo com os quesitos estabelecidos na análise da RSL descritos na Seção 3.3, a saber:

- Tipo de simulador utilizado: Verifica se o estudo utiliza uma ferramenta de simulação customizada, desenvolvida especificamente para a pesquisa, ou um simulador genérico disponível comercialmente (simulador comercial);
 - Modelagem do helicóptero e navio: Analisa se o estudo apresenta a modelagem da aeronave e navio simulados, o que serve de referência para outros trabalhos semelhantes;
 - Utilização de pilotos experientes: Investiga se pilotos experientes foram utilizados para realizar testes e validação do simulador;
 - Funcionalidade de pouso em convoo: Examina se a simulação permite o pouso de helicópteros no convoo de navios em movimento; e
 - Estudo da contribuição para o treinamento: Identifica se o estudo realizou e apresentou uma análise do impacto do simulador no treinamento dos pilotos, avaliando sua eficácia como ferramenta de instrução.
- a) O simulador descrito por Villacís, et al. (25) compartilha semelhanças com o SimPC, como o foco em treinamento de pilotos e o uso do Unity 3D para criar cenários realistas. Contudo, enquanto o SimPC é voltado para o pouso em convoo de helicópteros em ambientes marítimos, aquele estudo se concentra em um ambiente genérico de simulação de aeronaves fixas. Uma diferença marcante é a presença de uma plataforma de movimento físico no artigo analisado, enquanto o SimPC depende mais de simulação visual e controle manual.
- b) O trabalho de Doneda, et. al. (26) compartilha similaridades com o SimPC, como o uso de tecnologias de simulação para treinar militares envolvidos com operações de pouso em condições específicas. Contudo, enquanto o SimPC foca no pouso em convoo de helicópteros em navios em movimento, este estudo centra-se na sinalização visual, sendo uma etapa complementar ao treinamento de pouso. Uma oportunidade interessante seria integrar o simulador de sinalização do artigo ao SimPC, para criar um simulador mais completo, onde a equipe de sinalização possa treinar em conjunto com os pilotos, promovendo um treinamento mais completo e realista.

-
- c) O estudo de Lung-Nan Wu (27) apresenta paralelos significativos com o SimPC, incluindo o uso de componentes de baixo custo na aplicação de tecnologias como o *X-Plane* (38) para simulação. Contudo, o SimPC foca em operações específicas, como o pouso de helicópteros em convoo, enquanto este trabalho se concentra em uma aeronave de asa fixa. Além disso, aquele simulador descrito incorpora um cockpit físico completo e um sistema de *feedback* de força.
- d) O estudo de Sebastian Topczewski et. al. (28) possui várias similaridades com o SimPC, como o foco em operações de pouso de helicópteros em ambientes marítimos. Contudo, enquanto o SimPC oferece controle manual para treinar pilotos em pousos em convoo, este trabalho desenvolve controle automático baseado em previsões dinâmicas e algoritmos de controle *LQR* (*Linear Quadratic Regulator*). O estudo comparado utiliza equações harmônicas simplificadas para descrever a posição do navio, limitando a complexidade dos movimentos simulados, diferente do SimPC que modela toda a interação do navio com as ondas.
- e) O trabalho de Mora-Soto et al. (29) apresenta semelhanças com o SimPC, como o uso do Unity 3D e a busca por realismo na simulação de cenários. Contudo, o foco deste artigo está na teleoperação de quadrotors, enquanto o SimPC se concentra no pouso de helicópteros em convoo. Apesar das propostas de ambos os estudos serem distintas, o SimPC preza pela interação com o ambiente simulado, incluindo a capacidade de simular a resposta aerodinâmica da aeronave ao vento, colisões entre a aeronave e o navio, e a interação entre o navio e as ondas. Adicionalmente, o SimPC incorpora um cockpit com controles físicos, proporcionando *feedback* tátil ao piloto, e utiliza uma tela de projeção de grande proporção para aumentar a imersão.
- f) O estudo de Wei Wang et. al. (30) apresenta similaridades com o SimPC, especialmente na atenção aos detalhes aerodinâmicos e na busca por realismo nas simulações de voo. Contudo, enquanto o SimPC se concentra no pouso de helicópteros em convoo com navios em movimento, este artigo abrange operações mais gerais, como hovering e manobras diversas. O modelo aerodinâmico apresentado por Wei Wang et al. (30) é caracterizado por sua alta complexidade computacional, o que pode demandar sistemas de alto desempenho para sua execução. Por outro lado, o modelo utilizado no SimPC é projetado com maior flexibilidade, permitindo ao desenvolvedor ajustar a resolução do modelo conforme necessário, equilibrando a precisão com o custo computacional.
- g) O estudo de Neda Taymourtash et. al. (31) compartilha objetivos semelhantes aos do SimPC, como a simulação de pousos de helicópteros em convoo em uma fragata. Entretanto, o foco principal do trabalho está nas medições experimentais e na integração de um modelo de distorção do fluxo de ar gerado pela superestrutura

do navio. Esse modelo busca representar com precisão as alterações no escoamento aerodinâmico que afetam diretamente a sustentação do helicóptero posicionado na zona de influência desse fluxo turbulento.

- h) Ieuan Owen et. al. (19): O NATO-GD apresenta similaridades com o SimPC, como o foco em operações de pouso em conveses móveis e o uso de simulação computacional para modelar a interação helicóptero-navio. Contudo, enquanto o SimPC utiliza o *Unity* (37) para criar ambientes simulados em Realidade Virtual, com foco no treinamento prático de pilotos, o NATO-GD é voltado para a validação de modelos aerodinâmicos e dinâmicos. Esta abordagem distinta do SimPC permite que o simulador seja testado e avaliado diretamente por pilotos.
- i) O simulador descrito por Aláez, D. et al. (32) integra um simulador comercial (*X-Plane* (38)) e é voltado para *UAVs VTOL* com ênfase em transições entre modos de voo. O SimPC, por sua vez, é um simulador de helicópteros customizado criado para simular o desafio específico de pousos em conveses móveis. Um diferencial do SimPC é a aplicação de pilotos militares para testes e avaliação do simulador e sua contribuição para o treinamento.
- j) O estudo de Yanting Huang et. al. (33) compartilha semelhanças com o SimPC, como o foco em operações de pouso de helicópteros em navios em movimento, contudo possui limitações no que diz respeito a simular condições da mar extremas. É dedicado a helicópteros não tripulados com controle autônomo, enquanto que o SimPC é projetado para treinamento de pilotos humanos. Por outro lado, o SimPC destaca-se por sua capacidade de simular condições severas de mar, abrangendo todos os níveis da escala Beaufort (0 a 12) (47).
- k) Embora o estudo de Xinfan Yin et al. (34) seja focado em helicópteros híbridos compostos de alta velocidade, ele compartilha aspectos relevantes com o SimPC, como a necessidade de modelar características aerodinâmicas complexas para alcançar simulações realistas. No entanto, enquanto o SimPC é projetado para o treinamento de pilotos de helicópteros em pousos em conveses móveis, este trabalho concentra-se em análises detalhadas de rotor e no desenvolvimento de estratégias de controle.
- l) Mathieu Thomas et. al. (35): O estudo foca em uma ferramenta em RV para aprimorar decisões de pouso, enquanto o SimPC é um simulador dedicado ao treinamento de pilotos em todas as fases deste tipo de manobra, com parâmetros de ambiente ajustáveis. Diferentemente da simulação simplificada do ambiente, helicóptero e navio apresentada por Mathieu Thomas et. al. (35), o SimPC busca alcançar maior fidelidade e imersão, simulando com realismo os efeitos físicos que atuam sobre a aeronave e o navio, além de incorporar variáveis ambientais como clima e condições do mar.

- m) O SimPC e o estudo com helideck ativo de Weihan Qiu et. al. (36) compartilham o objetivo de abordar a interface dinâmica entre helicópteros e navios em movimento. Contudo, o SimPC foca no treinamento de pilotos humanos em pousos em convoo, enquanto o helideck ativo busca soluções mecânicas para mitigar forças de impacto.

5.1 Resumo das comparações

Nesta seção, será apresentado um resumo das principais contribuições do SimPC em relação aos demais trabalhos relacionados, utilizando os mesmos quesitos observados no início deste capítulo. É importante destacar que cada quesito aqui analisado não necessariamente representa uma lacuna de todos os trabalhos relacionados, mas sim de parte deles. Dessa forma, esta pesquisa não apenas se posiciona como uma alternativa diferenciada, mas também como uma contribuição complementar aos estudos existentes, ampliando as possibilidades de desenvolvimento na área de simulação e treinamento de pilotos.

- **Tipo de simulador utilizado:** Entre os trabalhos analisados, oito dos treze utilizaram simuladores customizados para suas pesquisas, enquanto os demais adotaram simuladores comerciais ou modelos físicos. Entre os simuladores customizados, a *Unity* (37) foi a plataforma de desenvolvimento mais utilizada, destacando-se por sua flexibilidade e capacidade de criar ambientes interativos em Realidade Virtual. Nos trabalhos que optaram por simuladores comerciais, a *X-Plane* (38) foi a solução predominante, sendo frequentemente escolhidos por suas funcionalidades prontas para uso.

Diferentemente de soluções comerciais, o SimPC segue a abordagem de simulador customizado, utilizando a *Unity* (37) como base para o desenvolvimento de ambientes simulados em Realidade Virtual. Essa escolha permite que o SimPC seja adaptado diretamente às necessidades específicas do meio militar, garantindo uma maior fidelidade em simular os detalhes inerentes às operações de pouso em convoo enfrentados pelos pilotos da MB.

- **Modelagem do helicóptero e navio:** A maioria dos trabalhos analisados incluiu a modelagem do sistema desenvolvido, servindo como referência para estudos na área de simulação de voo. No entanto, as abordagens adotadas variaram significativamente, desde modelos simplificados até representações mais fiéis e realistas. O SimPC diferencia-se por apresentar uma modelagem própria, que abrange não apenas as características do helicóptero, mas também aspectos relacionados ao oceano, à interação entre o navio e as ondas, e aos efeitos físicos que influenciam essas dinâmicas. Essa abordagem permite uma simulação mais realista, destacando-se dos trabalhos analisados que utilizaram modelos simplificados.

O SimPC adota uma modelagem flexível, permitindo ao desenvolvedor ajustar a resolução do modelo para equilibrar o custo computacional e a fidelidade da simulação. Ele é capaz de simular condições severas de mar e clima, incluindo todos os níveis da escala Beaufort (0 a 12), vento, chuva e visibilidade. Além disso, modela as principais forças atuantes no casco do navio, as ondas do mar e a interação dinâmica entre o navio e as ondas. Também considera a interação do helicóptero com o vento, além de reproduzir colisões entre o helicóptero e o navio, ampliando o realismo do treinamento.

Outro destaque do SimPC é sua integração com o ambiente de simulação, que inclui um cockpit com controles físicos, proporcionando *feedback* tátil ao piloto, e uma tela de projeção de grande escala para aumentar a imersão. Essas características tornam o SimPC um ferramenta capaz de simular com fidelidade os detalhes mais importantes das operações de pouso de helicóptero em convoo de navio em movimento.

- **Utilização de pilotos experientes:** Entre os trabalhos analisados, apenas um utilizou pilotos experientes para a validação do simulador, destacando a ausência dessa etapa como uma lacuna em grande parte dos estudos. A participação de pilotos experientes é fundamental para avaliar a eficácia, a fidelidade e a aplicabilidade prática das simulações, garantindo que os sistemas desenvolvidos atendam às demandas reais de treinamento e operação.

O SimPC diferencia-se por incluir testes práticos realizados por pilotos militares experientes, que participaram ativamente do processo de avaliação. Além de validar a eficácia do simulador como ferramenta de treinamento, os pilotos forneceram *feedback* valioso, contribuindo para ajustes e refinamentos no sistema. Essa abordagem não apenas reforça a confiabilidade do SimPC, mas também assegura sua aderência às necessidades operacionais do meio militar.

- **Funcionalidade de pouso em convoo:** Entre os trabalhos analisados, sete dos treze abordaram, de alguma forma, a questão do pouso em convoo, embora com diferentes abordagens. Essas variações incluíram estudos focados em aspectos de engenharia, aerodinâmica, automação do pouso e treinamento de pilotos. Alguns trabalhos concentraram-se em aeronaves de asa fixa, enquanto outros foram dedicados a helicópteros.

Nem todos os simuladores analisados possuíam a funcionalidade de pouso em convoo, o SimPC, por outro lado, diferencia-se por ter sido projetado especificamente para este tipo de operação. Seu foco está na preparação de pilotos de helicópteros para execução com sucesso de todas as etapas do pouso em convoo, sob quaisquer condições climáticas, desde as mais simples às mais desafiadoras.

- **Estudo da contribuição para o treinamento:** Entre os trabalhos analisados, apenas três dos treze realizaram um estudo específico sobre a contribuição do simulador para o treinamento dos pilotos. Essa lacuna destaca a importância de validar a eficácia do simulador como ferramenta de instrução, especialmente em cenários desafiadores. Avaliações que medem o impacto direto do simulador no treinamento são fundamentais para garantir que a tecnologia desenvolvida atenda às necessidades práticas de adestramento e formação dos pilotos.

O SimPC diferencia-se ao realizar uma avaliação qualitativa, envolvendo pilotos militares experientes que participaram de testes práticos. Essa avaliação foi conduzida por meio de um questionário específico, cujos resultados foram descritos na Seção 6.6. Os pilotos forneceram um *feedback* sobre a qualidade, aplicabilidade e eficácia do SimPC, o que contribuiu para a validação e aprimoramento contínuo do SimPC.

A Tabela 2 apresenta um resumo comparativo entre o SimPC e os trabalhos relacionados. Embora seja complementar aos demais estudos, o SimPC destaca-se como a única pesquisa que aborda de forma abrangente todos os quesitos e lacunas identificados nesta análise.

Tabela 2 – Comparação com os trabalhos relacionados

| | REFERÊNCIA | TIPO DE SIMULADOR UTILIZADO | APRESENTA MODELAGEM DO HELICÓPTERO E NAVIO | UTILIZA PILOTOS EXPERIENTES | POSSUI FUNÇÃO DE POUSO EM CONVOO | REALIZA ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO PARA O TREINAMENTO |
|----|---|--|---|-----------------------------|----------------------------------|---|
| a) | César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches (25). | Customizado Unity e LabVIEW | Aeronave: Sim (avião) Navio: Não | Sim | Não | Sim |
| b) | Antônio Doneda, et. al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML into a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training (26). | Customizado Unity | Aeronave: Não Navio: Não | N/A | Sim | Sim |
| c) | Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device (27). | Comercial X-Plane | Aeronave: Sim (avião) Navio: Não | Não | Não | Não |
| d) | Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Confined Platform (28). | Comercial FLIGHTLAB | Aeronave: Sim (avião) Navio: Sim | Não | Sim | Não |
| e) | Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Virtual Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation (29). | Customizado Unity | Aeronave: Sim (UAV) Navio: Não | N/A | Não | Não |
| f) | Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation (30). | Customizado VC++ | Aeronave: Sim (helicóptero) Navio: Não | Não | Não | Não |
| g) | Neda Taymourash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations (31). | Modelo físico em escala | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | N/A | Sim | Não |
| h) | Ieuan Owen, et. al. (2021). The NATO generic destroyer – a shared geometry for collaborative research into modelling and simulation of shipboard helicopter launch and recovery (19). | Comercial FLIGHTLAB; e Modelo físico em escala | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | Não | Sim | Sim |
| i) | Aláez, D. et al. (2022) HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane (32). | Comercial X-Plane | Aeronave: Sim (UAV) Navio: Não | Não | Não | Não |
| j) | Yanting Huang, et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint (33). | Customizado | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | N/A | Sim | N/A |
| k) | Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter (34). | Customizado Matlab/Simulink; e Modelo físico | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Não | Não | Não | Não |
| l) | Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions (35). | Customizada Unity | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | Não | Sim | Não |
| m) | Weihan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart latform (36). | Customizado Matlab/Simulink | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | Não | Sim | Não |
| | ESTA PESQUISA | Customizado Unity | Aeronave: Sim (Helicóptero) Navio: Sim | Sim | Sim | Sim |

6 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Após o desenvolvimento do SimPC, foi preciso verificar, de forma prática, sua capacidade de contribuir efetivamente para o adestramento de pilotos na execução de pousos em convoo de navios em movimento. Para alcançar esse objetivo, a metodologia adotada consistiu nos seguintes passos:

- Integração com infraestrutura de um simulador profissional: O SimPC foi configurado para operar em um ambiente equipado com hardware de simuladores profissionais, incluindo controles realistas e uma tela de projeção;
- Participação de pilotos experientes: Pilotos com experiência prévia em operações de pouso em convoo foram convidados a utilizar o SimPC, garantindo uma avaliação fundamentada;
- Realização de voos de teste: Os pilotos voaram e executaram o pouso em quatro cenários sob condições climáticas e de visibilidade distintas;
- Análise de dados de desempenho: Os dados gerados durante os voos simulados foram coletados e processados, buscando analisar o desempenho e validar a adequação do simulador às condições reais de operação; e
- Avaliação qualitativa: Foi aplicado um questionário estruturado para capturar o *feedback* dos pilotos quanto à eficiência, realismo e aplicabilidade do SimPC no contexto do treinamento.

6.1 Integração com infraestrutura de um simulador profissional

O CIAAN conta com o chamado *Simulador Sintético* que pode ser visto na Figura 46, utilizado para o treinamento de pilotos em procedimentos básicos e para a familiarização com a pilotagem de helicópteros. Este simulador emprega o software comercial *X-Plane* (38) na versão 8, adaptado com customizações específicas, como a inclusão do modelo 3D da Base Aeronaval de São Pedro da Aldeia. Essa personalização permite que os pilotos realizem decolagens, voos e pousos no mesmo aeródromo em que treinam com as aeronaves reais.

O SimPC foi projetado para ser integrado à estrutura e ao hardware disponíveis no *Simulador Sintético* do CIAAN. Para viabilizar essa integração, foi necessário configurar a câmera do simulador para renderização em três telas simultâneas, além de adaptar o código para estabelecer comunicação com os controles reais de cíclico, coletivo e pedais, instalados na cabine, garantindo a fidelidade necessária ao treinamento.



(a) Sala do Simulador Sintético



(b) Cockpit com painel e controles

Figura 46 – Simulador Sintético no CIAAN

6.2 Participação de pilotos experientes

A avaliação do SimPC por pilotos experientes foi um aspecto central deste estudo, dado que esses profissionais possuem amplo conhecimento sobre o comportamento e a resposta do helicóptero aos comandos, bem como sobre os procedimentos e as dificuldades específicas das operações de pouso.

Além de avaliarem o simulador, os pilotos contribuíram ativamente para seu aprimoramento, sugerindo instrumentos essenciais para navegação e pouso, indicando os principais efeitos físicos que devem ser simulados, destacando elementos cruciais de sinalização para o cumprimento dos procedimentos e auxiliando na calibração dos parâmetros físicos e dos controles da aeronave modelada no SimPC.

Ao todo, participaram da pesquisa **seis pilotos**, dos quais dois são instrutores com ampla experiência de voo e atuação na formação e adestramento de novos pilotos da MB. Após os exercícios e testes realizados no SimPC, todos os pilotos responderam a um questionário de avaliação qualitativa, detalhado na Seção 6.6, no qual avaliaram a fidelidade, funcionalidade e eficácia do simulador como ferramenta de treinamento.

6.3 Realização de voos de teste

A etapa seguinte consistiu na calibração dos parâmetros físicos e de sensibilidade dos controles do modelo da aeronave. Esse processo foi conduzido com base no *feedback* fornecido pelos pilotos mais experientes, que avaliaram a resposta da aeronave aos comandos enquanto os parâmetros eram ajustados progressivamente até que o comportamento esperado fosse alcançado. A calibração foi concluída após aproximadamente 8 horas de trabalho.

Posteriormente, cada piloto passou por cerca de 1 hora de adaptação ao SimPC,

familiarizando-se com o modelo da aeronave por meio de voos livres, decolagens, pousos e testes dos limites operacionais. Durante essa etapa, observou-se que alguns pilotos, qualificados para operar aeronaves distintas com características de responsividade diferentes do H125 Esquilo, enfrentaram uma curva de adaptação mais longa, demandando maior tempo para ajustar-se às particularidades do H125.

Para a execução dos exercícios, foram elaborados quatro cenários simulados, representando condições distintas de meteorologia, estado do mar e visibilidade, distribuídos em níveis de dificuldade variados. Cada piloto realizou cinco voos em cada cenário, totalizando 20 voos por participante. Com a participação de seis pilotos nos exercícios, foi registrado um total de **120 voos**. O tempo médio despendido para a execução dos exercícios foi de aproximadamente 3 horas por piloto.

Para todos os cenários, a simulação inicia com a aeronave pousada sobre uma plataforma marítima fixa, a 16 metros acima do nível do mar. A Fragata Niterói encontra-se a uma distância de 547 *jardas* ($\approx 500\text{ m}$), navegando no rumo 000° com uma velocidade de 15 *nós* ($\approx 28\text{ Km/h}$). A Figura 47 ilustra a situação inicial onde o helicóptero pode ser observado no canto inferior esquerdo e o navio no canto superior direito. O piloto precisa, então, decolar o helicóptero da plataforma, voar até o navio e executar o pouso no convoo.

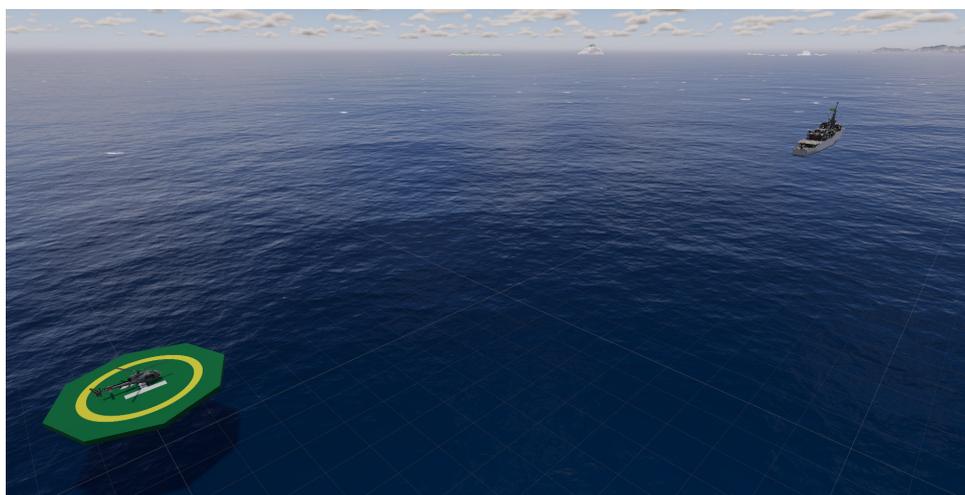


Figura 47 – Situação inicial da simulação

Concluída a etapa prática, os pilotos responderam a um questionário de avaliação qualitativa, cuja análise será detalhada em seção subsequente. A Figura 48 apresenta de forma resumida o fluxo da participação prática dos pilotos no experimento.

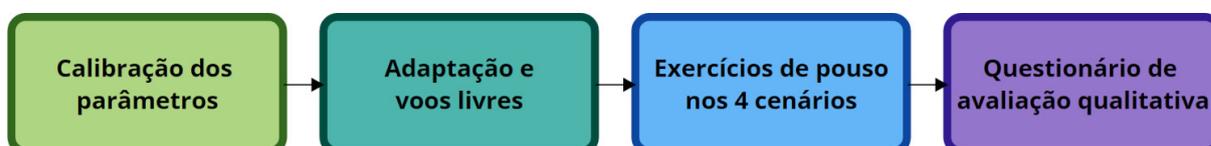


Figura 48 – Fluxo de participação prática dos pilotos no experimento

6.4 Análise de dados de desempenho

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos durante os voos realizados no SimPC. É importante destacar que o SimPC é um protótipo ainda em fase de desenvolvimento, o que pode implicar em limitações técnicas que impactem a experiência dos pilotos. Dessa forma, eventuais erros cometidos durante os voos refletem, predominantemente, essas limitações do simulador e não a capacidade técnica dos pilotos participantes. Ressalta-se, portanto, que os pilotos estavam avaliando o desempenho e a funcionalidade do SimPC, e não sendo avaliados por ele.

Para possibilitar a reconstrução e análise dos voos realizados no SimPC, os dados de simulação foram registrados a cada 0,5 segundos. Os parâmetros gravados incluem:

- tempo decorrido durante a simulação;
- posição, rotação e velocidade da aeronave e navio;
- estado dos controles da aeronave (cíclico, coletivo e pedais);
- ocorrência de colisões com navio ou com a água;
- sinalizações náuticas ativas no momento do voo;
- condições ambientais, incluindo hora do dia, visibilidade, chuva, vento, mar e presença de nuvens; e
- velocidade de impacto da aeronave com o convoo.

O processamento dos dados registrados, bem como os cálculos estatísticos e a geração de gráficos, foi realizado utilizando código desenvolvido em Python v3.1 (48). O desenvolvimento foi feito na IDE PyCharm 2023.2 (Community Edition) (49), com suporte das bibliotecas `numpy` (50) e `matplotlib` (51).

6.4.1 Cenário 1

O Cenário 1 foi planejado para ter as condições de clima, visibilidade e estado do mar mais favoráveis, a **situação ideal**, dentro do envelope de pouso da aeronave, com os parâmetros de configuração definidos de acordo com a Tabela 3. A visibilidade é representada em uma escala não linear de 0 a 100, onde 0 corresponde à visibilidade mínima, simulando neblina densa. A ativação da iluminação lunar contribui para a claridade nos cenários noturnos. O estado do mar é descrito pela escala de Beaufort, variando de 0 (calmaria) a 12 (condições tempestuosas). A Figura 49 ilustra a configuração final do Cenário 1.

Tabela 3 – Cenário 1 - Parâmetros de configuração

| Hora (24h) | Visibilidade (0 a 100) | Chuva (0 a 100) | Vento (nós) | Vento (360°) | Lua (luz) | Mar (0 a 12) | Ondas (m) | Nuvens |
|------------|------------------------|-----------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|----------|
| 12h | 80 | 0 | 15 | 000° | off | 0 | 0m | esparsas |

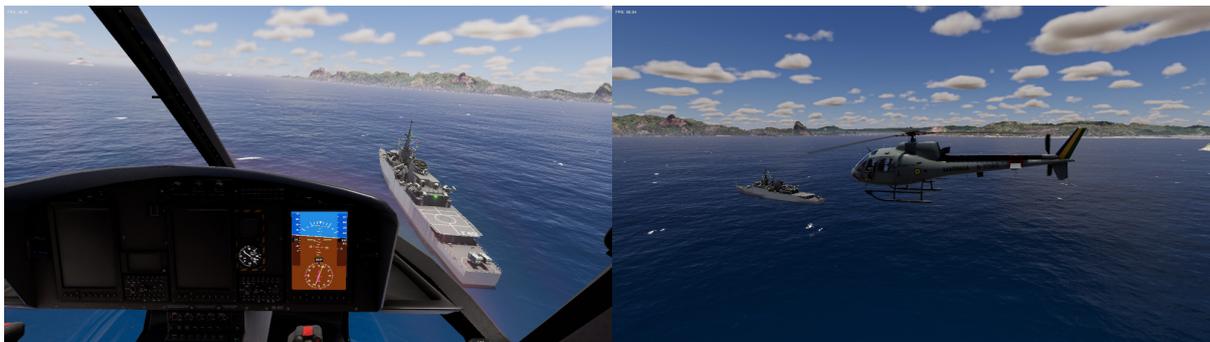
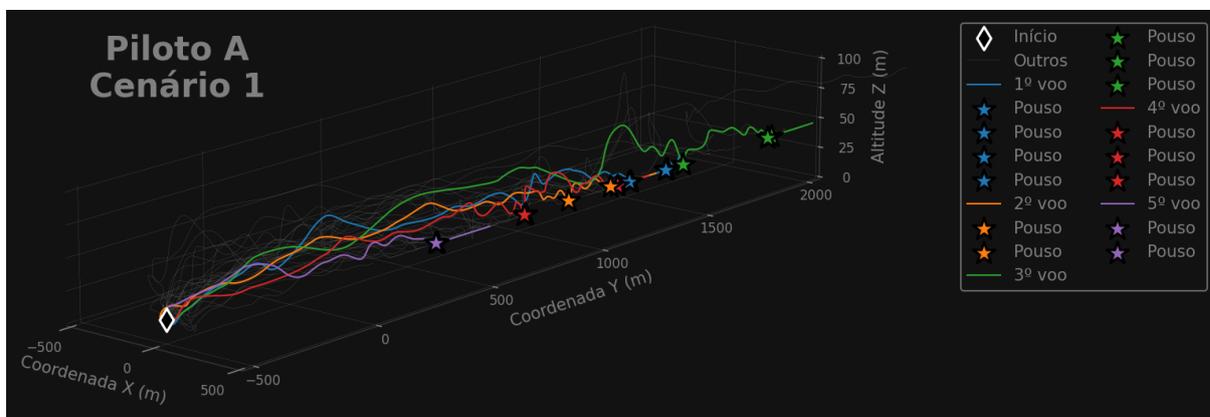
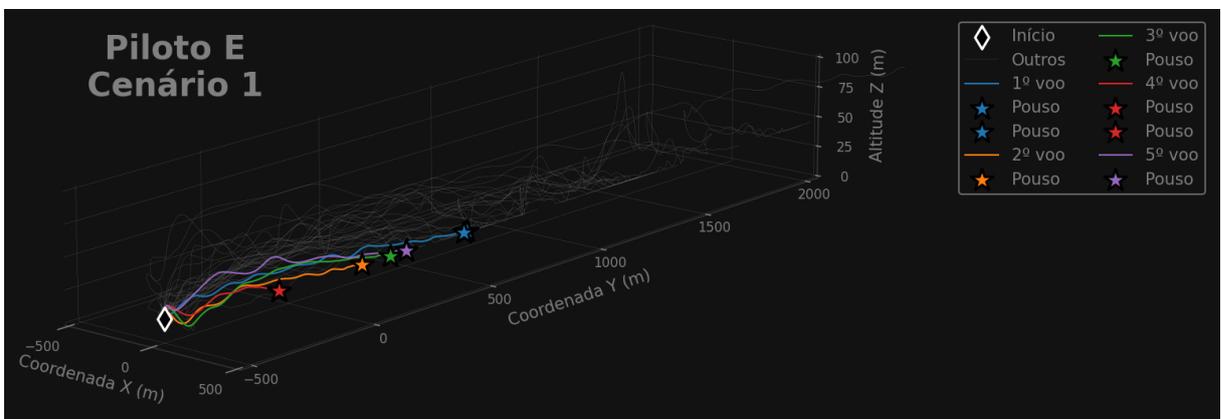
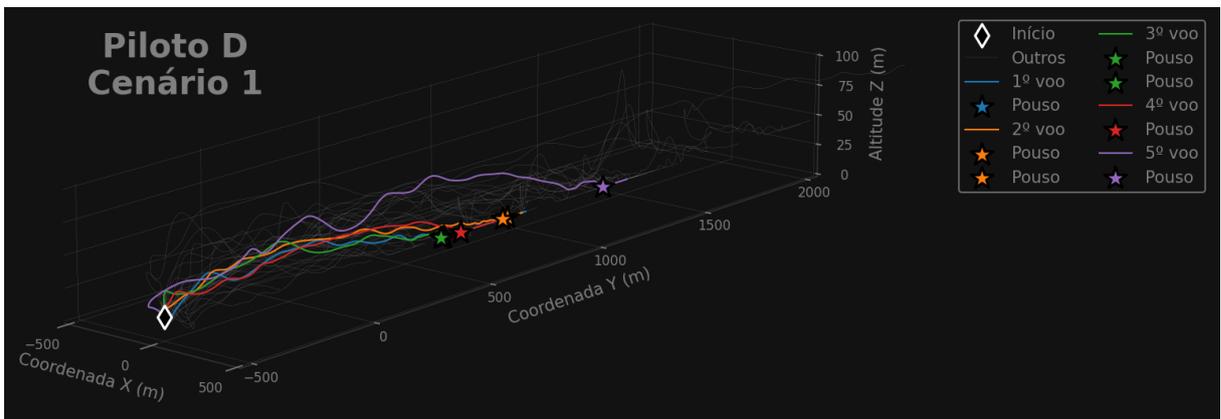
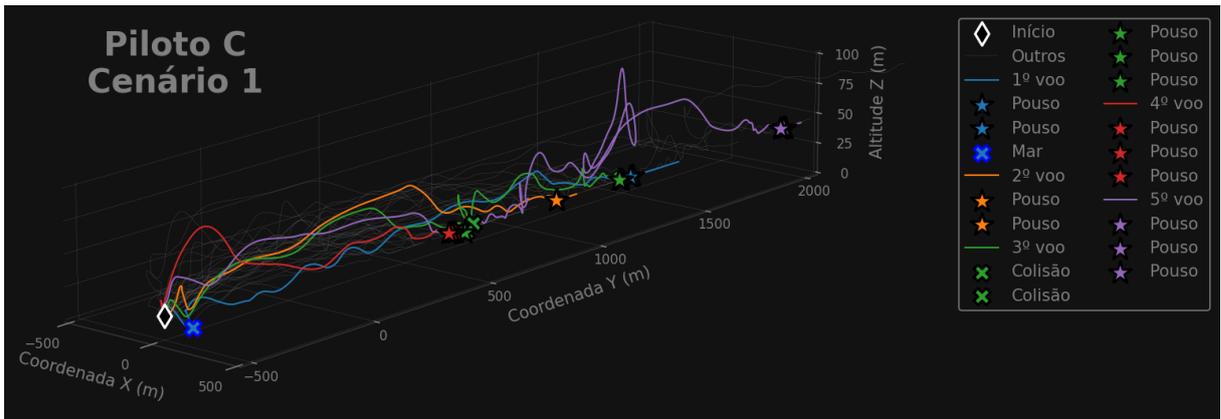
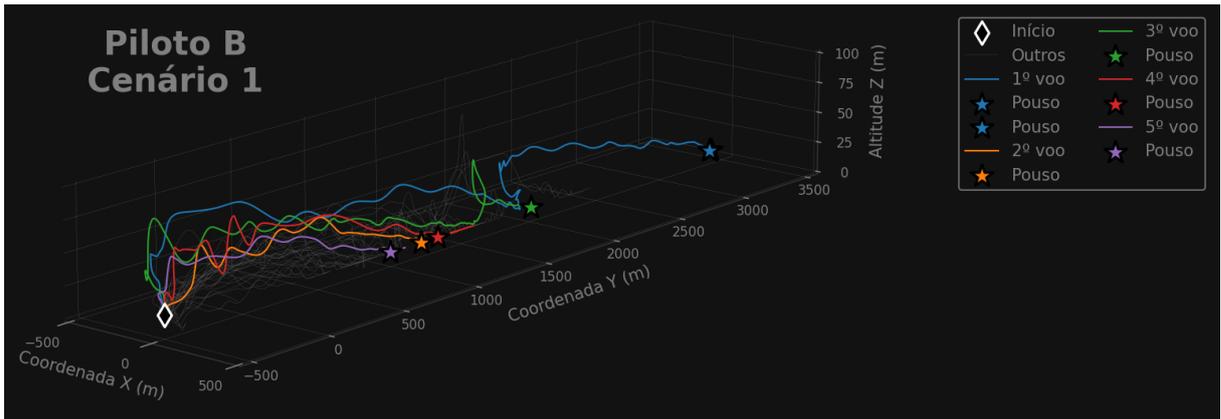


Figura 49 – Cenário 1

6.4.1.1 Resultados dos voos

A Figura 50 ilustra os trajetos realizados pelos seis pilotos durante os cinco voos no Cenário 1. O símbolo branco em forma de **diamante (Início)** indica o ponto de partida e decolagem do helicóptero a partir da plataforma. As trajetórias em cinza representam os percursos realizados pelos demais pilotos. O símbolo de uma **estrela (pouso)** indica o momento em que a aeronave toca o convoo do navio. Em alguns voos, observa-se mais de um registro de pouso, pois os pilotos, em certas ocasiões, optaram por arremeter após o toque inicial. Essa decisão pode ter sido motivada por fatores como evitar um impacto brusco, reposicionar a aeronave no convoo, prevenir o risco de colisão com o navio ou evitar que a aeronave deslize para a água. O símbolo 'x' indica ocorrências de **colisão** com o navio ou com o mar.





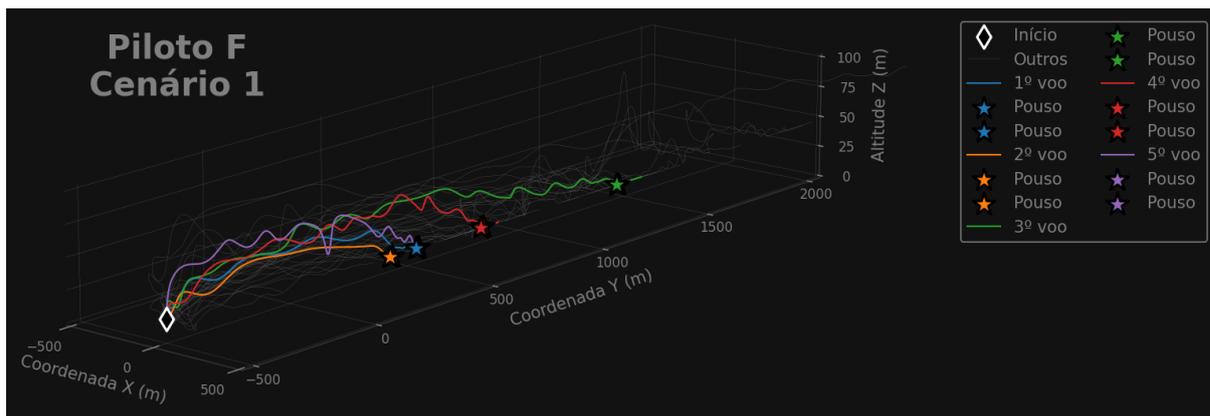


Figura 50 – Trajeto dos voos - Cenário 1

6.4.2 Cenário 2

O Cenário 2 foi projetado para manter as condições climáticas, de visibilidade e estado do mar dentro do envelope de pouso da aeronave, porém com um nível de dificuldade superior ao do Cenário 1. A principal diferença reside no estado do mar, que apresenta ondas mais agitadas, atingindo 2,5 metros de altura. Além disso, a visibilidade e a iluminação foram ligeiramente reduzidas. Os parâmetros de configuração desse cenário estão apresentados na Tabela 4. A Figura 51 ilustra a configuração visual do Cenário 2.

Tabela 4 – Cenário 2 - Parâmetros de configuração

| Hora (24h) | Visibilidade (0 a 100) | Chuva (0 a 100) | Vento (nós) | Vento (360°) | Lua (luz) | Mar (0 a 12) | Ondas (m) | Nuvens |
|------------|------------------------|-----------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| 7h | 60 | 0 | 15 | 000° | off | 5 | 2,5m | encoberto |

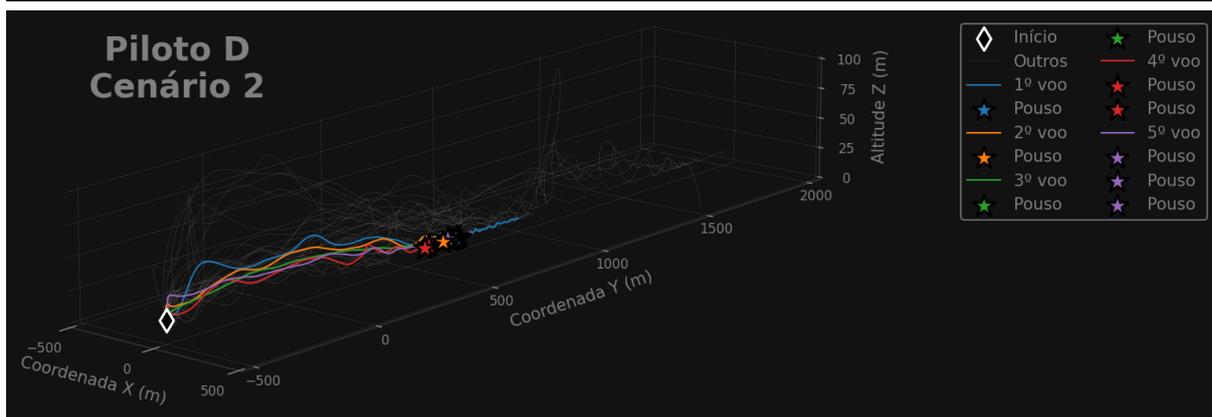
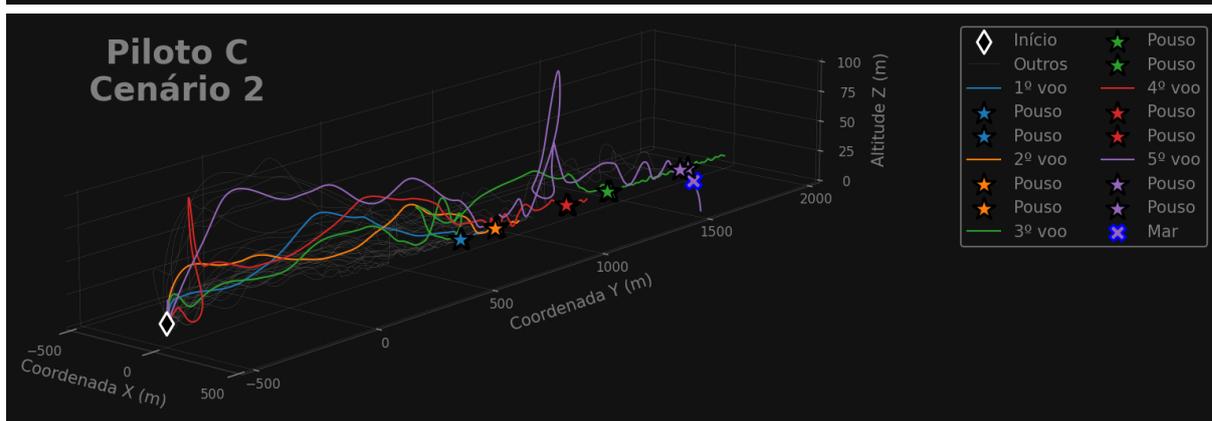
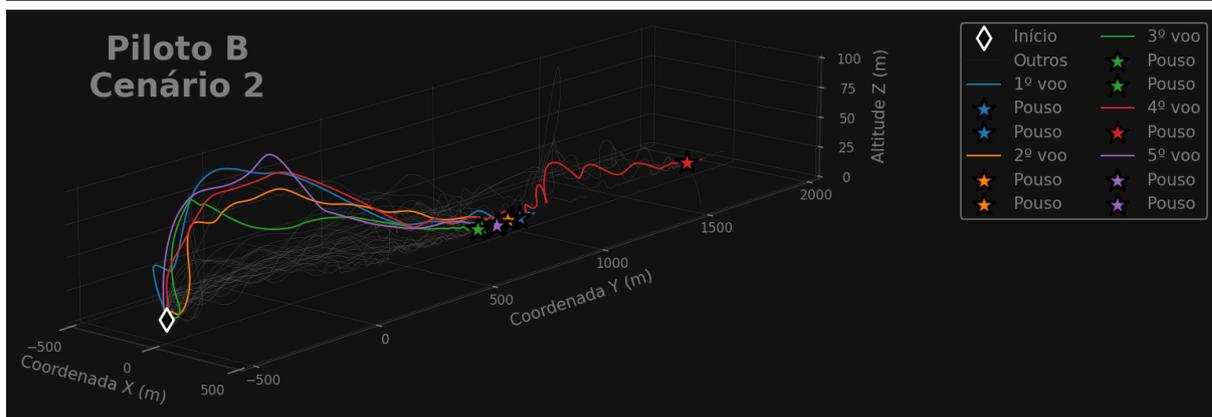
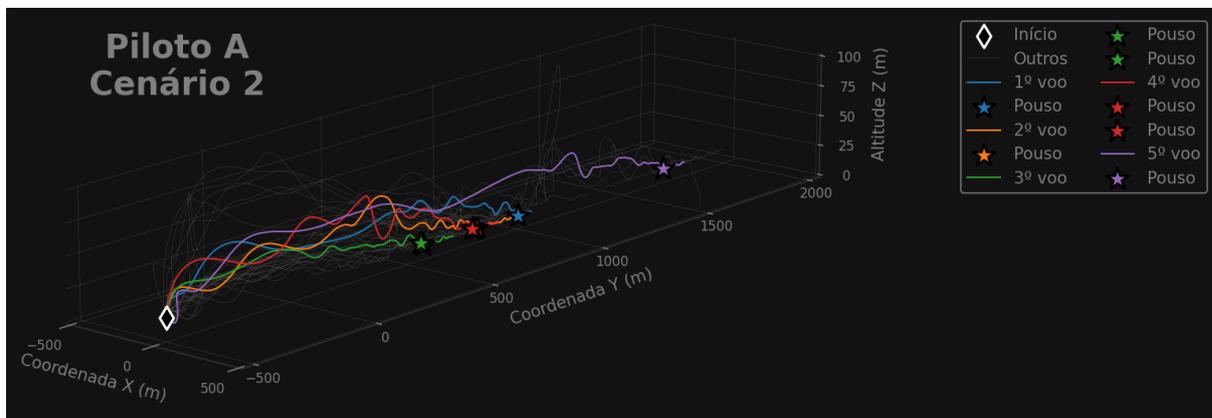


Figura 51 – Cenário 2

6.4.2.1 Resultados dos voos

A Figura 52 apresenta os trajetos seguidos pelos pilotos no Cenário 2. Embora este cenário seja ligeiramente mais desafiador que o Cenário 1, os pilotos A, C e D demonstraram maior eficiência, realizando o pouso de forma mais rápida e cometendo menos erros. c e

à familiaridade adquirida com a resposta da aeronave aos controles. O piloto B adotou uma estratégia distinta durante a decolagem, priorizando inicialmente um ganho maior de altitude. Já o piloto F encontrou um pouco mais de dificuldade, o que estava dentro das expectativas previstas.



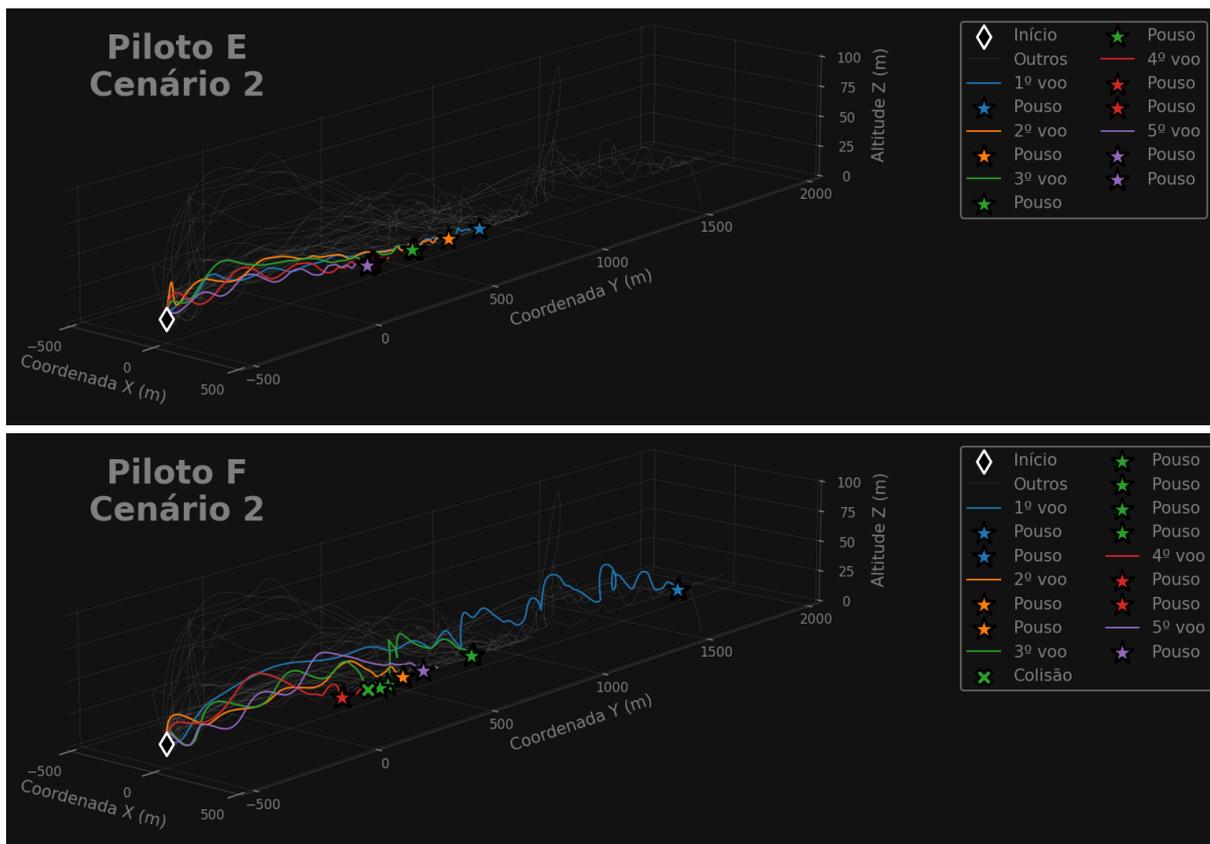


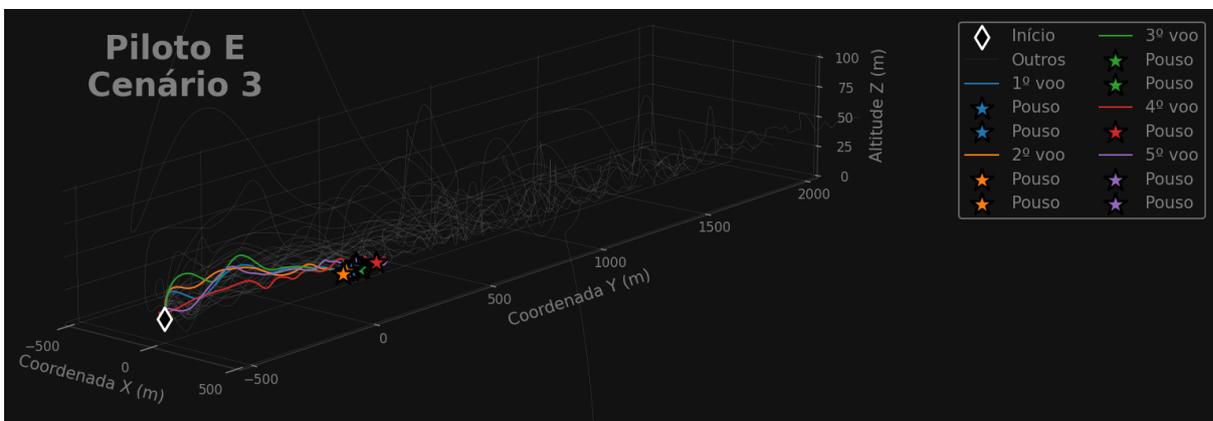
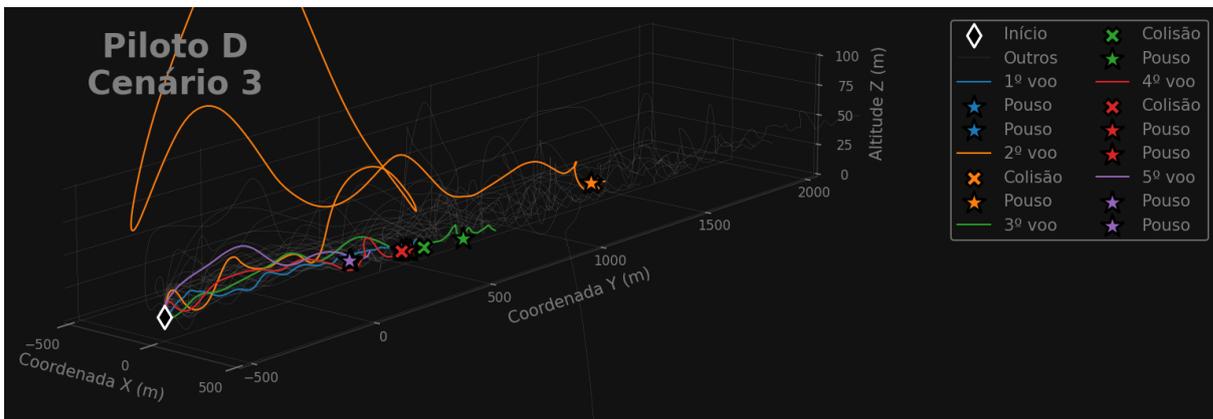
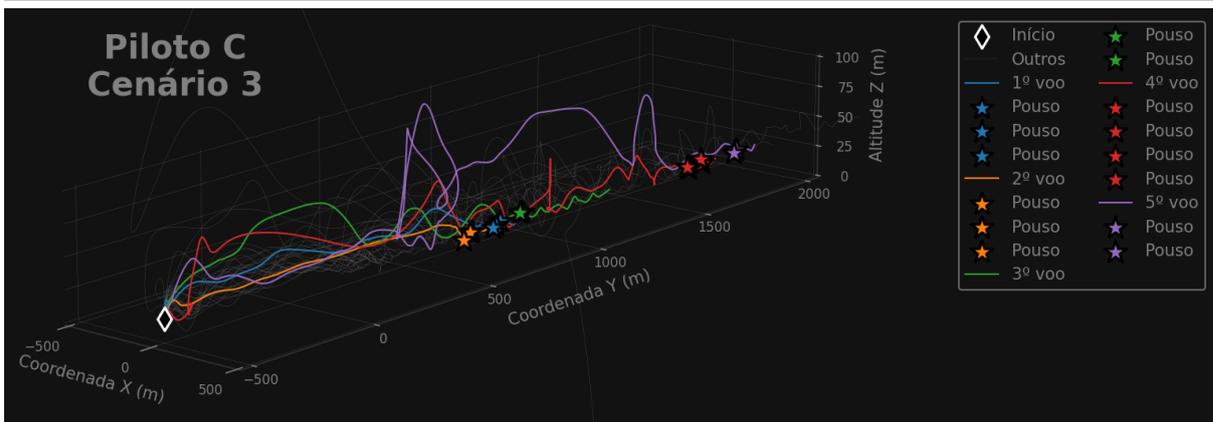
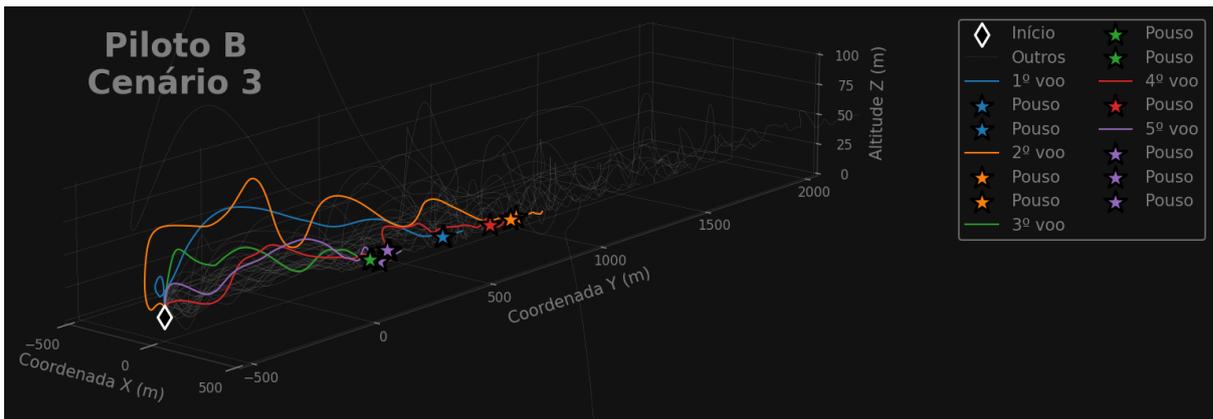
Figura 52 – Trajeto dos voos - Cenário 2

6.4.3 Cenário 3

O Cenário 3 foi projetado para representar as condições mais severas dentre todos os cenários simulados, reproduzindo um ambiente tempestuoso e fora do envelope operacional de pouso da aeronave. As principais diferenças em relação aos demais cenários incluem um mar extremamente agitado, com ondas de até 5 metros de altura, resultando em balanço e caturro intensos e além dos limites operacionais permitidos. Adicionalmente, há a presença de vento relativo com um desvio de 15° e intensidade dobrada (30 nós), visibilidade drasticamente reduzida devido à presença de neblina e chuva intensa, além da baixa luminosidade causada por nuvens densas. Esse conjunto de fatores faz do Cenário 3 o mais desafiador da simulação. Os parâmetros específicos deste cenário estão detalhados na Tabela 5. A Figura 53 ilustra a configuração visual desse ambiente extremo.

Tabela 5 – Cenário 3 - Parâmetros de configuração

| Hora (24h) | Visibilidade (0 a 100) | Chuva (0 a 100) | Vento (nós) | Vento (360°) | Lua (luz) | Mar (0 a 12) | Ondas (m) | Nuvens |
|------------|------------------------|-----------------|-------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------|-------------|
| 8h | 50 | 80 | 30 | 015° | off | 8 | 5m | tempestuoso |



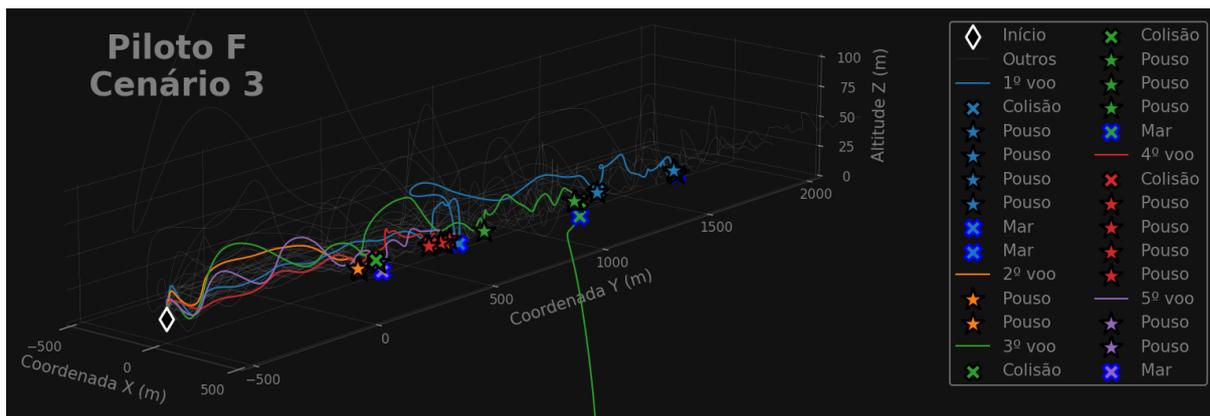


Figura 54 – Trajeto dos voos - Cenário 3

6.4.4 Cenário 4

O Cenário 4 foi pensado para ter condições de clima e estado do mar favoráveis, porém com visibilidade comprometida por ser um cenário noturno, fora do envelope de pouso da aeronave que não deve operar durante a noite. Os parâmetros de configuração foram definidos de acordo com a Tabela 6. A Figura 55 ilustra como ficou o Cenário 4.

Tabela 6 – Cenário 4 - Parâmetros de configuração

| Hora (24h) | Visibilidade (0 a 100) | Chuva (0 a 100) | Vento (nós) | Vento (360°) | Lua (luz) | Mar (0 a 12) | Ondas (m) | Nuvens |
|------------|------------------------|-----------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|----------|
| 4h | 80 | 0 | 15 | 000° | on | 4 | 1m | esparsas |



Figura 55 – Cenário 4

6.4.4.1 Resultados dos voos

A Figura 56 apresenta os trajetos seguidos pelos pilotos no Cenário 4, realizado em condições noturnas. Os pilotos A e C optaram por aproximações em altitudes mais elevadas, possivelmente como uma resposta automática à baixa visibilidade e à dificuldade em manter referências visuais com a superfície da água.

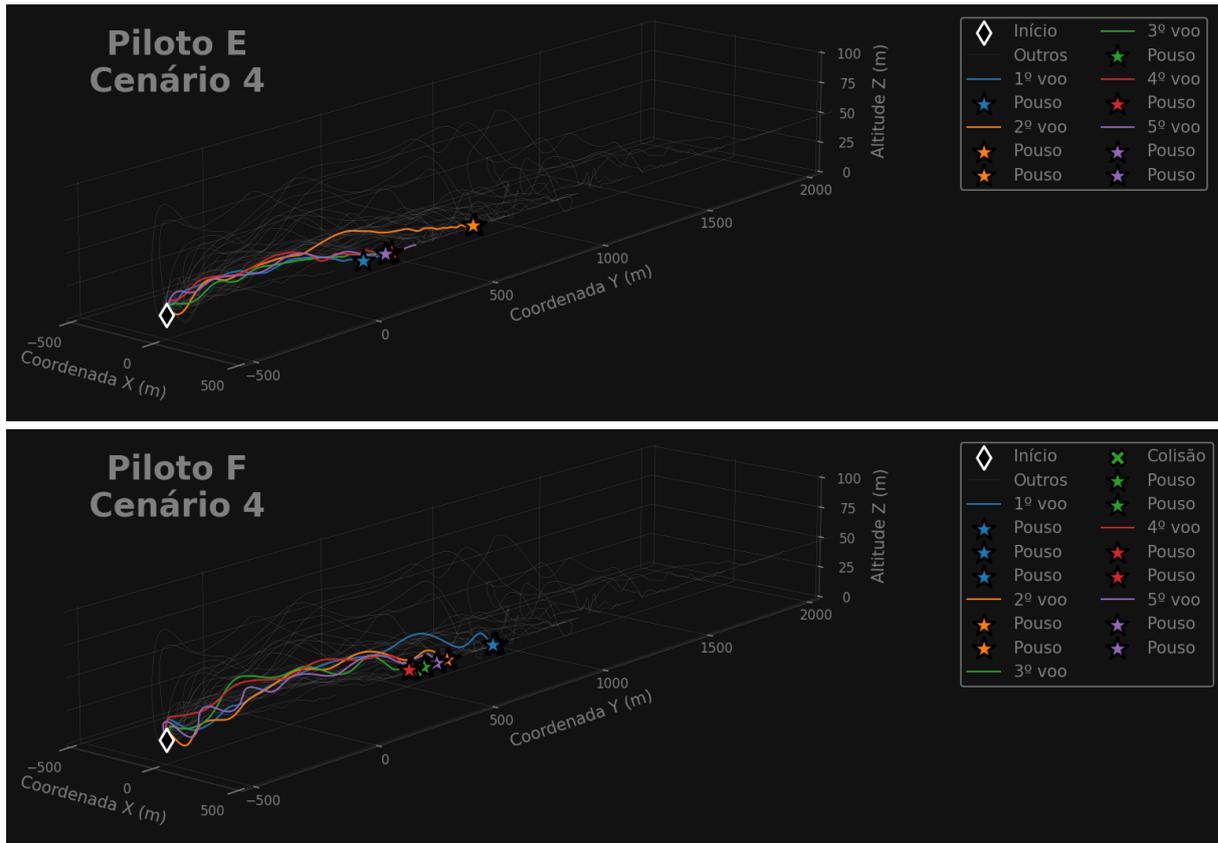


Figura 56 – Trajeto dos voos - Cenário 4

6.5 Análise estatística

Esta seção apresenta a análise estatística dos dados coletados durante as simulações, com o objetivo de quantificar, de maneira matemática, como os modelos físicos implementados no SimPC reproduzem as dificuldades enfrentadas pelos pilotos, tais como estado do mar, condições climáticas e visibilidade. A análise consiste em examinar a variação dos dados coletados e avaliar como essas variáveis influenciam o desempenho dos pilotos nos quatro cenários simulados.

6.5.1 Navio

O movimento do navio, e conseqüentemente do convoo, possui seis graus de liberdade:

- Deslocamento: vertical, lateral e longitudinal; e
- Rotação: balanço, caturro e guinada, cujos eixos estão representados na Figura 57.

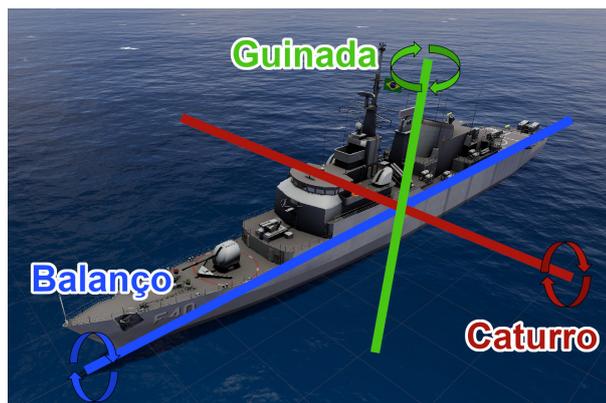


Figura 57 – Movimentos de rotação do navio

Adicionalmente, destaca-se o movimento de **derrabagem**, caracterizado pelo deslocamento lateral repentino da popa devido à ação das ondas, associado a uma guinada. Este efeito é mais frequente quando o estado do mar é mais severo, comprometendo a capacidade do piloto de manter a aeronave na posição correta para o pouso durante o momento da aproximação final. Provoca ainda uma perda de sustentação na aeronave em virtude da perda do efeito solo provocado pela interação da aeronave com o convoo. O SimPC consegue simular esse movimento de forma realista, como resultado natural da modelagem física do navio e do mar.

Para quantificar as oscilações do navio em cada cenário, aplicaram-se ferramentas estatísticas, incluindo valor máximo, média (μ), variância (σ^2) e desvio padrão (σ). Estas métricas oferecem uma medida confiável da dispersão dos dados em torno da média (52).

A variância (σ^2), definida na Equação 6.1 (52), mede a dispersão dos valores ao redor da média. Um aumento na variância indica maior amplitude de oscilação, refletindo a severidade das condições marítimas.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (6.1)$$

onde:

- x_i é o valor instantâneo na coleta i ;
- \bar{x} é a média dos valores;
- n é o número de coletas.

O desvio padrão (σ), descrito pela Equação 6.2 (52), é obtido como a raiz quadrada da variância e fornece uma métrica direta da dispersão dos valores ao redor da média.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (6.2)$$

A Tabela 7 apresenta os valores máximos registrados, a média (μ) e o desvio padrão (σ) para os movimentos de balanço, caturro e deslocamento vertical do navio, considerando individualmente os quatro cenários elaborados e o conjunto de todos os cenários.

Tabela 7 – Estatísticas do movimento da Fragata Niterói no SimPC

| Cenário | Métrica | Balanço | Caturro | Deslocamento Vertical Amplitude Máxima |
|------------------|-------------------------|---------|---------|---|
| Cenário 1 | Valor máx. | 0,13° | 0,86° | 0,57m |
| | Média (μ) | 0,00° | 0,31° | - |
| | Desv. Pad. (σ) | 0,01 | 0,07 | - |
| Cenário 2 | Valor máx. | 6,75° | 2,41° | 3,19m |
| | Média (μ) | 0,79° | 0,67° | - |
| | Desv. Pad. (σ) | 0,67 | 0,49 | - |
| Cenário 3 | Valor máx. | 20,14° | 16,32° | 18,03m |
| | Média (μ) | 4,01° | 1,52° | - |
| | Desv. Pad. (σ) | 3,85 | 1,28 | - |
| Cenário 4 | Valor máx. | 3,09° | 2,47° | 3,68m |
| | Média (μ) | 0,35° | 0,41° | - |
| | Desv. Pad. (σ) | 0,47 | 0,32 | - |
| Todos (1 a 4) | Valor máx. | 20,14° | 16,32° | 18,03m |
| | Média (μ) | 1,32° | 0,73° | 6,37m |
| | Desv. Pad. (σ) | 2,60 | 0,86 | - |

- **Balanço e caturro:** Os resultados indicam que, nos Cenários 1, 2 e 4, os valores máximos de balanço e caturro permanecem dentro do envelope operacional de 7° definido para o pouso do helicóptero H125 Esquilo na Fragata Classe Niterói, permitindo a execução segura de pousos. No Cenário 3, apesar dos valores médios de balanço e caturro estarem dentro do envelope, os valores máximos excedem significativamente o limite, tornando o pouso arriscado. No Cenário 4, a baixa visibilidade noturna inviabiliza a operação da aeronave, mesmo com os valores de balanço e caturro dentro do envelope;
- **Deslocamento vertical (amplitude máxima registrada):** No Cenário 3, sob condições de mau tempo e mar revolto, o deslocamento vertical do navio atingiu amplitudes superiores a 18 metros. Isso significa que, mesmo que o piloto mantivesse a aeronave em *hovering* a uma altitude considerável de 18 metros acima do convoo, haveria risco de colisão com o navio caso essas condições específicas ocorressem. Essa situação compromete ainda mais a operação, especialmente em função dos ventos cruzados e da visibilidade reduzida.

Em todos os casos, observa-se pela média e pelo desvio padrão (σ) que, na maior parte do tempo, o navio permanece dentro do envelope de pouso. No entanto, os valores máximos evidenciam picos de oscilação significativamente fora da curva, capazes de surpreender o piloto, demonstrando que a operação de pouso em convoo pode ser consideravelmente mais arriscada do que aparenta.

Este conhecimento acerca da probabilidade considerável de ocorrência de oscilações inesperadas é fundamental para orientar pilotos, comandantes e tomadores de decisão a adotarem uma postura conservadora ao pilotar a aeronave, autorizar operações aéreas e estabelecer os limites operacionais de segurança de uma aeronave. Contudo, o SimPC possibilita o treinamento em tais condições extremas, preparando os pilotos para situações de emergência onde a operação possa ser inevitável.

6.5.2 Helicóptero e Pilotos

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 apresentam a análise estatística de alguns parâmetros relacionados à pilotagem e ao pouso realizados pelos seis pilotos nos quatro cenários definidos. Os parâmetros analisados incluem:

- **Controles (cíclico, coletivo e pedais):** Os indicadores de média (μ) e desvio padrão (σ) fornecem uma medida da intensidade com que os pilotos atuaram nos controles da aeronave, influenciando diretamente as variações nos ângulos de arfagem (*pitch*), guinada (*yaw*) e rolamento (*roll*). A escala varia de 0 a 1, onde:
 - 0: Indica controle centralizado (no caso do cíclico e pedais) ou zerado (no caso do coletivo).
 - 1: Representa o controle aplicado até o ponto máximo.

Valores mais baixos de média indicam que o piloto voa de maneira mais suave, aplicando menos correções nos controles da aeronave. Embora realizar correções na aeronave não seja por si só um problema, durante o pouso no convoo pode indicar que o piloto está tendo maior dificuldade em controlar a aeronave e executar o pouso. Além disso, o pedal é o controle que apresenta menor variação (σ próximo de zero), pois os pilotos frequentemente mantêm uma posição ideal constante durante a operação.

- **Velocidade de Impacto:** A velocidade de impacto refere-se à velocidade relativa entre o convoo e o helicóptero no momento do toque. Quanto menor essa velocidade, maior a suavidade do pouso. O estudo de Minotra (53) estabelece um limite crítico para um pouso seguro de $3,0 \text{ m/s}$ ($10,8 \text{ km/h}$). Acima desse valor, os riscos aumentam significativamente, podendo resultar em danos estruturais à aeronave ou ferimentos aos ocupantes, conforme discutido por Mathieu e Thomas (35).

- **Precisão do Pouso:** A precisão foi avaliada pela distância entre o centro do convoo (ponto ideal para pouso) e o ponto de contato da aeronave com o convoo.
 - Distâncias menores que 3 metros: Indicam pousos precisos, atingindo o ponto ideal no convoo (círculo azul da Figura 58);
 - Entre 3 e 5 metros: Indicam pousos com precisão reduzida, fora do ponto ideal, mas ainda considerados seguros (círculo amarelo da Figura 58);
 - Entre 5 e 11 metros: Apontam pousos em situações de risco, com possibilidade de acidentes, dependendo da posição relativa ao convoo (círculo vermelho da Figura 58);
 - Acima de 11 metros: Representam colisões ou acidentes com o convoo.

A Figura 59 ilustra as dimensões aproximadas do convoo (12 metros de largura por 22 metros de comprimento), com destaque para o círculo branco que indica a área ideal para pouso. Adicionalmente, a Figura 58

- **Colisões:** Este parâmetro registra a quantidade de colisões com o mar ou com outras partes do navio que não o convoo, representando o número de acidentes durante as tentativas de pouso.

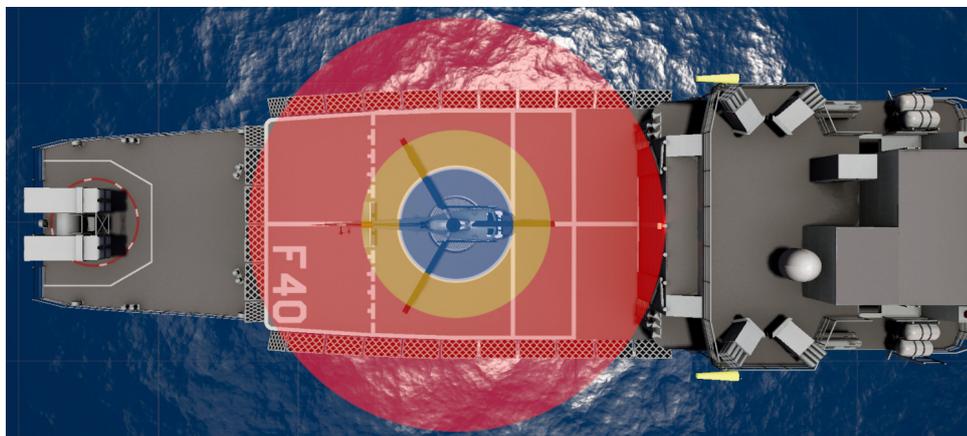


Figura 58 – Precisão do Pouso

Todos os pilotos seguiram corretamente as sinalizações náuticas e realizaram os pousos somente após a autorização do instrutor. Os sinais de autorização incluíram a ativação da *luz verde no convoo* e o içamento da bandeira *Índia*.

O registro e a análise desses parâmetros também permitem aos instrutores identificar pilotos com desempenho abaixo da média em relação à velocidade de impacto e precisão do pouso. Essas informações podem ser utilizadas para direcionar treinamentos específicos, visando o aprimoramento das habilidades e a evolução contínua desses pilotos.

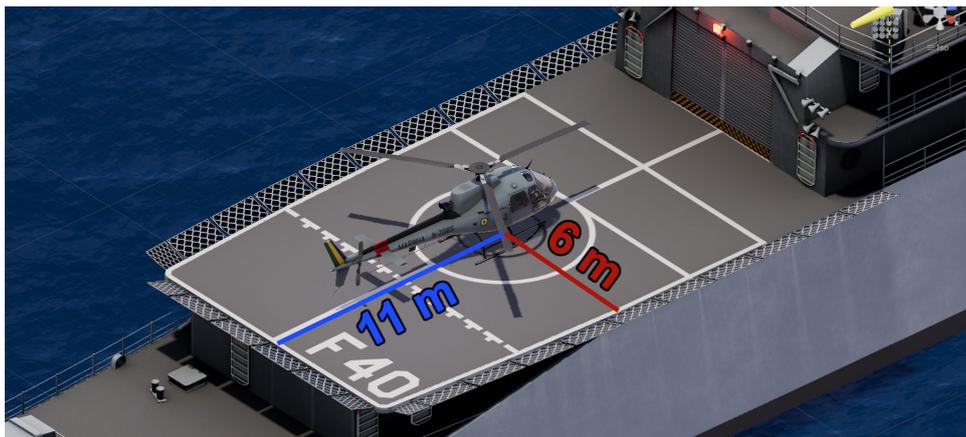


Figura 59 – Dimensões do convoo

A Tabela 8 apresenta a análise estatística de todos os pilotos referente aos voos realizados no Cenário 1.

- Controles: Os pilotos A e C apresentaram maior dispersão na atuação do controle cíclico ($\sigma = 0,08$), superior à média geral ($\sigma = 0,06$). Esse comportamento pode indicar maior necessidade de correções durante o voo, sugerindo uma dificuldade adicional na estabilização da aeronave para o pouso. Em relação ao coletivo e aos pedais, a atuação foi homogênea entre todos os pilotos, sem grandes variações;
- Velocidade de Impacto: Todos os pilotos, em pelo menos uma ocasião (valor *máx.* registrado), tocaram o convoo com velocidade de impacto superior ao limite de segurança de $10,8 \text{ km/h}$. No entanto, todos também conseguiram, ao menos uma vez (valor *min.* registrado), realizar um pouso significativamente suave, bem abaixo desse limite. Destaca-se o piloto C, que em uma das tentativas registrou uma velocidade próxima de zero, caracterizando um pouso praticamente sem impacto. Apesar desses resultados individuais, a média geral da velocidade de impacto foi de $\mu = 11,13 \text{ km/h}$, ligeiramente acima do limite seguro;
- Precisão do Pouso: Todos os pilotos, exceto o piloto F, conseguiram executar pelo menos um pouso considerado preciso (*Precisão* $< 3 \text{ m}$). O piloto B foi o único a executar todos os pousos dentro da faixa segura (*Precisão* $< 5 \text{ m}$). Por outro lado, o piloto C registrou um erro superior a 11 m em sua pior tentativa, indicando uma colisão severa ou um *crash* no convoo. Em média, os pousos realizados apresentaram precisão reduzida, abaixo do ideal, mas ainda dentro dos limites operacionais aceitáveis;
- Colisões: O piloto C foi o único a registrar colisões significativas, tanto com o navio quanto com o mar. Em uma das tentativas, sua aeronave caiu diretamente na água, evidenciando dificuldades de controle durante a aproximação e o pouso.

Tabela 8 – **CENÁRIO 1** - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso

| Piloto | | Controles | | | Velocidade | Precisão | |
|------------------|--------------|-----------|----------|--------|-------------------------|----------|----------|
| | | Cíclico | Coletivo | Pedais | Impacto (<i>km/h</i>) | Pouso | Colisões |
| Piloto A | min. | - | - | - | 0,25 | 1,22 | - |
| | máx. | - | - | - | 37,15 | 8,82 | 0 |
| | (μ) | 0,35 | 0,90 | 0,33 | 12,73 | 4,45 | - |
| | (σ) | 0,08 | 0,05 | 0,00 | 11,10 | 2,59 | - |
| Piloto B | min. | - | - | - | 2,81 | 1,04 | - |
| | máx. | - | - | - | 12,78 | 4,78 | 0 |
| | (μ) | 0,38 | 0,89 | 0,33 | 7,92 | 2,57 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 4,05 | 1,22 | - |
| Piloto C | min. | - | - | - | 0,00 | 2,43 | - |
| | máx. | - | - | - | 27,00 | 15,30 | 3 |
| | (μ) | 0,38 | 0,90 | 0,33 | 13,15 | 7,85 | - |
| | (σ) | 0,08 | 0,06 | 0,00 | 10,61 | 2,97 | - |
| Piloto D | min. | - | - | - | 2,63 | 1,62 | - |
| | máx. | - | - | - | 21,06 | 7,75 | 0 |
| | (μ) | 0,38 | 0,91 | 0,33 | 8,45 | 4,54 | - |
| | (σ) | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 5,86 | 2,21 | - |
| Piloto E | min. | - | - | - | 4,36 | 1,68 | - |
| | máx. | - | - | - | 14,80 | 5,11 | 0 |
| | (μ) | 0,37 | 0,90 | 0,33 | 7,15 | 3,33 | - |
| | (σ) | 0,03 | 0,05 | 0,00 | 3,31 | 1,10 | - |
| Piloto F | min. | - | - | - | 1,12 | 3,92 | - |
| | máx. | - | - | - | 30,74 | 6,47 | 0 |
| | (μ) | 0,38 | 0,89 | 0,33 | 12,88 | 5,08 | - |
| | (σ) | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 10,86 | 1,06 | - |
| Todos (A a F) | min. | - | - | - | 0,00 | 1,04 | - |
| | máx. | - | - | - | 37,15 | 15,30 | 3 |
| | (μ) | 0,37 | 0,90 | 0,33 | 11,13 | 5,01 | - |
| | (σ) | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 9,48 | 2,77 | - |

A Tabela 9 apresenta a análise estatística de todos os pilotos referente aos voos realizados no Cenário 2.

- Controles: Todos os pilotos apresentaram uma dispersão na atuação do controle cíclico dentro da média ($\sigma = 0,06$). O destaque foi o piloto D, que demonstrou uma menor variabilidade nos comandos ($\sigma = 0,02$), sugerindo uma trajetória mais estável e suave, com menor necessidade de correções na aeronave. Em relação ao coletivo e aos pedais, a atuação foi homogênea entre todos os pilotos, sem grandes variações.
- Velocidade de Impacto: Todos os pilotos, em pelo menos uma tentativa, tocaram o convoo com velocidade superior ao limite de segurança de $10,8 \text{ km/h}$. No entanto, todos também conseguiram realizar pelo menos um pouso de forma suave, com velocidades significativamente abaixo desse limite. A média geral da velocidade de impacto foi de $\mu = 11,97 \text{ km/h}$, ligeiramente acima do limite seguro, indicando que, de maneira geral, os pousos foram executados com um impacto um pouco superior ao desejável.
- Precisão do Pouso: Os pilotos A, D, E e F conseguiram realizar pelo menos um pouso considerado preciso ($\text{Precisão} < 3 \text{ m}$). No entanto, nenhum piloto conseguiu executar todos os pousos dentro da faixa segura ($\text{Precisão} < 5 \text{ m}$), tendo registrado pelo menos uma tentativa em situação considerada de risco ($5 \text{ m} \leq \text{Precisão} \leq 11 \text{ m}$). Os pilotos C e F apresentaram os maiores desvios, registrando erros superiores a 11 m em suas piores tentativas, o que indica uma colisão severa ou um *crash* no convoo. Em média, os toques no convoo apresentaram precisão em situação de risco e uma leve piora em relação ao Cenário 1, o que pode indicar um aumento da dificuldade imposta pelas condições do Cenário 2.
- Colisões: Os pilotos C e F registraram uma colisão significativa cada, reforçando a maior dificuldade enfrentada neste cenário.

Tabela 9 – **CENÁRIO 2** - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso

| Piloto | | Controles | | | Velocidade | Precisão | Colisões |
|------------------|--------------|-----------|----------|--------|-------------------------|----------|----------|
| | | Cíclico | Coletivo | Pedais | Impacto (<i>km/h</i>) | Pouso | |
| Piloto A | min. | - | - | - | 0,83 | 0,65 | - |
| | máx. | - | - | - | 18,68 | 5,95 | 0 |
| | (μ) | 0,36 | 0,89 | 0,33 | 8,98 | 3,23 | - |
| | (σ) | 0,07 | 0,06 | 0,00 | 7,16 | 1,58 | - |
| Piloto B | min. | - | - | - | 1,76 | 3,64 | - |
| | máx. | - | - | - | 21,78 | 9,15 | 0 |
| | (μ) | 0,37 | 0,89 | 0,33 | 9,83 | 5,92 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 6,80 | 1,71 | - |
| Piloto C | min. | - | - | - | 1,58 | 3,61 | - |
| | máx. | - | - | - | 28,48 | 12,21 | 1 |
| | (μ) | 0,37 | 0,91 | 0,33 | 13,15 | 7,64 | - |
| | (σ) | 0,08 | 0,07 | 0,00 | 9,85 | 2,76 | - |
| Piloto D | min. | - | - | - | 2,48 | 1,14 | - |
| | máx. | - | - | - | 21,71 | 7,95 | 0 |
| | (μ) | 0,38 | 0,93 | 0,33 | 13,19 | 5,15 | - |
| | (σ) | 0,02 | 0,06 | 0,00 | 6,80 | 2,56 | - |
| Piloto E | min. | - | - | - | 1,55 | 0,49 | - |
| | máx. | - | - | - | 15,70 | 5,91 | 0 |
| | (μ) | 0,37 | 0,89 | 0,33 | 7,11 | 3,91 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 3,95 | 1,65 | - |
| Piloto F | min. | - | - | - | 0,86 | 2,06 | - |
| | máx. | - | - | - | 41,00 | 14,56 | 1 |
| | (μ) | 0,37 | 0,89 | 0,33 | 17,07 | 7,09 | - |
| | (σ) | 0,07 | 0,05 | 0,00 | 12,60 | 3,76 | - |
| Todos (A a F) | min. | - | - | - | 0,83 | 0,49 | - |
| | máx. | - | - | - | 41,00 | 14,56 | 2 |
| | (μ) | 0,37 | 0,90 | 0,33 | 11,97 | 5,70 | - |
| | (σ) | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 9,27 | 3,00 | - |

A Tabela 10 apresenta a análise estatística de todos os pilotos referente aos voos realizados no Cenário 3.

- **Controles:** Os pilotos A e C apresentaram uma dispersão na atuação do controle cíclico superior à média dos demais participantes, indicando que precisaram realizar correções mais frequentes na aeronave para manter a estabilidade. Já em relação ao coletivo e aos pedais, a atuação foi homogênea entre todos os pilotos, sem grandes variações.
- **Velocidade de Impacto:** Todos os pilotos, em pelo menos uma tentativa, tocaram o convoo com velocidade superior ao limite de segurança de $10,8 \text{ km/h}$. No entanto, também foram registrados pousos bem-sucedidos, com velocidades significativamente inferiores a esse limite. A média geral da velocidade de impacto foi de $\mu = 17,06 \text{ km/h}$, um valor consideravelmente acima do limite seguro, sugerindo que, de maneira geral, os pousos foram executados com um impacto mais intenso do que o desejável.
- **Precisão do Pouso:** Os pilotos B, C e E conseguiram realizar ao menos um pouso classificado como preciso ($\text{Precisão} < 3 \text{ m}$). No entanto, nenhum piloto conseguiu manter todos os pousos dentro da faixa segura ($\text{Precisão} < 5 \text{ m}$), tendo registrado pelo menos uma tentativa em situação de risco ($5 \text{ m} \leq \text{Precisão} \leq 11 \text{ m}$). Os pilotos D e F apresentaram os maiores desvios, com erros superiores a 11 m em suas piores tentativas, o que sugere uma colisão severa ou um *crash* no convoo. A média geral da precisão dos pousos foi de $\mu = 5,74 \text{ m}$, posicionando-se dentro da zona de risco ($\mu > 5 \text{ m}$), evidenciando a dificuldade imposta pelas condições adversas do Cenário 3.
- **Colisões:** Os pilotos A, D e F registraram um total de 14 colisões significativas, reforçando a maior dificuldade enfrentada neste cenário.

No Cenário 3, os parâmetros de balanço e caturro do navio ultrapassaram os limites operacionais seguros para a aeronave, agravados pela presença de vento intenso cruzado e baixa visibilidade. Diante dessas condições adversas, era esperado que a média das velocidades de impacto no convoo excedesse o limite considerado seguro, que a precisão dos pousos fosse significativamente comprometida e que a incidência de colisões aumentasse substancialmente.

Tabela 10 – **CENÁRIO 3** - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso

| Piloto | | Controles | | | Velocidade | Precisão | |
|------------------|--------------|-----------|----------|--------|-------------------------|----------|----------|
| | | Cíclico | Coletivo | Pedais | Impacto (<i>km/h</i>) | Pouso | Colisões |
| Piloto A | min. | - | - | - | 2,27 | 3,34 | - |
| | máx. | - | - | - | 54,76 | 6,75 | 3 |
| | (μ) | 0,35 | 0,89 | 0,33 | 24,42 | 5,34 | - |
| | (σ) | 0,10 | 0,06 | 0,01 | 17,57 | 1,04 | - |
| | | | | | | | |
| Piloto B | min. | - | - | - | 1,33 | 2,95 | - |
| | máx. | - | - | - | 39,74 | 10,42 | 0 |
| | (μ) | 0,37 | 0,89 | 0,33 | 15,36 | 5,23 | - |
| | (σ) | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 13,43 | 2,03 | - |
| | | | | | | | |
| Piloto C | min. | - | - | - | 1,04 | 2,08 | - |
| | máx. | - | - | - | 40,10 | 6,27 | 0 |
| | (μ) | 0,36 | 0,91 | 0,33 | 12,28 | 3,90 | - |
| | (σ) | 0,09 | 0,07 | 0,00 | 14,12 | 1,37 | - |
| | | | | | | | |
| Piloto D | min. | - | - | - | 1,08 | 4,31 | - |
| | máx. | - | - | - | 45,22 | 13,67 | 3 |
| | (μ) | 0,37 | 0,93 | 0,33 | 20,81 | 7,76 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,06 | 0,01 | 15,63 | 3,11 | - |
| | | | | | | | |
| Piloto E | min. | - | - | - | 1,19 | 0,34 | - |
| | máx. | - | - | - | 16,16 | 5,36 | 0 |
| | (μ) | 0,36 | 0,89 | 0,33 | 7,27 | 3,18 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,06 | 0,00 | 5,82 | 1,85 | - |
| | | | | | | | |
| Piloto F | min. | - | - | - | 1,30 | 5,14 | - |
| | máx. | - | - | - | 47,09 | 15,89 | 8 |
| | (μ) | 0,37 | 0,90 | 0,33 | 21,62 | 8,50 | - |
| | (σ) | 0,06 | 0,06 | 0,01 | 16,08 | 2,94 | - |
| | | | | | | | |
| Todos (A a F) | min. | - | - | - | 1,04 | 0,34 | - |
| | máx. | - | - | - | 54,76 | 15,89 | 14 |
| | (μ) | 0,36 | 0,90 | 0,33 | 17,06 | 5,74 | - |
| | (σ) | 0,08 | 0,06 | 0,01 | 15,57 | 2,95 | - |
| | | | | | | | |

A Tabela 11 apresenta a análise estatística de todos os pilotos referente aos voos realizados no Cenário 4.

- Controles: A atuação no controle cíclico apresentou uma dispersão dentro da média ($\sigma = 0,05$), com destaque para o piloto B, que demonstrou menor variabilidade nos comandos ($\sigma = 0,03$), sugerindo uma trajetória mais estável e suave. Em relação ao coletivo e aos pedais, a atuação foi homogênea entre todos os pilotos, sem grandes variações.
- Velocidade de Impacto: Todos os pilotos, em pelo menos uma tentativa, tocaram o convoo com velocidade superior ao limite de segurança de $10,8 \text{ km/h}$. Entretanto, todos também conseguiram realizar pousos bem-sucedidos com velocidades significativamente inferiores a esse limite. A média geral da velocidade de impacto foi de $\mu = 10,49 \text{ km/h}$, um valor ligeiramente abaixo do limite seguro, indicando que, de maneira geral, os pousos foram executados dentro do limite desejável.
- Precisão do Pouso: Todos os pilotos, exceto o piloto F, conseguiram realizar pelo menos um pouso classificado como preciso ($\text{Precisão} < 3 \text{ m}$). Apenas os pilotos A e E mantiveram todos os pousos dentro da faixa segura ($\text{Precisão} < 5 \text{ m}$). Os demais registraram pelo menos uma tentativa em situação de risco ($5 \text{ m} \leq \text{Precisão} \leq 11 \text{ m}$). Os pilotos B, C e D apresentaram os maiores desvios, com erros superiores a 11 m em suas piores tentativas, o que sugere uma colisão severa ou um *crash* no convoo. A média geral da precisão dos pousos foi de $\mu = 6,31 \text{ m}$, posicionando-se dentro da zona de risco ($\mu > 5 \text{ m}$), evidenciando a dificuldade adicional imposta pela baixa visibilidade do cenário noturno.
- Colisões: Os pilotos B, C e F registraram um total de 5 colisões significativas, reforçando o impacto da visibilidade reduzida na precisão dos pousos e no controle da aeronave.

Tabela 11 – **CENÁRIO 4** - Análise Estatística dos Parâmetros de Pilotagem e Pouso

| Piloto | | Controles | | | Velocidade | Precisão | |
|------------------|--------------|-----------|----------|--------|-------------------------|----------|----------|
| | | Cíclico | Coletivo | Pedais | Impacto (<i>km/h</i>) | Pouso | Colisões |
| Piloto A | min. | - | - | - | 0,65 | 2,19 | - |
| | máx. | - | - | - | 19,40 | 8,97 | 0 |
| | (μ) | 0,35 | 0,91 | 0,33 | 11,69 | 4,53 | - |
| | (σ) | 0,06 | 0,07 | 0,01 | 6,72 | 2,17 | - |
| Piloto B | min. | - | - | - | 0,47 | 1,17 | - |
| | máx. | - | - | - | 25,60 | 12,47 | 1 |
| | (μ) | 0,37 | 0,90 | 0,33 | 8,80 | 5,71 | - |
| | (σ) | 0,03 | 0,05 | 0,00 | 6,51 | 4,11 | - |
| Piloto C | min. | - | - | - | 0,14 | 2,40 | - |
| | máx. | - | - | - | 24,12 | 12,41 | 3 |
| | (μ) | 0,38 | 0,93 | 0,33 | 12,93 | 7,27 | - |
| | (σ) | 0,07 | 0,07 | 0,01 | 9,48 | 2,88 | - |
| Piloto D | min. | - | - | - | 0,14 | 0,90 | - |
| | máx. | - | - | - | 35,46 | 13,59 | 0 |
| | (μ) | 0,37 | 0,92 | 0,33 | 13,04 | 7,47 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,06 | 0,00 | 11,87 | 3,01 | - |
| Piloto E | min. | - | - | - | 1,01 | 2,24 | - |
| | máx. | - | - | - | 15,59 | 5,74 | 0 |
| | (μ) | 0,36 | 0,91 | 0,33 | 5,41 | 3,51 | - |
| | (σ) | 0,05 | 0,06 | 0,00 | 4,64 | 1,05 | - |
| Piloto F | min. | - | - | - | 0,43 | 5,52 | - |
| | máx. | - | - | - | 40,46 | 10,09 | 1 |
| | (μ) | 0,37 | 0,89 | 0,33 | 11,29 | 8,31 | - |
| | (σ) | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 12,91 | 1,37 | - |
| Todos (A a F) | min. | - | - | - | 0,14 | 0,90 | - |
| | máx. | - | - | - | 40,46 | 13,59 | 5 |
| | (μ) | 0,37 | 0,92 | 0,33 | 10,49 | 6,31 | - |
| | (σ) | 0,05 | 0,06 | 0,01 | 9,59 | 3,30 | - |

6.5.2.1 Resumo da análise estatística do helicóptero e pilotos

Ressalta-se que o SimPC ainda é um protótipo em fase de desenvolvimento, o que implica na necessidade de ajustes e refinamentos em seus modelos físicos e aerodinâmicos. Essas limitações podem impactar a experiência dos pilotos durante a simulação. Dessa forma, eventuais erros cometidos nos voos refletem, em grande parte, as restrições do simulador e não a capacidade técnica dos pilotos participantes.

- Controles: A atuação nos comandos de coletivo e pedais apresentou pouca variação entre os pilotos, indicando um padrão de utilização relativamente uniforme. Em contraste, o controle cíclico revelou-se o principal elemento onde cada piloto imprime sua identidade operacional, refletindo diferenças individuais na técnica de pilotagem.

O piloto B se destacou por apresentar menor variabilidade nos ajustes, o que sugere uma trajetória mais suave e maior controle sobre a aeronave.

- **Velocidade de Impacto:** Todos os pilotos, em pelo menos uma tentativa, excederam o limite seguro de velocidade de impacto de $10,8 \text{ km/h}$. No entanto, também foram registrados pousos bem-sucedidos abaixo desse valor, demonstrando que os pilotos conseguiram realizar pousos seguros em várias ocasiões. A média geral da velocidade de impacto ficou ligeiramente acima do limite, indicando que, de forma geral, os pousos foram executados fora de um padrão aceitável. O Cenário 4 foi o único em que a média da velocidade de impacto permaneceu dentro do limite desejável. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de ter sido o último cenário treinado, permitindo que os pilotos estivessem mais adaptados ao simulador e compreendessem melhor a resposta da aeronave aos comandos, o que possivelmente contribuiu para uma melhora no desempenho das aproximações e pousos.
- **Precisão do Pouso:** Todos os pilotos conseguiram realizar pelo menos um pouso dentro do limite considerado preciso ($Precisão < 3 \text{ m}$), porém nenhum deles conseguiu manter essa precisão em todas as tentativas. Alguns pousos foram registrados dentro da faixa de risco, com deslocamentos superiores a 5 m do ponto ideal e outros ainda com deslocamento superior a 11 m , indicando uma colisão ou *crash* da aeronave.
- **Colisões:** Foram registradas um total de 24 ocorrências ao longo dos 120 voos. O balanço e caturro do navio e a baixa visibilidade fora do envelope operacional da aeronave, contribuíram para um aumento no número de colisões. Esse resultado reforça a influência das condições ambientais adversas na execução do pouso e demonstra a necessidade de maior treinamento em tais circunstâncias para mitigar riscos operacionais.

6.6 Avaliação Qualitativa e Análise dos Resultados

A avaliação qualitativa foi conduzida por meio de um questionário respondido pelos pilotos participantes. O objetivo do questionário foi analisar, em termos de realismo, a qualidade do comportamento físico da aeronave e do navio, bem como do mar, do cenário, dos efeitos climáticos, das interações entre esses elementos e, principalmente, a eficácia e o potencial do SimPC como ferramenta de apoio ao treinamento e adestramento dos pilotos do CIAAN.

A elaboração do questionário foi planejada de forma anônima, com o intuito de proporcionar aos pilotos um ambiente seguro para expressarem suas opiniões de maneira sincera e imparcial. Essa abordagem visa minimizar possíveis constrangimentos ou receios de avaliação pessoal, garantindo que as respostas reflitam genuinamente as percepções dos

participantes sobre o SimPC. Assim, a anonimidade fortalece a confiabilidade dos dados coletados, permitindo uma análise mais precisa e representativa das opiniões e experiências dos pilotos.

O questionário incluiu uma abordagem mista, combinando perguntas abertas e objetivas, e foi desenvolvido utilizando a plataforma *Google Forms* (54). Essa escolha forneceu uma interface familiar aos participantes, garantindo que a anonimidade fosse preservada, além de facilitar o processo de análise das respostas.

6.6.1 Questionário, Respostas e Avaliação

1 - Classifique, de acordo com o grau de realismo, o comportamento físico e a resposta do helicóptero aos controles.

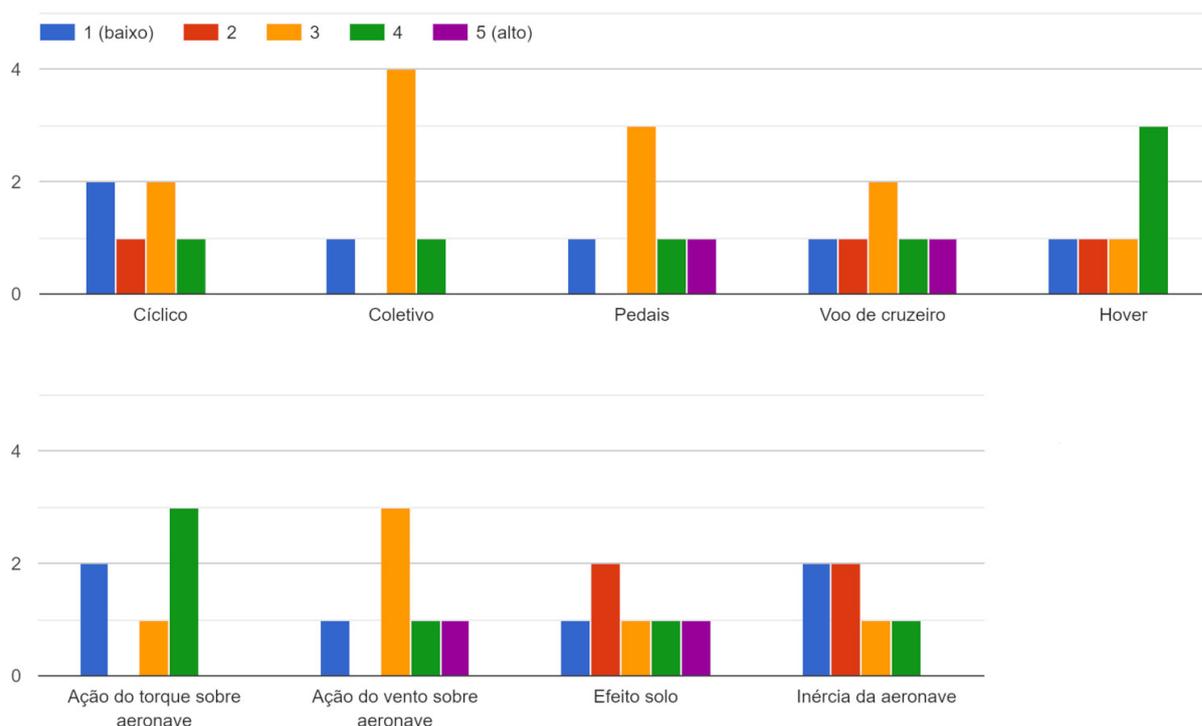


Figura 60 – Respostas - Pergunta 1

Avaliação: A percepção individual de cada piloto foi bastante heterogênea. Parte desta percepção pode ser explicada pelo fato dos pilotos estarem acostumados a operar aeronaves de modelos distintos ao H125 modelado no SimPC. Fazendo uma média aritmética ponderada, foi possível ranquear os itens de acordo com as avaliações, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Ranking de avaliação - Pergunta 1

| | Avaliação média |
|-----------------|-----------------|
| Pedais | 3,1 |
| Vento | 3,1 |
| Hover | 3,0 |
| Voo de cruzeiro | 3,0 |
| Coletivo | 2,8 |
| Torque | 2,8 |
| Efeito solo | 2,8 |
| Cíclico | 2,3 |
| Inércia | 2,1 |

- Controles:
 - Cíclico: Avaliado como menos realista, necessitando uma melhor calibração;
 - Coletivo: Bem representado mas ainda com espaço para melhorias; e
 - Pedais: Comportamento mais realista em comparação aos demais controles.
- Comportamento:
 - Ação do torque: Indica que ainda precisa de ajustes;
 - Inércia: Este aspecto foi percebido como o mais problemático. Esse dado reforça a necessidade de revisão e calibração do modelo de inércia da aeronave;
 - Vento: Houve uma percepção positiva, mas não perfeita, do comportamento do vento sobre a aeronave;
 - Voo de cruzeiro: As avaliações foram muito diversificadas. Isso pode indicar que a percepção do realismo nesse aspecto depende de fatores individuais ou do tipo de aeronave que os pilotos estão acostumados a operar;
 - Hover: Um dos aspectos mais bem avaliados, porém com espaço para melhorias; e
 - Efeito solo: As avaliações sugerem que o efeito solo foi representado de maneira moderada, mas ainda não completamente satisfatória.

O comportamento físico da aeronave, de maneira geral, foi avaliado de forma heterogênea. As áreas que receberam avaliações mais altas (vento, pedais, hover) indicam que a simulação é capaz de replicar certos aspectos com um grau satisfatório de realismo. Contudo, as áreas com avaliações baixas (inércia, torque, cíclico) expõem as principais fragilidades do modelo físico implementado, sugerindo os pontos que mais necessitam de atenção em melhorias futuras.

A avaliação evidencia que, embora alguns aspectos do modelo físico estejam adequados, há necessidade de melhorias em áreas específicas para elevar o realismo da simulação e proporcionar uma experiência mais fidedigna aos pilotos.

2 - Comparado a um helicóptero real, manter o hover estável foi:

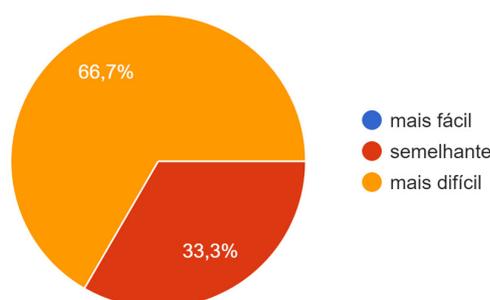


Figura 61 – Respostas - Pergunta 2

Avaliação: Aqui a resposta desejada é que seja '*semelhante*'. Ser '*mais fácil*' ou '*mais difícil*' indica que o hover não está sendo simulado corretamente.

- '*Mais difícil*': O fato de a maioria dos pilotos ter considerado mais difícil manter o hover sugere que o modelo do simulador apresenta desafios adicionais ou discrepâncias em relação ao comportamento esperado. Possíveis razões para essa dificuldade incluem:
 - Representação do controle cíclico (que recebeu notas mais baixas na pergunta anterior);
 - Modelo de inércia, cujo modelo físico ainda precisa de ajustes.
- '*Semelhante*': O fato de 33,3% terem considerado o hover semelhante sugere que o simulador, apesar das dificuldades apontadas, apresenta um grau de realismo que aproxima a experiência do mundo real em alguns aspectos.

3 - As sinalizações do navio (bandeiras, luzes de navegação, luz no convoo, biruta) foram suficientes para guiar corretamente o pouso?

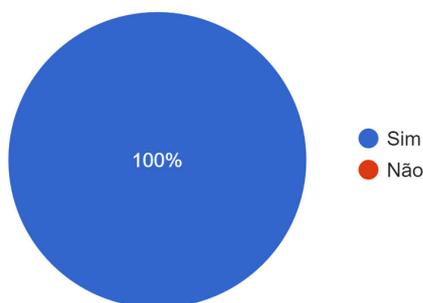


Figura 62 – Respostas - Pergunta 3

Avaliação: A resposta unânime positiva reflete um ponto forte do simulador, demonstrando que as sinalizações estão bem ajustadas, replicando o ambiente real com fidelidade, sendo realistas o suficiente para orientar os pilotos durante a manobra de pouso. Neste ponto encontramos um diferencial do SimPC em relação a outras soluções genéricas.

4 - Quão realista você considerou o comportamento/movimento do navio e sua interação com as ondas?

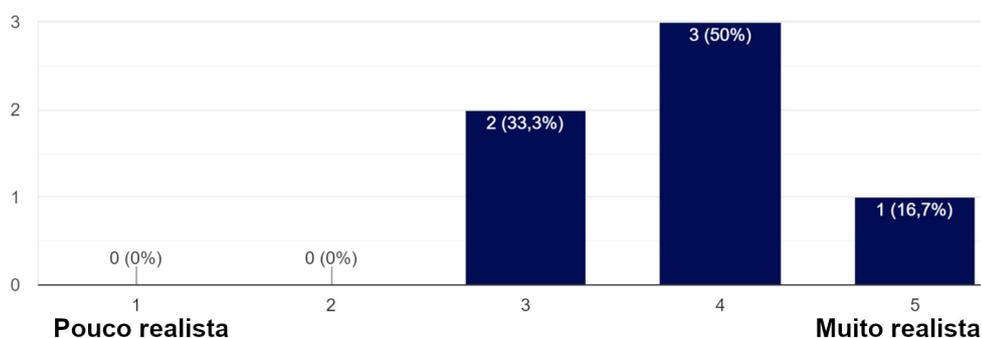


Figura 63 – Respostas - Pergunta 4

Avaliação: Aqui a avaliação média foi de 3,8, o que indica que o SimPC atingiu uma percepção positiva no grau de realismo para o navio e sua interação com o mar, sugerindo que o modelo físico do navio está próximo de simular as condições reais. A percepção dos pilotos também pode variar em função de suas experiências prévias com outros tipos e classes de navios.

5 - Você já teve a oportunidade de realizar na prática o pouso no convoo de um navio em movimento? Aproximadamente quantos pousos foram realizados?

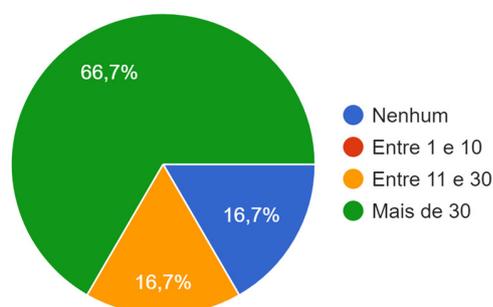


Figura 64 – Respostas - Pergunta 5

Avaliação: O objetivo desta pergunta foi verificar o nível de experiência de cada piloto, fornecendo um fundamento que os credencia a avaliar o SimPC.

A maior parte dos pilotos entrevistados possui experiência significativa com pousos reais no convoo, o que valida a opinião da maioria sobre a simulação. Este pilotos tendem a oferecer feedback mais confiável sobre a precisão do simulador, já que possuem uma base sólida de comparação.

A presença de 1 piloto com pouca ou nenhuma experiência prática pode contribuir para uma perspectiva diferenciada sobre a simulação, dado que sua avaliação depende mais da percepção do simulador do que de uma comparação direta com a realidade.

6 - Classifique de acordo com o grau de realismo (baixo, médio e alto) cada uma das condições de voo simuladas:

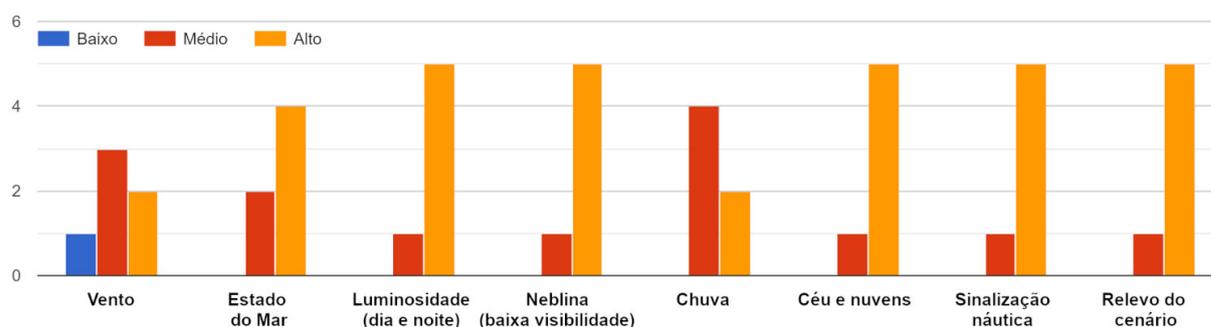


Figura 65 – Respostas - Pergunta 6

Avaliação: Aqui o SimPC está sendo avaliado em relação à qualidade gráfica, o que impacta diretamente na imersão do piloto.

- A maioria das condições de voo simuladas foi classificada como alto grau de realismo, com destaque para Luminosidade, Neblina, Céu e nuvens, Sinalização náutica, Relevo do cenário e Estado do mar;
- A Chuva recebeu um boa avaliação, porém há espaço para melhorias. Já o Vento foi o único fator com uma avaliação mais próxima do médio, o que sugere que o comportamento do vento no simulador pode não estar alinhado às expectativas dos pilotos ou à realidade.

A predominância da avaliação “alto” para a maioria dos aspectos indica que os pilotos consideraram o simulador realista em termos visuais e ambientais, mas há aspectos específicos que podem ser otimizados para atender ainda mais às expectativas dos pilotos.

7 - Na sua opinião, treinar neste simulador, pode contribuir para aumentar sua confiança para realizar o pouso em uma situação real?

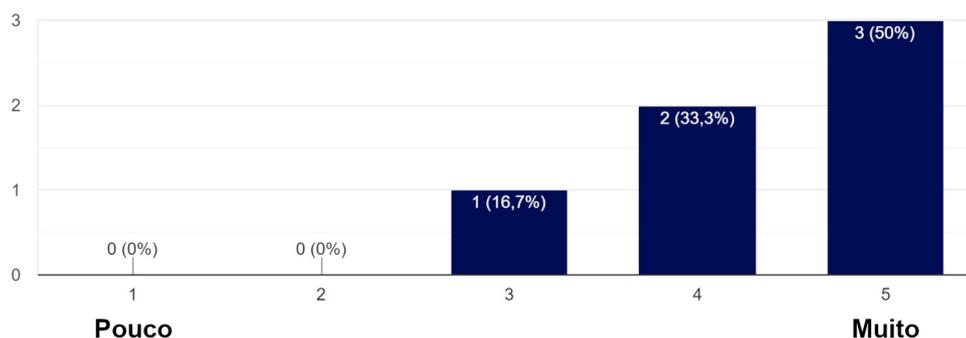


Figura 66 – Respostas - Pergunta 7

Avaliação: A maioria dos pilotos avaliou positivamente a contribuição do simulador para aumentar a confiança no pouso em uma situação real. Apenas um piloto atribuiu uma nota intermediária, indicando uma percepção de que o simulador oferece algum benefício, mas que pode não ser suficiente para gerar alta confiança. Não houve avaliações ruins, o que reflete a ausência de rejeição ao uso do simulador como ferramenta de treinamento.

Esses resultados sugerem que o SimPC, mesmo sendo um simulador de baixo custo, tem um impacto positivo na confiança dos pilotos e pode ser uma ferramenta útil no processo de adestramento.

8 - Você acredita que o treinamento neste simulador pode ajudar a reduzir o número de acidentes durante operações de pouso reais?

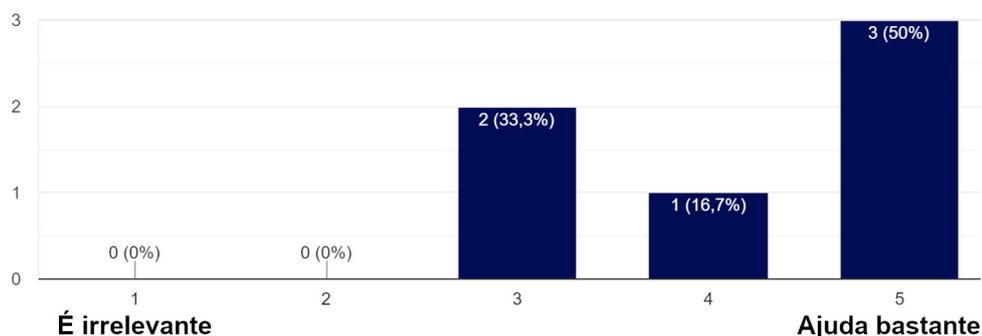


Figura 67 – Respostas - Pergunta 8

Avaliação: A maioria dos pilotos (4 de 6) acredita que o treinamento no simulador pode ajudar significativamente a reduzir o número de acidentes durante operações de pouso reais. Dois pilotos atribuíram nota 3, indicando uma percepção moderada sobre a eficácia do simulador nesse aspecto. Não houve notas 1 ou 2, o que demonstra que todos os pilotos reconhecem algum grau de contribuição do simulador para a segurança.

Os resultados sugerem que o SimPC é visto como uma ferramenta capaz de contribuir para a redução de acidentes, alinhando-se ao objetivo de aumentar a segurança nas operações de pouso.

9 - O feedback visual do simulador e os instrumentos disponíveis do painel foram suficientes para orientar sua aproximação e pouso?

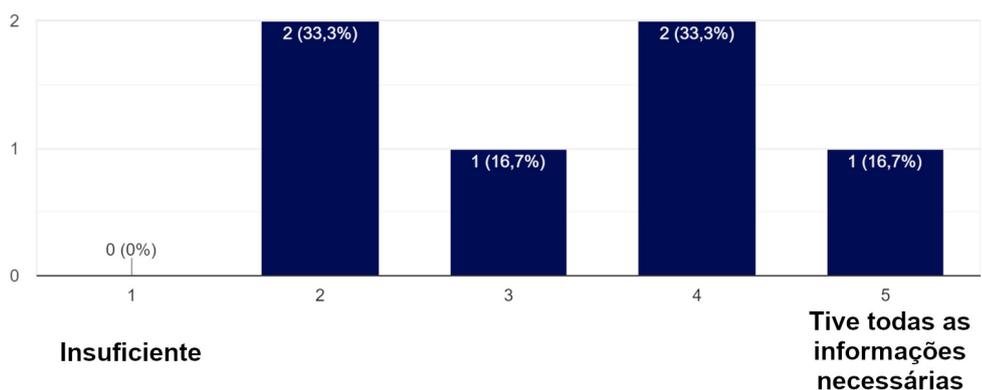


Figura 68 – Respostas - Pergunta 9

Avaliação: As respostas foram variadas, mostrando percepções diferentes quanto à adequação do feedback visual e dos instrumentos disponíveis, variando desde pilotos que consideraram o feedback visual e instrumentos atendendo todas as necessidades, até aqueles que acharam que o simulador ainda necessita implementar outros recursos e instrumentos

que forneçam mais informações para o piloto. Esses resultados sugerem que o SimPC têm potencial, mas que precisa de ajustes para alcançar uma aceitação mais unânime entre os pilotos.

10 - Considerando a situação criada com pior visibilidade e estado do mar, você sentiu que o balanço e caturro do navio impactaram significativamente sua capacidade de pousar com precisão?

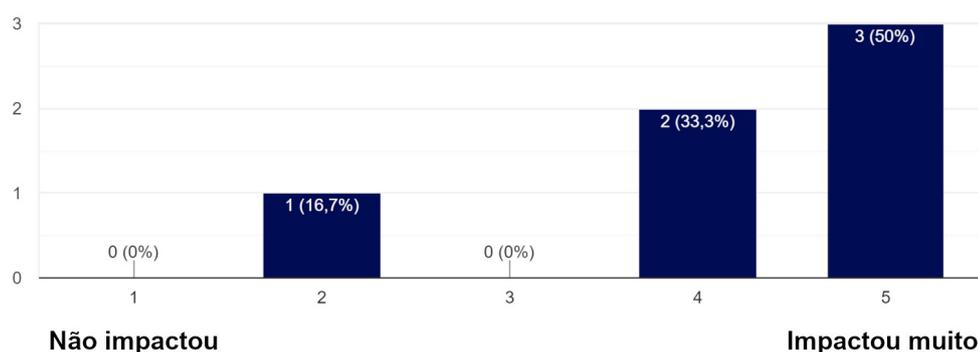


Figura 69 – Respostas - Pergunta 10

Avaliação: A maioria dos pilotos perceberam um impacto significativo do balanço e caturro na precisão do pouso. O balanço e o caturro do navio representaram um desafio para o piloto, especialmente nas condições simuladas de baixa visibilidade e estado do mar adverso, exigindo dos pilotos um desenvolvimento mais refinado de suas técnicas de controle da aeronave.

11 - Para você, o simulador parece adequado como apoio no aprendizado e treinamento da operação de pouso em convoo?

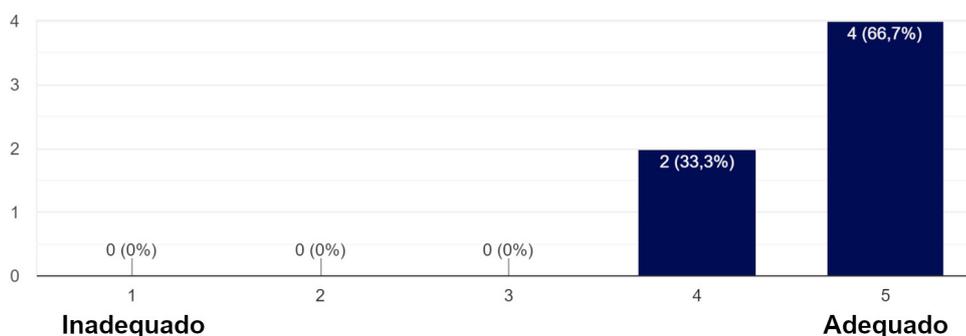


Figura 70 – Respostas - Pergunta 11

Avaliação: Todos os pilotos consideraram o simulador como adequado para apoiar o aprendizado e o treinamento de pouso em convoo. Dois terços dos participantes avaliaram

o SimPC com nota máxima neste quesito, o que reflete uma percepção muito positiva da funcionalidade e do potencial do simulador como ferramenta de treinamento.

A aceitação unânime como uma ferramenta útil é um indicativo de que o SimPC, com ajustes e melhorias contínuas, pode ser integrado ao treinamento formal, contribuindo para o adestramento de pilotos.

12 - Quais aspectos do simulador você gostaria de ver melhorados?

Resumo das respostas: Os pilotos destacaram aspectos técnicos e comportamentais da simulação que precisam ser aprimorados para tornar o SimPC mais realista. Os principais pontos mencionados foram:

- Física e Inércia da Aeronave:
 - Grande inércia da aeronave, tornando a simulação distante da realidade, especialmente em fases críticas, como rampa de aproximação e transição para voo librado;
 - Atitude de voo simulada com o nariz muito baixo em relação à aeronave real (aproximadamente 8°);
 - Dificuldade em manter o voo librado (*hover*) compromete o treinamento de pouso com precisão.
- Comandos e Sensibilidade:
 - Atraso perceptível no comando do cíclico, com amplitude maior que a realidade;
 - Coletivo gerando razão de subida/descida mais rápida do que o normal;
 - Efeito do torque pouco perceptível ao aplicar o coletivo;
 - Sensibilidade dos comandos de voo (cíclico, coletivo e pedais) não fidedigna.
- Interação com o Ambiente:
 - Vento sujo (turbulência) durante a entrada no convoo não foi sentido com a intensidade esperada.

Avaliação: As respostas dos pilotos indicam a necessidade de ajustes no modelo de voo do helicóptero para aprimorar sua fidelidade, especialmente em relação à inércia da aeronave, que impacta a precisão da aproximação e do hover. Além disso, foram identificadas discrepâncias na sensibilidade dos comandos, particularmente no cíclico e no coletivo. A percepção dos pilotos sobre a resposta da aeronave aos comandos pode ter sido influenciada pelo fato de que alguns estão habituados a operar modelos distintos do H125

Esquilo, resultando em diferentes expectativas quanto ao comportamento da simulação. Enquanto alguns pilotos relataram que o cíclico e o coletivo estavam mais sensíveis do que o esperado, outros indicaram o oposto, evidenciando variações individuais na interpretação da resposta da aeronave, apesar de a calibração ter sido uniforme para todos.

Outro aspecto relevante apontado foi a ausência da influência da turbulência induzida pela superestrutura do navio (vento sujo) ao interagir com o helicóptero, um efeito aerodinâmico significativo que será implementado no SimPC em futuras atualizações para aprimorar a imersão e a fidelidade da simulação.

13 - Quais funcionalidades você gostaria de ver adicionadas ao simulador?

Resumo das respostas: Os pilotos sugeriram diversas funcionalidades para aprimorar a experiência e a utilidade do SimPC, com foco em instrumentação, cenários adicionais e efeitos ambientais. As sugestões incluem:

- Instrumentação e Indicadores:
 - Inclusão de instrumentos como torquímetro, radar altímetro e indicador de torque, considerados essenciais para operações como pouso a bordo;
 - Painel de voo completo e mais visível, permitindo uma leitura clara de todos os parâmetros relevantes;
 - Simulação de parâmetros de motor que limitem a aplicação do coletivo, especialmente para operações com limitação de torque.
- Interação com o Ambiente:
 - Simulação do efeito da superestrutura do navio, que causa perda de sustentação e maior exigência de torque ao entrar em áreas abrigadas do vento;
 - Efeito de chuva no para-brisa, reduzindo a visibilidade.
- Cenários e Exercícios:
 - Inclusão de novos cenários, como a Base Aérea de São Pedro, outros navios e aeronaves;
 - Adição de exercícios específicos, como pickup (resgate de carga/pessoas) e VERTREP (Vertical Replenishment, reabastecimento vertical).
- Navio e Convoo:
 - Instrumentos relacionados ao convoo, como EQman (indicador de alinhamento do convoo) e OLP (Obstacle Landing Position).

Avaliação: As funcionalidades sugeridas pelos pilotos foram registradas como possíveis melhorias e estão descritas na Seção 7.1, onde são apresentadas como direções para aprimoramentos futuros do SimPC.

14 - Sugestões diversas, críticas e feedbacks positivos:

Resumo das respostas: Os pilotos apresentaram uma ampla variedade de comentários, incluindo sugestões construtivas, críticas específicas e elogios. As respostas podem ser organizadas nos seguintes tópicos principais:

- Aspectos positivos destacados:
 - Qualidade visual: O cenário, o navio e a aeronave foram elogiados pela apresentação visual impecável e o alto grau de realismo das imagens;
 - Potencial do simulador: Considerado uma excelente ferramenta para o treinamento inicial de pouso a bordo, com grande contribuição para a segurança de voo e o treinamento em situações críticas;
 - Contribuição estratégica: O projeto foi reconhecido como uma iniciativa relevante para a economia de recursos (horas de voo e custos operacionais) e deve ser incentivado no âmbito das Forças Armadas.
- Sugestões de melhoria:
 - Comandos e resposta da aeronave:
 - * Aperfeiçoar os comandos de cíclico, coletivo e pedais para maior fidelidade à aeronave real;
 - * Corrigir a atitude de nariz da aeronave durante voos translacionais, pois a velocidade não ultrapassa 60 kt, mesmo com ajustes no coletivo;
 - * Ajustar a amplitude dos comandos e a atitude de voo para melhorar o aproveitamento durante o treinamento.
 - Instrumentação e cenários:
 - * Ampliar os instrumentos básicos de voo, com maior atenção à apresentação dos indicadores;
 - * Incluir cenários terrestres que permitam treinar pousos em pistas reais, sem o afundamento no piso que ocorre atualmente, além de possibilitar o treinamento de emergências em solo.
 - Foco em emergências:
 - * O simulador poderia ser aprimorado para treinar emergências com maior fidelidade, superando as capacidades dos simuladores atuais do CIAAN.

- Críticas e observações gerais:
 - Os pilotos reconhecerem que nenhum simulador será completamente fidedigno aos movimentos de uma aeronave real, mas enfatizaram que ajustes são necessários para atingir um nível ainda maior de realismo;
 - O simulador precisa corrigir deficiências na resposta dos comandos para maximizar sua eficácia no treinamento.
- Elogios e reconhecimento:
 - O projeto foi elogiado como uma iniciativa bem direcionada, com impacto significativo no adestramento de pilotos e na segurança operacional;
 - Foi destacado que o simulador tem muito a contribuir para o piloto nos aspectos de leitura dos instrumentos, identificação de panes e treinamento de procedimentos em situações no qual colocaria a vida do piloto em risco ou comprometeria a integridade da aeronave.

Avaliação: As respostas dos pilotos sugerem que o SimPC foi bem recebido como uma ferramenta promissora para o treinamento de pouso em convoo, especialmente para o treinamento inicial e a segurança operacional. A qualidade visual e o realismo da simulação foram amplamente elogiados, assim como o potencial estratégico do projeto para a economia de recursos na formação de pilotos. No entanto, foram apontadas melhorias necessárias na resposta dos comandos, na atitude da aeronave durante o voo translacional e na instrumentação do cockpit. No geral, os pilotos reconheceram as limitações inerentes a qualquer simulador, mas destacaram que os ajustes sugeridos podem elevar ainda mais o realismo e a aplicabilidade do SimPC no adestramento de pilotos.

7 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como principal objetivo propor uma metodologia abrangente para o desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo, capaz de reproduzir com realismo as diversas situações adversas enfrentadas por pilotos, proporcionando um ambiente de treinamento eficaz para o aprimoramento de suas habilidades operacionais. A metodologia foi detalhada de forma sistemática, possibilitando sua replicação e servindo como referência para futuros trabalhos na área. Para validar essa abordagem, foi desenvolvido o SimPC, um simulador de voo projetado para recriar com fidelidade o pouso de um helicóptero no convoo de um navio de guerra em movimento, apresentado como uma ferramenta de treinamento para pilotos da Marinha do Brasil.

O estudo enfatizou a relevância dos simuladores de voo no processo de formação e adestramento de pilotos, evidenciando como uma solução de baixo custo pode ser eficaz para esse fim. Além disso, foram analisadas as limitações dos simuladores atualmente disponíveis no CIAAN, evidenciando que eles não reproduzem com fidelidade as condições operacionais encontradas durante o pouso em convoo. Nesse cenário, o SimPC se apresenta como uma alternativa projetada para suprir essa lacuna específica. A análise dos trabalhos relacionados reforçou essa necessidade, uma vez que nenhuma das soluções estudadas abordou integralmente esse problema. Muitos estudos analisados utilizaram simuladores com propósitos distintos ou inadequados para essa operação, recorreram a modelos físicos simplificados que não representam com precisão o comportamento da aeronave ou do navio, ou, ainda, não foram submetidos a testes conduzidos por pilotos experientes, limitando a validação dos resultados obtidos.

Na metodologia de desenvolvimento do SimPC apresentada, foram utilizados softwares gratuitos, visando o baixo custo. A modelagem do mar, do ambiente, dos efeitos meteorológicos, da iluminação e da física da aeronave e do navio foi implementada com o objetivo de reproduzir com fidelidade o comportamento real de cada um desses elementos, garantindo uma experiência de simulação condizente com as condições reais enfrentadas pelos pilotos. Após a implementação, as funcionalidades do SimPC foram comparadas com as dos trabalhos relacionados.

Diferenciando-se da literatura existente, este trabalho se destaca por apresentar uma avaliação baseada em testes práticos conduzidos por pilotos experientes e qualificados para pousar helicópteros reais em navios de guerra. Por outro lado, grande parte dos estudos relacionados realizou testes com usuários que não são pilotos e não possuem experiência prática, limitando a validação dos resultados. Esse aspecto confere maior credibilidade aos resultados obtidos neste estudo e reforça a relevância do SimPC como uma ferramenta aplicável ao treinamento de pilotos militares.

O SimPC foi posteriormente integrado ao *hardware* do Simulador Sintético do CIAAN, onde seis pilotos experientes realizaram testes práticos. Cada piloto conduziu 20 voos de exercício, enfrentando quatro cenários distintos, com variações nas condições de estado do mar, visibilidade e mau tempo. Esses exercícios foram planejados para serem progressivamente mais desafiadores e para verificar a capacidade do SimPC em simular essas condições.

Após a realização dos exercícios, os pilotos preencheram um questionário de avaliação qualitativa, no qual avaliaram o grau de realismo de diversos aspectos do SimPC. Paralelamente, os dados dos voos foram coletados e analisados estatisticamente, permitindo uma avaliação objetiva da contribuição do simulador para o treinamento.

Os resultados obtidos a partir da análise dos dados de voo coletados demonstram que o SimPC é uma ferramenta que pode auxiliar os instrutores de voo na identificação de erros cometidos e técnicas de pilotagem que necessitam de aprimoramento. Métricas objetivas, como precisão do pouso, intensidade do impacto com o convoo e ocorrência de colisões, servem como referência para avaliar a evolução dos pilotos, permitindo ajustes pontuais para aprimorar suas habilidades.

A avaliação qualitativa realizada pelos pilotos, apresentou respostas que sugerem que o SimPC possui características que o tornam uma ferramenta promissora para o treinamento de pouso em convoo. O simulador foi reconhecido por apresentar um grau satisfatório de realismo na resposta da aeronave aos comandos e um alto nível de fidelidade na simulação do comportamento físico do navio e sua interação com as ondas do mar. A qualidade gráfica também foi amplamente elogiada, contribuindo para uma experiência imersiva e mais próxima da realidade. Os pilotos relataram que o SimPC pode contribuir para aumentar a confiança deles na execução do pouso em condições reais, reforçando a utilidade do simulador para o treinamento. Além disso, o SimPC foi avaliado como um recurso altamente adequado para a capacitação dos pilotos, demonstrando potencial para reduzir o número de acidentes e, conseqüentemente, aumentar a segurança operacional. Por fim, sua adoção representa uma alternativa economicamente viável, possibilitando a economia de recursos sem comprometer a qualidade do treinamento.

Esta pesquisa contribui principalmente para a área de Modelagem e Simulação (M&S), com ênfase na aplicação em Simuladores de Voo, apresentando uma metodologia completa para o desenvolvimento de simuladores de baixo custo voltados para operações militares, servindo como referência para trabalhos futuros. Entre outras contribuições encontra-se a criação do SimPC, uma ferramenta prática e funcional que pode ser aprimorada e expandida para incluir novas funcionalidades e cenários de treinamento. Além disso, foram disponibilizados dados qualitativos que evidenciam a contribuição do simulador para o treinamento de pilotos, auxiliando na validação de sua eficácia. Os resultados também sugerem que simuladores de baixo custo podem superar soluções comerciais na realização

de tarefas específicas, graças à sua flexibilidade e alto grau de customização. Por fim, a pesquisa contribui diretamente para a segurança da aviação ao viabilizar treinamentos que reduzem os riscos em operações reais, permitindo a simulação de cenários adversos que, de outra forma, seriam impraticáveis no treinamento convencional.

7.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, diversas melhorias podem ser exploradas para tornar o SimPC ainda mais realista e eficiente. Entre as funcionalidades que podem ser expandidas, destacam-se:

- Inclusão de novas aeronaves pilotáveis, aumentando o alcance do simulador;
- Inclusão de novas classes de navios militares e civis;
- Inclusão de mais instrumentos no painel, como os sistemas de navegação e controle da aeronave, permitindo uma simulação mais abrangente, que contemple não apenas o pouso em convoo, mas também outros tipos de treinamentos;
- Aprimoramento dos efeitos gráficos, como o efeito da chuva no para-brisas, reduzindo a visibilidade e aumentando o desafio da simulação em condições meteorológicas adversas;
- Expansão dos cenários de simulação com a inclusão de novas áreas para treinamento, como a Base Aérea de São Pedro da Aldeia, permitindo pousos em aeródromos, helipontos em terra, plataformas marítimas;
- Adição de exercícios complementares como o *Pickup* (resgate de carga e pessoas) e o *VERTREP* (reabastecimento vertical), ampliando o escopo de aplicação do simulador;
- A implementação de um modelo de *airwake* baseado no NATO-GD permitiria simular fluxos de ar turbulentos ao redor do navio (19), combinado com a representação do impacto do ar turbulento gerado pelo navio no desempenho do rotor (31), aumentando a precisão da simulação;
- A integração ao SimPC de uma ferramenta de Realidade Aumentada para fornecer feedback visual em tempo real sobre janelas de segurança de pouso, aprimorando a experiência de treinamento com suporte à tomada de decisão (35);
- Integrar uma plataforma *Stewart* ao SimPC, para simular os movimentos da aeronave, poderia agregar maior imersão (25);

- A integração de algoritmos preditivos ao SimPC poderia expandir suas funcionalidades (28), combinado com a inclusão de predição de movimento baseada em modelos de Realidade Aumentada (33), permitindo simulações de pouso automatizado para analisar e comparar o desempenho entre controle manual e automático;
- Implementar no SimPC uma modelagem da dinâmica de colisão do helicóptero com o convoo poderia aprimorar a simulação de condições de pouso mais realistas, especialmente ao incorporar forças atuantes variáveis e estratégias de mitigação de impacto (36).

O SimPC foi projetado com uma arquitetura flexível, permitindo a futura integração de novas aeronaves, navios, cenários e funcionalidades. Essa modularidade possibilita a expansão do simulador para atender a um espectro mais amplo de aplicações, não se restringindo apenas ao meio militar, mas também contemplando o uso em treinamentos civis, como operações offshore e pousos em aeródromos e helipontos urbanos.

A relevância desta pesquisa é evidenciada pelo impacto positivo no treinamento de pilotos, ao proporcionar um ambiente seguro para a prática de manobras complexas, como o pouso em convoo. O desenvolvimento do SimPC mostra que é possível a implementação relativamente rápida e simples de um simulador de baixo custo capaz de atingir um bom grau de realismo e que pode elevar a qualidade do treinamento.

Além disso, esta pesquisa serve como referência para trabalhos futuros que busquem desenvolver simuladores especializados, reduzindo custos sem prejuízo à formação e ao adestramento dos pilotos. Ao apresentar uma metodologia estruturada e validar sua eficácia por meio da coleta e análise de dados objetivos, este estudo estabelece um modelo replicável para o desenvolvimento de simuladores customizados, contribuindo para a evolução da Modelagem e Simulação na aviação militar e civil.

REFERÊNCIAS

- 1 DOOZANDEH, P. From surface realism to training considerations: a proposal for changing the focus in the design of training systems. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Scopus, v. 22, n. 6, p. 689–728, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1849442>>.
- 2 BRASIL, M. do. *Aeronave Esquilo (UH-12)*. Marinha do Brasil, 2014. Acesso em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/mboficial/52096837913/in/photostream/>>.
- 3 ODAIR. *Helicóptero Esquilo (UH 12)*. Marinha do Brasil, 2006. Acesso em: 14 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/mboficial/52099044439/in/photostream/>>.
- 4 WIKIPEDIA. *Blade element theory (BET)*. Acesso em: 23 jan. 2025. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_theory>.
- 5 HODGE, S. J.; FORREST, J. S.; PADFIELD, G. D.; OWEN, I. Simulating the environment at the helicopter-ship dynamic interface: research, development and application. *The Aeronautical Journal*, v. 116, n. 1185, p. 1155–1184, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4050/JAHS.54.022005>>.
- 6 ANDERSON, J. D., Jr. *Fundamentals of Aerodynamics*. 6th. ed. USA: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN 978-1-259-12991-9.
- 7 SHELDAHL, R. E.; KLIMAS, P. C. *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines*. [S.l.], 1981.
- 8 GUIDE, A. *Helicopter Flight Conditions*. Acesso em: 17 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.aircraftsystemstech.com/p/helicopter-flight-conditions.html>>.
- 9 TANNER, P. E.; OVERMEYER, A. D.; JENKINS, L. N.; YAO, C.-S.; BARTRAM, S. M. Experimental investigation of rotorcraft outwash in ground effect. *AHS International Annual Forum & Technology Display*, USA, 2015.
- 10 DONEDA, A. L. C.; OLIVEIRA, J. C. de. *Simulação de Orientação de Aeronave: Integrando Realidade Virtual e Aprendizado de Máquina em uma solução de baixo custo para otimização do treinamento da Marinha do Brasil*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.
- 11 AIRBUS. *H125: A multi-mission workhorse*. Acesso em: 26 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h125>>.
- 12 NAVAL, P. *Navios de guerra brasileiros*. Acesso em: 27 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/ngb/N/N009/N009.htm>>.
- 13 WIKIPEDIA. *Controlador proporcional integral derivativo*. Acesso em: 30 dez. 2024. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Controlador_proporcional_integral_derivativo>.

- 14 SHERMAN, W. R.; CRAIG, A. B. *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. 1st. ed. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2003. ISBN 1-55860-353-0.
- 15 BRASIL, M. do. *Doutrina Militar Naval (DMN)*. 1^a edição. ed. Brasília, Brasil, 2017.
- 16 BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. *Discrete-Event System Simulation*. 4th. ed. UK: Pearson, 2013.
- 17 LAW, A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th. ed. USA: Mc Graw Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-340132-4.
- 18 AÉREA, R. F. *Marinha do Brasil adquire novo simulador para helicóptero Seahawk*. Acesso em: 19 abr. 2024. Disponível em: <<https://forcaarea.com.br/ciaan-da-marinha-inaugura-simulador-de-voe-de-sh-16/>>.
- 19 OWEN, I.; LEE, R.; WALL, A.; FERNANDEZ, N. The nato generic destroyer – a shared geometry for collaborative research into modelling and simulation of shipboard helicopter launch and recovery. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 228, n. 108428, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108428>>.
- 20 PATI, D.; LORUSSO, L. N. How to write a systematic review of the literature. *Health Environments Research & Design Journal*, The Center for Health Design, USA, 2017. 19/05/2024.
- 21 CARRERA-RIVERA, A.; OCHOA, W.; LARRINAGA, F.; LASA, G. How-to conduct a systematic literature review: A quick guide for computer science research. *MethodsX*, Elsevier B.V. 07/09/2022. Disponível em: <<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>>.
- 22 ELSEVIER. *Scopus: Comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database*. Acesso em: 21 jan. 2024. Disponível em: <<https://www.scopus.com/home.uri>>.
- 23 IEEE. *Advancing Technology for Humanity*. Acesso em: 21 jan. 2025. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>.
- 24 ACM, A. for C. M. *ACM Digital Library*. Acesso em: 21 jan. 2025. Disponível em: <<https://dl.acm.org>>.
- 25 VILLACÍS, C.; NAVARRETE, M.; RODRIGUEZ, I.; ROMERO, F.; ESCOBAR, L.; FUERTES, W.; CHAMORRO, S.; BENAVIDES, R.; ZAMBRANO, M.; BURNS, C. Real-time flight simulator construction with a network for training pilots using mechatronics and cyber-physical system approaches. In: *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI-2017)*. [S.l.]: IEEE, 2017. ISBN 978-1-5386-0814-2/17/.
- 26 DONEDA, A. L. C.; OLIVEIRA, J. C. de. Helicopter visual signaling simulation integrating vr and ml into a low-cost solution to optimize brazilian navy training. In: *22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*. [S.l.]: IEEE, 2020. p. 434–442. ISBN 978-1-7281-9231-4/20/\$31,00©2020 IEEE.
- 27 WU, L.-N. Development of an affordable and high-fidelity flight simulation training device. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, IEEE, v. 52, n. 3, p. 335–346, 2020.

- 28 TOPCZEWSKI, S.; NARKIEWICZ, J.; BIBIK, P. Helicopter control during landing on a moving confined platform. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 107315 – 107325, 2020.
- 29 MORA-SOTO, M. E.; MALDONADO-ROMO, J.; RODRÍGUEZ-MOLINA, A.; ALDAPE-PÉREZ, M. Building a realistic virtual simulator for unmanned aerial vehicle teleoperation. *MDPI - Publisher of Open Access Journals*, MDPI, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app112412018>>.
- 30 WANG, W.; LIU, C.; LI, Z.; ZHANG, H. Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation. In: *2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*. [S.l.]: IEEE, 2021. p. 1220–1224. ISBN 978-1-6654-2518-6/21.
- 31 TAYMOURTASH, N.; ZAGAGLIA, D.; ZANOTTI, A.; MUSCARELLO, V.; GIBERTINI, G.; QUARANTA, G. Experimental study of a helicopter model in shipboard operations. *Aerospace Science and Technology*, Elsevier, v. 115, n. 106774, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106774>>.
- 32 ALÁEZ, D.; OLAZ, X.; PRIETO, M.; PORCELLINIS, P.; VILLADANGOS, J. Hil flight simulator for vtol-uav pilot training using x-plane. *MDPI - Publisher of Open Access Journals*, MDPI, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/info13120585>>.
- 33 HUANG, Y.; ZHU, M.; ZHENG, Z.; LOW, K. H. Linear velocity-free visual servoing control for unmanned helicopter landing on a ship with visibility constraint. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: systems*, IEEE, v. 52, n. 5, p. 2979 – 2993, 2022.
- 34 YIN, X.; MA, H.; AN, H.; WEI, Q.; WANG, L.; NIE, B. An unsteady rotor aerodynamics analytical model of hybrid compound high-speed helicopter. In: *2023 the 5th International Conference on Control and Robotics*. [S.l.]: IEEE, 2023. p. 11–16. ISBN 979-8-3503-0762-7/23/\$31.00.
- 35 THOMAS, M.; SERRES, J. R.; RAKOTOMAMONJY, T.; RUFER, F.; MORICE, A. H. P. Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions. *Nature Scientific Reports*, Nature, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-022-26770-2>>.
- 36 QIU, W.; WANG, S.; NIU, A.; FAN, K.; HAN, G.; CHEN, H. Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the stewart platform. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 297, n. 117107, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117107>>.
- 37 UNITY. *Professional Development Tools*. Acesso em: 11 nov. 2024. Disponível em: <<https://unity.com>>.
- 38 X-PLANE. *X-Plane - The world's most advanced flight simulator*. Acesso em: 04 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.x-plane.com>>.
- 39 MATHWORKS. *MATLAB is a programming and numeric computing platform used by millions of engineers and scientists to analyze data, develop algorithms, and create models*. Acesso em: 21 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>.

- 40 FLIGHTLAB. *Finite Element, Component-based, selective fidelity air vehicle modeling and simulation tool*. Acesso em: 16 abr. 2024. Disponível em: <<https://www.flightlab.com/flightlab.html>>.
- 41 BLENDER. *The free and open source 3D creation suite*. Acesso em: 12 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.blender.org/about/>>.
- 42 GIMP. *The Free & Open Source Image Editor*. Acesso em: 14 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.gimp.org>>.
- 43 MICROSOFT. *Visual Studio: O IDE mais abrangente para desenvolvedores*. Acesso em: 15 nov. 2024. Disponível em: <<https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/downloads/>>.
- 44 UIUC. *UIUC Applied Aerodynamics Group*. Acesso em: 17 dez. 2024. Disponível em: <<https://m-selig.ae.illinois.edu/ads.html>>.
- 45 HARRIS, F. D. *Introduction to Autogyros, Helicopters and Other V/STOL Aircraft*. 1st. ed. USA: NASA Ames Research Center, 2012. Volume II: Helicopters. ISBN 978-0-615-71562-9.
- 46 NVIDIA. *Chapter 1. Effective Water Simulation from Physical Models*. Acesso em: 01 jan. 2025. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems/part-i-natural-effects/chapter-1-effective-water-simulation-physical-models>>.
- 47 WIKIPEDIA. *Escala de Beaufort*. Acesso em: 03 jan. 2025. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort>.
- 48 PYTHON. *Python is a programming language that lets you work quickly and integrate systems more effectively*. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.python.org>>.
- 49 PYCHARM. *The Python IDE for data science and web development*. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.jetbrains.com/pycharm/>>.
- 50 NUMPY. *The fundamental package for scientific computing with Python*. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://numpy.org>>.
- 51 MATPLOTLIB. *Matplotlib: Visualization with Python*. Acesso em: 11 jan. 2025. Disponível em: <<https://matplotlib.org>>.
- 52 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 5th. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. ISBN 13:978-0-470-05304-1.
- 53 MINOTRA, D.; FEIGH, K. M. Studying pilot cognition in ship-based helicopter landing maneuvers. In: *74th American Helicopter Society International Annual Forum and Technology Display 2018: The Future of Vertical Flight*. [S.l.]: Scopus, 2018. ISSN 15522938.
- 54 GOOGLE. *Pesquisas e formulários fáceis de criar para todos*. Acesso em: 12 jan. 2025. Disponível em: <<https://workspace.google.com/intl/pt-BR/lp/forms/>>.