

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

PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOÃO MARCOS LEÃO PEREIRA DE ARAÚJO

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

Rio de Janeiro  
2024

## 1 TÍTULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO

Título da Proposta de Dissertação:

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

Título da Capa:

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

Área de Concentração:

Ciência da Computação

Linha de Pesquisa:

Sistemas de Computação

## 2 INTRODUÇÃO

Os simuladores de voo são um componente essencial na formação dos pilotos, permitindo dentro de um ambiente virtual a reprodução de situações reais, oferecendo um meio seguro para o treinamento e desenvolvimento de habilidades necessárias durante um voo real.

As duas principais vantagens dos simuladores são a economia e a segurança. A hora de voo de uma aeronave real inclui gastos com combustível e manutenção, sendo assim muito mais custoso um voo real do que um simulado. Ademais, nos simuladores podem ser reproduzidas, de forma segura, inúmeras situações de emergência que não poderiam ser treinadas no ambiente real.

Sherman & Craig [26] citam os quatro elementos-chave que compõem a realidade virtual (RV) e que são extremamente importantes para a simulação, que são: mundo virtual, imersão, o *feedback* sensorial e interatividade. À medida que a tecnologia de RV evolui, os simuladores proporcionam experiências de treinamento cada vez mais próximas da realidade.

No que tange ao custo de desenvolvimento e construção de um simulador em si, quanto mais recursos disponíveis melhores tecnologias podem ser empregadas, o que impacta diretamente no nível de realismo do simulador e, conseqüentemente, num treinamento que atinge melhor seus propósitos, ou seja, mais efetivo [1]. Porém, qualquer projeto possui um orçamento limitado e, em muitos casos, até insuficiente para a construção de um simulador com todas as funcionalidades desejadas. Para contornar este problema é possível construir um simulador de baixo custo que não ~~possa~~ ~~terá~~ mesmo nível de realismo e imersão, porém pode atender de forma satisfatória parte dos requisitos ~~para~~ ~~de~~ treinamento do piloto, ou até mesmo ser tão bom quanto um simulador de alto custo na execução de determinadas tarefas específicas.

Um dos tipos de operações mais perigosas para uma aeronave de asas rotativas (helicóptero) é o pouso e decolagem em um convoo de um navio em movimento, ~~além~~ ~~de~~ ser um espaço confinado para o pouso, o convoo se movimenta com 6 graus de liberdade (deslocamento angular nos 3 eixos), e, dependendo do estado do mar, esse movimento pode se tornar bastante intenso e irregular, dificultando bastante o pouso e exigindo muita perícia no controle da aeronave por parte do piloto.

Podemos citar, ainda, como fator de risco: as condições climáticas, como chuvas e neblinas que podem atrapalhar a visibilidade; o vento, exercendo forças sobre a aeronave; o período noturno do dia, também com baixa visibilidade; a fadiga e o estresse do piloto, comprometendo a tomada de decisão; dentre outros.

Como a dificuldade e o alto risco de acidente são inerentes a estas operações, sempre é exigido dos pilotos bastante treinamento e concentração para executar com sucesso a manobra. Nesta pesquisa

foi possível observar que a maior parte dos trabalhos científicos na área tentam criar meios de mitigar esses problemas, por meio de uma avaliação detalhada dos fatores que influenciam o pouso e a decolagem. NaFig. 1 podemos observar uma imagem de um Helicóptero Super Cougar UH-15 da Marinha do Brasil realizando uma operação de pouso no convoo do Navio Doca Multipropósito Bahia.



Fig. 1 – Aeronave realiza exercício no convoo do Navio Doca Multipropósito Bahia. [2]

## 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

No âmbito militar, mais especificamente na Marinha do Brasil (MB), este tipo de operação é bastante comum. Meios Aeronavais, como Helicópteros, são os componentes fundamentais do Poder Naval [27], potencializando suas características como mobilidade, permanência, versatilidade e flexibilidade, de forma que as Tarefas Básicas [27] de negar o uso do mar ao inimigo, controlar a área marítima, projetar poder sobre terra e contribuir para a dissuasão possam ser alcançadas.

Helicópteros trabalham na execução e apoio de diversos tipos de Operações como: ataque, antissubmarinos, anfíbias, esclarecimento, apoio logístico, busca e resgate em combate, especiais etc., o que exige diversos lançamentos/recolhimentos da aeronave no convoo do navio.

Como a segurança é a prioridade da aviação e o pouso/decolagem do convoo é um procedimento sensível, é importante que, na formação do piloto e na manutenção de um alto nível de adestramento, sejam treinados de forma exaustiva estes procedimentos. Os simuladores entram como peça-chave nesta missão, fornecendo um ambiente seguro e de relativo baixo custo para o desenvolvimento dessas habilidades.

Este trabalho se propõe a apresentar uma metodologia para o desenvolvimento de um simulador de helicóptero de baixo custo, em realidade virtual, bem como os resultados quantitativos e qualitativos do seu impacto no adestramento de pilotos militares da Marinha do Brasil. Esta metodologia servirá como referência para pesquisas futuras que pretendam seguir caminhos semelhantes.

### 3 CONCEITOS BÁSICOS

Nesta seção, serão apresentados os conceitos fundamentais que servirão como alicerces para uma melhor compreensão desta Proposta, a saber, conceitos pertinentes à área de modelagem e simulação e de realidade virtual. Serão explorados os principais conceitos, suas definições, relevância e interconexões.

#### 3.1 SIMULAÇÃO

Banks & Carson [2013] definem simulação como: “Simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real através do tempo. Seja feita a mão ou em um computador, ela envolve a geração de uma história artificial do sistema, e a observação dessa história artificial para a obtenção de inferências a respeito das características operacionais do sistema real.” [9]

Para compreender a definição de ‘Simulação’ também é importante entender o conceito de ‘Sistema’, que pode ser definido como: “[...] um grupo de objetos que estão unidos por alguma interação regular ou interdependência direcionados a completar algum propósito.” [9]

Law [2000] define ‘Sistema’ como: “Um sistema é definido como uma coleção de entidades que atuam e interagem juntas em prol da realização de algum objetivo lógico.” [10]

A seguir serão listadas algumas características pertinentes da simulação [9]:

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

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

**b)** Vantagens da simulação:

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

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

**c) Desvantagens da simulação:**

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

**d) Aplicações na área militar:**

No treinamento de pilotos, comandantes e operadores, por meio de simuladores de aeronaves, navios, carros de combate, sistemas de guerra, combate a avarias, jogo de guerra etc. 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. Serão inseridos na simulação: a física de voo e o controle da aeronave; o cenário propriamente dito, com sol, nuvens, chuva, vento, neblina; o navio e sua flutuação e deslocamento de acordo com o estado do mar; bem como, o oceano com ondas controláveis e a interação física entre esses objetos.

A simulação permitirá que os pilotos pratiquem manobras de pouso no convoo ~~de voo~~ <sup>de voo</sup> movimento, se familiarizem com este tipo de operação, pratiquem sob várias circunstâncias diferentes de estado do mar, visibilidade, tempo e hora do dia. No ambiente simulado é possível criar quase todas as diferentes circunstâncias sobre as quais uma aeronave ~~o~~ piloto podem estar submetidos, permitindo que a manobra seja praticada quantas vezes for necessário, sem nenhum risco e com custo quase zero.

A simulação, à princípio, terá a funcionalidade específica de pouso em convoo, porém a pesquisa poderá ser expandida futuramente para outras funcionalidades, por meio da implementação e melhoria contínua do simulador.

### 3.2 MODELO DE UM SISTEMA

Um modelo é definido como uma representação de um sistema com o propósito de estudá-lo. Para a maioria dos estudos, é necessário considerar apenas os aspectos do sistema que afetam o

problema em investigação. Esses aspectos são representados em um modelo que, por construção, é uma simplificação do sistema. Por outro lado, o modelo deve ser suficientemente detalhado para permitir conclusões válidas sobre o sistema real. Diferentes modelos do mesmo sistema podem ser necessários conforme o propósito da investigação for alterado. [9]

Um Modelo pode ser classificado como [9]:

**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.
- 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.
- 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. Exemplo, uma aeronave num túnel de vento realizando testes aerodinâmicos.
- 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.
- Estocástico: Contém uma ou mais variáveis aleatórias de entrada. Entradas aleatórias resultam em saídas aleatórias.

A Fig. 2 apresenta uma representação gráfica da relação entre tipos de modelos de simulação. Em laranja está marcado o modelo mais comum utilizado em um simulador de helicóptero, o qual será a ferramenta principal desta pesquisa.

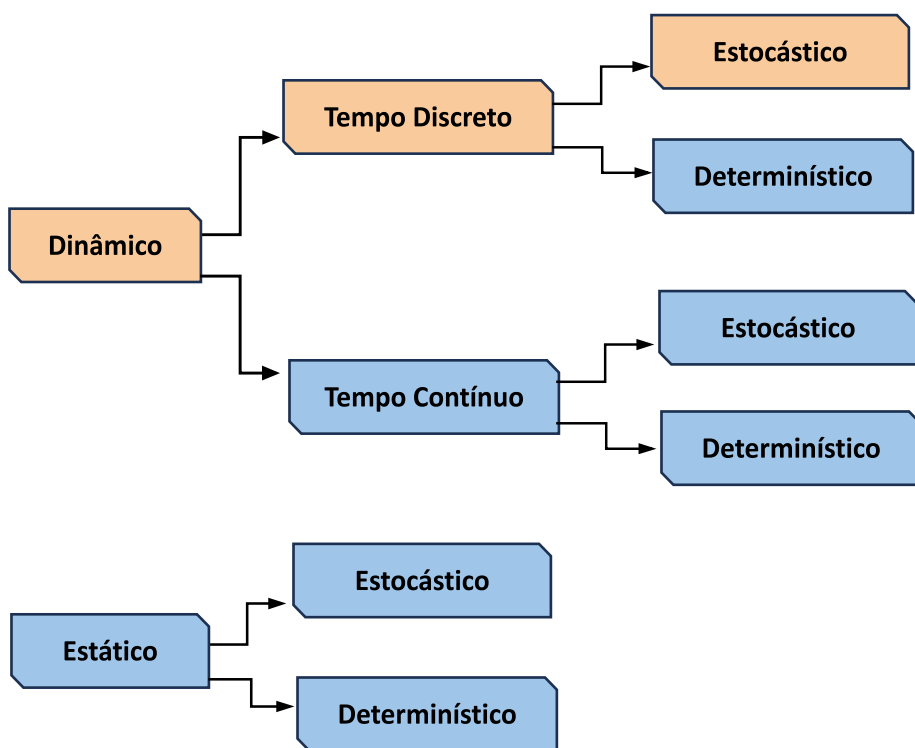


Fig. 2 – Tipos de Modelos de Simulação

Considerando o desenvolvimento do simulador em um ambiente computacional, o modelo do sistema será **matemático**, pois, ao contrário de um modelo físico, utiliza equações e algoritmos para representar e prever o comportamento do helicóptero. Em um ambiente computacional, a simulação depende de cálculos numéricos e lógica programada, não de componentes físicos reais.

A posição da aeronave e do navio, as ondas no oceano, condições climáticas e demais componentes do ambiente variam ao longo do tempo, caracterizando assim o modelo como **dinâmico**.

Embora o voo de uma aeronave seja um sistema contínuo, o simulador é classificado como um modelo de **tempo discreto** pois opera em ambiente computacional. Nesse contexto, cada quadro (ou *frame*) da simulação apresenta, de maneira sequencial e discreta, o estado da simulação em intervalos de tempo específicos.

Por fim, consideramos o modelo como **estocástico** devido à presença de diversas variáveis aleatórias que podem levar a resultados diferentes. Um exemplo disso são os comandos de entrada ( *inputs* ) aplicados pelo piloto no controle da aeronave.



### 3.3 REALIDADE VIRTUAL

A definição da palavra ‘realidade’ é complicada e tentar defini-la por completo pode resultar em discussões filosóficas complexas. Uma possível definição é: “O estado ou qualidade de ser real. Algo que existe independentemente de ideias a respeito dele. Algo que constitui uma coisa real ou natural, contraste com algo que meramente aparente” (tradução livre) [26]. Simplificando, de acordo com os propósitos deste estudo, podemos dizer que é um lugar que existe e onde podemos experimentar.

Já a palavra ‘virtual’ pode ser definida como: “sendo em essência ou efetivamente, mas não de fato.” [26]

Quatro são os elementos-chave ao se experimentar a Realidade Virtual (RV) [26]:

a) Mundo Virtual: “Um mundo virtual é o conteúdo de um determinado meio.” Ou: “Uma descrição de uma coleção de objetos em um espaço e as regras e relações que regem esses objetos.”

b) Imersão: “Sensação de estar em um ambiente; pode ser um estado puramente mental ou pode ser alcançado por meio físico: a imersão física é uma característica definidora da realidade virtual; a imersão mental é provavelmente o objetivo da maioria dos criadores de mídia.”

c) Resposta Sensorial ( *feedback* ) “Capacidade de fornecer aos usuários estímulos sensoriais que correspondem às interações e experiências virtuais que estão ocorrendo. Isso significa que, quando os usuários interagem com objetos virtuais ou ambientes, eles recebem feedback sensorial através dos sentidos, como visão, audição e tato, para criar uma sensação de presença e imersão mais realista.”

d) Interatividade: “Capacidade dos usuários de participar ativamente e influenciar o ambiente virtual por meio de suas ações. Isso pode incluir a capacidade de manipular objetos virtuais, interagir com personagens ou elementos do ambiente, tomar decisões que afetam o curso da experiência virtual e receber feedback em tempo real com base nessas interações. A interatividade é fundamental para criar uma experiência imersiva e envolvente em realidade virtual, permitindo que os usuários explorem e participem ativamente do ambiente virtual.”

No campo dos simuladores de voo militares a RV tem se mostrado há décadas uma ferramenta essencial. Com RV é possível criar ambientes altamente realistas e imersivos que replicam detalhadamente as condições de voo, bem como reproduzir situações que seriam difíceis ou perigosas em um voo real, proporcionando um ambiente seguro para o treinamento de pilotos. Os simuladores ajudam o piloto a desenvolver habilidades motoras e a responder adequadamente às situações de voo, permitindo que os pilotos manipulem os controles da aeronave, interajamos instrumentos de bordo e tomem decisões em tempo real, exatamente como fariam em um voo real.

Um exemplo atual de sucesso na utilização da RV em simuladores de voo é o simulador de helicóptero da Marinha do Brasil para o modelo SH-16 *Seahawk* (Fig. 3), localizado no Centro de Instrução e Adestramento Aeronaval Almirante José Maria do Amaral Oliveira (CIAAN) em São Pedro da Aldeia - RJ. O simulador foi construído por meio de um programa de parceria da MB com a US Navy para a aquisição das aeronaves e do simulador. Durante o projeto foram estabelecidos mais de 2600 requisitos para atenderem às demandas de treinamento dos pilotos e operadores dos sistemas, corroborando com as qualificações para voo, procedimentos de emergência, navegação por instrumentos, lançamento de armamentos, etc. [28]



Fig. 3 - Simulador de Helicóptero SH-16 Seahawk no CIAAN.

Este exemplo demonstra como a RV pode ser uma ferramenta poderosa no treinamento de pilotos de helicópteros, permitindo a prática de manobras complexas e o desenvolvimento de habilidades críticas. A implementação de simuladores de voo baseados em RV não só aumenta a eficácia do treinamento, mas também oferece uma alternativa de baixo custo em comparação com o uso de aeronaves reais, permitindo um maior número de horas de treinamento e, conseqüentemente, uma melhor preparação dos pilotos.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para encontrar os trabalhos científicos relacionados a esta Proposta, além da análise crítica dos artigos encontrados.

### 4.1 QUESTÕES DE PESQUISA

No desenvolvimento desta Proposta, a formulação das Questões de Pesquisa (QP) buscou encontrar as lacunas e dificuldades no desenvolvimento de um simulador de voo de helicóptero de baixo custo e se algum simulador possui a funcionalidade de pouso em convoo de navio em movimento. No processo de pesquisa foram definidas as três QP a seguir:

**QP1:** Quais são as plataformas mais utilizadas e adequadas para o desenvolvimento de um simulador de voo de helicóptero de baixo custo?

**QP2:** Quais tipos de modelo aerodinâmico são utilizados para simular o comportamento físico de um helicóptero?

**QP3:** Os simuladores de voo militares podem simular um pouso de helicóptero no convoo de um navio em movimento?

Um dos maiores desafios deste trabalho é o desenvolvimento do simulador que será a ferramenta base utilizada nesta pesquisa. A QP1 busca compreender melhor esta etapa e traçar o melhor caminho para se desenvolver o simulador.

A QP2 está intimamente ligada ao propósito da QP1, porém mais preocupada especificamente com os detalhes da física da aeronave. Na simulação, é importante que o comportamento físico do helicóptero seja o mais robusto e realista possível, caso contrário poderá não provocar o efeito desejado em contribuir com o adestramento dos pilotos. Cabe salientar, porém, que a física de voo de uma aeronave é algo extremamente complexo, exigindo conhecimentos profundos de engenharia aeronáutica, podendo ser necessário uma equipe de vários engenheiros e anos de desenvolvimento até se chegar a um modelo fiel à aeronave, o que não é o objetivo desta pesquisa. Aqui a implementação servirá apenas como demonstração inicial deste potencial.

No que diz respeito à funcionalidade mais importante em questão, que é o pouso em convoo, a QP3 procura identificar no contexto militar se os simuladores existentes possuem esta funcionalidade e se atendem às necessidades desta pesquisa.

## 4.2 METODOLOGIA DE PESQUISA

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é uma metodologia de pesquisa para coletar, identificar e analisar criticamente os estudos de pesquisa disponíveis (por exemplo, artigos, atas de conferências, livros, dissertações) por meio de um procedimento sistemático [3].

Nesta pesquisa, a metodologia apresentada por A. Carrera-Rivera, et. al. [7] foi aplicada, devido a sua boa organização que segue um método já bem estabelecido na comunidade científica.

Foi adotado o critério PICOC ( *Population, Intervention, Comparison, Outcome, and Context*) [4], o qual desmembra os objetivos da RSL em palavras-chave pesquisáveis e ajudam a formular questões de pesquisa; sendo amplamente utilizado e bem estabelecido em revisões sistemáticas, garantindo clareza, consistência e robustez ao processo de revisão.

A Tabela I apresenta os assuntos e as palavras-chave foram utilizados como base para a criação da sequência de palavras de busca (*string de busca*) nas plataformas digitais de pesquisa científica.

TABELA I  
CRITÉRIO PICOC

PICOC	Descrição	Sinônimos
Population	Helicopter Pilots under training	Rotary-wing aircraft, Chopper, Aviator, Instruction.
Intervention	Development of a low cost Flight Simulator with a specific functionality for landing on a ship's deck.	Build, Cheaper, Training Device, FTD, Ship's Platform, Helideck.
Comparison	Pilots who received training in conventional Physical Flight Simulators.	PFS.
Outcome	Performance measures of pilots during training	Training Progress, Improvement, Effectiveness
Context	Training of military pilots in aircraft simulators	Military training.

Baseado no critério PICOC, a sequência de palavras de busca foi construída com base nas palavras-chave sinônimos separadas pelo operador lógico 'OR' e palavras-chave da descrição separadas pelo operador 'AND', chegando na seguinte sequência:

Pilot AND (Helicopter OR Aircraft OR Rotary-wing OR Chopper) AND (Development OR Build) AND (Flight Simulator OR Training Device OR FTD) AND (Landing OR Touchdown OR Approach) AND ("Ship deck" OR Platform) AND (Training OR Practice OR Progress OR Experience) AND Military.

Obs. 1: Algumas palavras-chave foram omitidas para evitar uma sequência muito longa.

Obs. 2: A sequência de palavras serviu como ponto de partida e base para a pesquisa, porém algumas alterações foram feitas, de forma a encontrar outros documentos e artigos científicos relevantes.

O objetivo principal foi buscar os documentos científicos cujo assunto é o treinamento de pilotos de helicóptero para o pouso em convoo de navio em movimento, no âmbito militar.

Foram utilizadas como fonte de busca as bibliotecas digitais mais relevantes para a área da Ciência da Computação, a saber, Scopus, IEEE Digital Library e ACM Digital Library. A Tabela II apresenta as quantidades de documentos encontrados em cada plataforma ao ser utilizada a pesquisa avançada com a sequência de palavras. Alguns documentos não puderam ser acessados em virtude do link estar inacessível ou direcionar para outras plataformas pagas. Considerando o conjunto inicial de trabalhos, foi realizada uma busca e remoção de artigos duplicados. Em seguida, os artigos foram filtrados pela relevância do título e “ *abstract* ”.

TABELA II  
RESULTADO DA BUSCA

Base de dados	Período	Documentos encontrados	Acessíveis	Título/Abstract relevante
Scopus	2019-2024	41	24/41	15/24
IEEE Digital Library	2019-2024	13	12/13	5/12
ACM Digital Library	2019-2024	47	28/47	7/28

A Tabela III apresenta os critérios utilizados para inclusão e exclusão de artigos.

TABELA III  
CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Tipo de critério	Descrição
Período	Inclusão: De 2019 até 2024; Exclusão: Trabalhos anteriores a 2019;
Idioma	Inclusão: Inglês e Português; Exclusão: Outros Idiomas;
Tipo de literatura	Inclusão: Artigos de periódicos, conferências e livros; Exclusão: “Literatura cinza”;
Impacto científico	Inclusão: Todos;
Acessibilidade	Exclusão: Não acessíveis;
Relevância para as Questões de Pesquisa.	Exclusão: Aqueles que não atenderam nenhuma QP.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE

Nesta etapa foram elaboradas questões que contém aspectos importantes para garantir a qualidade dos artigos analisados nesta pesquisa. Para que determinado estudo ou pesquisa a respeito de um tema seja aplicável a esta pesquisa, é esperado que concordemos com a metodologia aplicada, com a validação, verificação e com o resultado. Três perguntas para Avaliação de Qualidade (AQ) feitas:

**AQ1:** Metodologia da Simulação: Como a metodologia da simulação foi estruturada e implementada neste artigo?

**AQ2:** Validação e Verificação: Quanto aos procedimentos adotados para validar e verificar o modelo de simulação proposto. O simulador foi desenvolvido de forma correta? O simulador atende ao que foi proposto?

**AQ3:** Aplicação e Resultados Práticos: Como o simulador proposto foi aplicado e quais resultados práticos foram obtidos?

A etapa final para selecionar os artigos que constituíram a principal fonte desta pesquisa foi criar uma pontuação de acordo com o quanto cada artigo responde às QP formuladas e cumpre com a AQ.

#### Pontuação quanto às QP:

Se o artigo responde de forma relevante à cada QP lhe é atribuída pontuação da seguinte forma:

Relevância	Pontuação
Baixa	0
Média	1
Alta	2

#### Pontuação quanto à AQ:

Cada artigo relevante para o estudo foi examinado com base nas três perguntas de AQ, e uma pontuação foi atribuída a cada um da seguinte forma:

Concordância	Pontuação
Discordo	0
Concordo parcialmente	1
Concordo	2

As pontuações de cada artigo foram organizadas como apresentado na Tabela IV. A Pontuação Total foi calculada somando-se toda a pontuação obtida nas QP e AQ. O ponto para um artigo fazer parte do estudo foi uma pontuação total maior ou igual a 7. De um total de 27 artigos relevantes, apenas 13 passaram pelo filtro de QP e AQ. Por uma questão de concisão, os artigos que não atingiram a pontuação mínima foram omitidos da tabela. Por outro lado, aqueles com as pontuações mais altas, que demonstraram um potencial de contribuição mais substancial e aplicável para a pesquisa foram expostos.

TABELA IV  
RELEVÂNCIA PARA AS QP E AQ

Resultado da RSL	Relevância para Questão de Pesquisa [0: baixa, 2: alta]			Concordância de Avaliação de Qualidade [0: baixa, 2: alta]			Total
	QP1	QP2	QP3	AQ1	AQ2	AQ3	
Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions. [24]	2	0	2	2	2	2	10
Weihan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart platform. [22]	0	1	2	2	2	2	9
Aláez, D. et al. (2022) HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane. [13]	2	1	0	2	2	2	9
Yanting Huang, et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint. [20]	1	0	2	2	2	2	9
Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Virtual Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation. [11]	2	2	0	2	1	2	9
Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device. [12]	2	1	0	2	2	2	9
Antônio Doneda, et. al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML into a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training. [19]	1	0	1	2	2	2	8
Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Platform. [17]	0	0	2	2	2	2	8
Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter. [16]	0	2	0	2	2	1	7
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. [23]	0	1	2	2	1	1	7
Neda Taymourtash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations. [21]	0	1	2	1	2	1	7
Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation. [18]	1	2	0	1	1	2	7
César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches. [15]	2	0	0	2	1	2	7

Por sua vez, a Tabela V a seguir apresenta um resumo das referências com objetivo, método, contribuição, limitações e local de publicação:

TABELA V  
RESUMO DAS REFERÊNCIAS

Referência	Objetivo	Método	Contribuição	Limitações	Publicado em
César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches. [15]	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.	- Necessidade espaço físico; - Delay; - Custos de construção e manutenção;	IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSII)
Antônio Doneda, et al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML into a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training. [19]	Criação de um simulador de baixo custo para treinamento de Oficial de Lançamento e Pousos (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;	22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR).
Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device. [12]	Construção de um Simulador de Voo de alto custo.	Pesquisa científica na literatura da área de simulação.	Artigo com as questões mais importantes relativas a área de Simulação.	- Estudos semelhantes para simuladores de baixo custo;	Theoretical Issues in Ergonomics Science – Journal.
Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Confined Platform. [17]	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 teste do algoritmo de predição de movimento;	IEEE.
Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Virtual Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation. [11]	Desenvolvimento de simulador virtual para drone quadrotor.	Criação de um simulador utilizando Unity 3D.	Criação de um simulador fiel para drone quadrotor.	- Complexidade do comportamento físico; - Limitações características de sist. computacionais;	MDPI – Journal, Switzerland.
Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation. [18]	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.	xxx	3ª International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)
Neda Taymourtash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations. [21]	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.	Segurança nas operações de pouso em convés de navios.	- Baixa resolução do hardware utilizado para coleta dos dados; xxx	Ocean Engineering 228.
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. [23]	Estudar a influência do formato das fragatas no fluxo de ar e no pouso de helicópteros no convóio.	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.	xxx	Ocean Engineering 228.
Aláez, D. et al. (2022) HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane. [13]	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.	xxx	MDPI – Journal, Switzerland.
Yanting Huang, et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint. [20]	Método para pouso de aeronave não tripulada em convóio de navio.	Análise visual do convóio e aplicação de algoritmo de predição de movimento.	Método para pouso automático em plataformas móveis.	- Complexo movimento da plataforma; - Precisão do sistema de navegação;"	IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems.
Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter. [16]	Estudo da estabilidade do rotor principal para helicópteros de alta velocidade.	Análise em túnel de vento do modelo matemático.	Auxiliar no desenvolvimento de helicópteros de alta velocidade.	xxx	5th International Conference on Control and Robotics (ICCR).
Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions. [24]	Uso de RA para auxiliar o pouso de helicóptero em convóio de navio em movimento.	Modelo de análise e predição da posição do navio e uso de RA auxiliando a tomada de decisão apresentando ao piloto a melhor janela para pouso.	Ferramenta e método para auxiliar a tomada de decisão do piloto no pouso de helicóptero.	Ambiente simulado.	Nature science jornal.
Weihuan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart platform. [22]	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.	xxx	Ocean Engineering 297.



#### 4.4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta seção cada QP será analisada individualmente, de acordo com as informações mais relevantes encontradas nos artigos selecionados para esta pesquisa.

*QP1: Quais são as plataformas mais utilizadas e adequadas para o desenvolvimento de um simulador de voo de helicóptero de baixo custo?*

Existem basicamente quatro tipos de simuladores que os pesquisadores utilizam em seus estudos:

a) Software comercial: São simuladores prontos, vendidos em lojas de jogos ou sites especializados. Podendo atingir variados graus de realismo, desde aqueles mais focados no entretenimento dos usuários àqueles focados em ser utilizados como ferramenta de teste para a indústria aeronáutica. Também são chamados de “solução de prateleira”, pois o pesquisador simplesmente escolhe dentre várias opções aquela que mais se adequa à pesquisa. Podemos citar com exemplo o XPlane (mais utilizado), Microsoft Flight Simulator e o FLIGHTLAB.

A vantagem de utilizar softwares comerciais é utilizar uma ferramenta pronta para uso. Como desvantagem, em geral, essas ferramentas oferecem ao usuário pouca ou nenhuma flexibilidade de customização. Um trabalho de pesquisa pode exigir funcionalidades que não existem em um simulador comercial, ou que existem, mas são limitadas e não atendem às necessidades da pesquisa.

b) Customizado: O desenvolvimento de um simulador próprio permite implementar as funcionalidades específicas desejadas para a pesquisa, tornando-a muito mais flexível. Como desvantagem podemos citar a necessidade de conhecimentos específicos para o desenvolvimento e o tempo que pode levar até o simulador ficar pronto. Hoje, existem várias ferramentas de fácil acesso que permitem o desenvolvimento, também chamadas de *game engines*, podemos citar: a Unreal, Godot e Unity3D [29], a qual é uma das mais utilizadas nas pesquisas que escolheram o caminho da solução customizada.

c) Physical Flight Simulator (PFS): São dispositivos de treinamento que replicam a experiência de pilotar uma aeronave em ambiente controlado. Esses simuladores incluem uma cabine de comando física, controles realistas, e sistemas que reproduzem com precisão os movimentos, sons e outros aspectos do voo. Os PFS são a solução mais completa utilizada para treinamento de pilotos. São equipamentos que ocupam muito espaço físico e também muito caros, normalmente produzidos pelas fabricantes da aeronave e sob encomenda.

Como desvantagens de utilizar PFS podemos citar a dificuldade de acesso a esses equipamentos e o software e hardware que não permitem modificações, a não serem aquelas realizadas pelo fabricante, limitando assim a customização. Vantagem é poder realizar a pesquisa com o que existe de melhor na simulação, o estado da arte.

Construir o próprio cockpit com equipamentos encontrados no mercado também é uma possibilidade, porém bastante desafiadora. Os custos podem ser muito inferiores a um PFS mas ainda assim podem ser relativamente altos, somando a necessidade de conhecimentos específicos em eletrônica, computação, redes, controle e automação.

d) Modelo físico: Construção simplificada e em escala reduzida da aeronave em estudo. Técnica muito utilizada para estudar a dinâmica de fluidos em uma aeronave em túneis de vento ou de um navio e sua estabilidade.

Em virtude das vantagens e desvantagens citadas, será utilizado nesta pesquisa um simulador próprio, customizado, desenvolvido utilizando a plataforma Unity3D [29], de forma a ter uma ferramenta personalizável, que atenda às necessidades do estudo. Quanto ao hardware, serão utilizados computadores convencionais para executar o software e controles de jogos disponíveis no mercado. Ainda está em estudo a possibilidade de utilizar PFS do CIAAN para complementar a pesquisa.

*QP2: Quais tipos de modelo aerodinâmico são utilizados para simular o comportamento físico de um helicóptero?*

Os artigos que utilizaram alguma solução pronta, como por exemplo o X-Plane, se utilizaram de aeronaves já modeladas, ou então inseriram apenas os parâmetros da aeronave personalizada necessária à pesquisa, ou seja, não implementaram a modelagem da física completa da aeronave. Outros artigos, por sua vez, implementaram o modelo completo.

O modelo de sistema que apareceu mais frequentemente na pesquisa é o *Blade Element Theory* (BET) no qual as asas rotativas (pás ou lâminas rotor) são subdivididas em elementos discretos e, então, a força é calculada sobre cada um deles e aplicada proporcionalmente. Quanto menor for cada um desses elementos, mais fiel será a representação, porém exigirá também mais poder computacional. Na Fig. 4 podemos ver um exemplo de pá e um dos elementos em destaque.

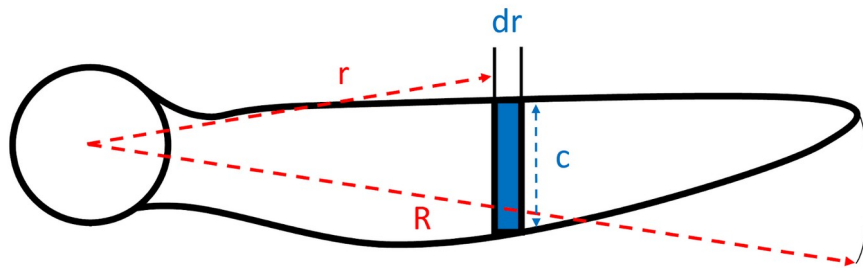


Fig. 4 - Elemento da pá

O modelo BET também pode ser aplicado de forma semelhante para calcular o arrasto e a força provocados pelo vento sobre a fuselagem, dividindo-a em vários elementos calculando os esforços sobre cada um deles.

Como estado da arte da modelagem de um rotor, podemos citar o software comercial FLIGHTLAB, que é utilizado na indústria aeronáutica. Ele é descrito no seu próprio site como: “um pacote de software de modelagem e análise de última geração, baseado em elementos finitos, componentes, com fidelidade seletiva. Ele suporta a modelagem e simulação de aeronaves de asa rotativa, aeronaves de asa fixa, aeronaves compostas, helicópteros, multirotores, drones, carros voadores e configurações de aeronaves experimentais.” (tradução livre) [25] Nele estão implementados todos os detalhes físicos, incluindo a dinâmica de fluidos que influenciam na aeronave, entretanto, além de ser uma solução extremamente complexa, e que exige conhecimento de profissionais de áreas, a licença do software passa de 100 mil dólares, tendo um público alvo bem específico.

Quanto a esta pesquisa, o objetivo é que a modelagem consiga representar, com um bom grau de realismo, a dinâmica de voo da aeronave, porém a solução precisa ser relativamente simples e rápida de ser implementada, sendo BET um modelo compatível com essas características.

*QP3: Os simuladores de voo militares podem simular um pouso de helicóptero no convoo de um navio em movimento?*

Desconsiderando os simuladores de voo profissionais personalizados, de alto custo e de grande porte, muitos simuladores comerciais não oferecem a funcionalidade em questão. Por exemplo, o X-Plane e o Digital Combat Simulator (DCS), embora ofereçam a funcionalidade, esta é bastante limitada e não reflete adequadamente a realidade. Um dos pontos nos quais são mais limitados é a oscilação simplificada (de pequena amplitude, previsível ou até mesmo inexistente) do navio e seu

convoo, o que pode ser bastante simplista e diferente da realidade, principalmente em situações extremas como quando o mar está agitado.

Esta pesquisa, por sua vez, propõe simular da forma mais realista possível o estado do mar, de acordo com a Escala Beaufort, que é uma escala prática que mede a intensidade dos ventos e seus efeitos sobre o mar, e é a escala oficial utilizada pela MB. Propõe, ainda, que o navio reaja, ou seja, flutue de acordo com o estado do mar, fazendo com que seja possível simular situações reais que possam vir a ser enfrentadas pelos pilotos.

#### 4.5 COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

A Tabela VI apresenta a comparação dos trabalhos relacionados e é possível observar que a maior parte deles não se propuseram a estudar diretamente os impactos da sua pesquisa no adestramento de pilotos, e os que se propuseram a isto, não estudaram a questão específica do pouso em convoo de um navio em movimento. Outro ponto a ser observado é que parte dos trabalhos não desenvolveram simulador próprio, utilizando-se de simuladores comerciais que modelam de forma muito simplista o comportamento do navio e do estado do mar, o que não reflete satisfatoriamente a realidade, bem como também não empregam pilotos formados para testes de validação, limitando assim a confiabilidade da metodologia empregada.

Esta pesquisa se propõe a completar essas lacunas, iniciando com a criação de um simulador com a funcionalidade específica de pouso em convoo, apresentando a modelagem do sistema, utilizar pilotos formados e com experiência neste tipo de operação específica para os testes e, por fim, avaliar o quanto esta metodologia pode impactar no seu adestramento, contribuindo assim para a segurança da aviação.

TABELA VI  
COMPARAÇÃO DOS TRABALHOS RELACIONADOS

Referência	Ferramenta de simulação.	Desenvolve e apresenta a própria modelagem do sistema?	Utiliza formados para testes e validação?	Aeronave realiza pouso em convoo de navio em movimento?	Realiza estudo da contribuição para o adestramento de pilotos?
César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches. [15]	Customizada	Não	Sim	Não	Sim
Antônio Doneda, et al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML into a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training. [19]	Customizada	Não	N/A	Sim	Sim
Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device. [12]	X-Plane	Sim	Não	Não	Não
Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Confined Platform. [17]	Flightlab	Sim	N/A	Sim	N/A
Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Virtual Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation. [11]	Customizada	Sim	Não	Não	Não
Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation. [18]	Customizada	Sim	Não	Não	Não
Neda Taymourtash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations. [21]	N/A	Sim	N/A	Sim	Não
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. [23]	Modelo físico	Sim	N/A	Sim	Sim
Aláez, D. et al. (2022) HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane. [13]	X-Plane	Sim	Não	Não	Não
Yanting Huang, et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint. [20]	Customizada	Sim	N/A	Sim	N/A
Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter. [16]	Modelo físico	Sim	Não	Não	Não
Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions. [24]	Customizada	Sim	Não	Sim	Não
Weihan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart platform. [22]	Customizada	Sim	Não	Sim	Não
<b>Esta proposta</b>	<b>Customizada</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>

## 5 A PROPOSTA

A Revisão Sistemática da Literatura apontou uma carência de estudos que abordem o impacto no treinamento de pilotos militares por meio do desenvolvimento de um simulador de voo de helicóptero de baixo custo aplicado ao pouso em convoo de um navio em movimento. Nenhum artigo científico pesquisado se propôs a responder de forma satisfatória às três QP levantadas.

### 5.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O problema de pesquisa de que trata a presente Proposta envolve os três pontos a seguir:

- Quais os desafios e ferramentas utilizadas para o desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo;
- Como é feita a modelagem do comportamento físico da aeronave e;
- O quanto esta ferramenta pode apoiar no adestramento de pilotos militares de helicóptero no que tange especificamente ao pouso em convoo de navios em movimento.

### 5.2 HIPÓTESE

O desenvolvimento de um simulador de voo de baixo custo pode contribuir de forma significativa para o adestramento de pilotos militares de helicóptero, ~~forne~~ <sup>de</sup> forma que possam estar mais capacitados para executar manobras de pouso em convoo de navio em movimento.

### 5.3 JUSTIFICATIVA DA HIPÓTESE

Vários estudos, como por exemplo Pooyan Doozandeh (2021) [1], comprovam que a simulação contribui com o adestramento de pilotos de aeronaves. Os simuladores, porém, podem variar bastante em grau de realismo, apesar de que, quanto maior o grau de realismo exigido maior o custo do simulador. A Fig. 5 é extremamente importante para compreender a relação entre essas variáveis. Podemos observar neste gráfico que, mesmo um simulador de relativo baixo custo é capaz de contribuir no treinamento dos usuários. Além disso, a partir de um certo ponto, o aumento no custo do simulador não mais impacta significativamente este treinamento, tendo uma relação custo benefício desvantajosa.

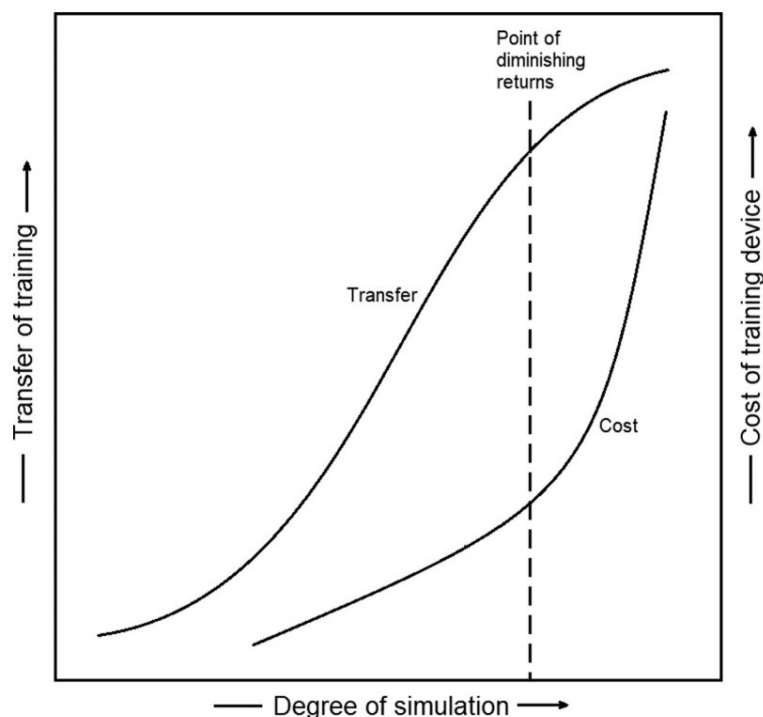


Fig. 5 – Relação entre realismo, custo e impacto no treinamento. [1]

Uma das formas de reduzir bastante o custo de um simulador e, ainda assim, manter elevada a sua capacidade de contribuir com o treinamento é fazer com que o simulador seja especializado em apenas um determinado tipo de tarefa.

Sendo assim, a proposta desta pesquisa é desenvolver um simulador de baixo custo especializado na tarefa ou operação de pouso em convoo de navio em movimento. Apesar de inicialmente possuir poucas funcionalidades, pode contribuir bastante com o treinamento dos pilotos, pois é um tipo de manobra de altíssimo risco, com inúmeros acidentes registrados ao longo do tempo nas forças armadas mundo afora, e que pode colocar em risco a vida das tripulações da aeronave e do navio. Diante disso, é extremamente importante que o piloto esteja preparado para executar o pouso.

#### 5.4 OBJETIVOS

**Objetivo geral:** Apresentar uma metodologia para o desenvolvimento de um simulador de helicóptero em realidade virtual, de baixo custo, que permita o pouso em convoo de um navio em movimento, bem como analisar os resultados do seu impacto no treinamento de pilotos militares

envolvidos neste tipo de operação. Esta metodologia servirá como referência para pesquisas futuras que pretendam seguir caminhos semelhantes.

### **Objetivos específicos:**

1. Desenvolver um simulador de voo para helicóptero, de forma que o mesmo possua um comportamento físico realista;
2. Realizar testes com pilotos para obter uma opinião (feedback) dos parâmetros que precisam ser ajustados;
3. Preparar um questionário com perguntas relevantes que permitam avaliar o piloto sobre os exercícios de pouso simulados;
4. Realizar os exercícios simulados com os pilotos;
5. Avaliar e interpretar os resultados.

## **5.5 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS**

1. A apresentação de uma metodologia completa para o desenvolvimento de um simulador de helicóptero de baixo custo que possa servir como referência para trabalhos futuros que pretendam seguir o mesmo caminho, de forma que possam conhecer as vantagens, desvantagens, dificuldade, custo e tempo de um projeto semelhante;
2. O simulador propriamente dito, o qual poderá, em trabalhos futuros, receber novas funcionalidades e melhorias, abrangendo, por exemplo, o treinamento de outros tipos de exercícios e operações com helicópteros;
3. A implementação de melhorias em algumas funcionalidades desenvolvidas em outros simuladores dos trabalhos relacionados;
4. A disponibilização de dados objetivos e quantitativos do qual a metodologia pode contribuir com o adestramento de pilotos militares;

## **5.6 REQUISITOS DO SIMULADOR**

O objetivo principal do simulador é ser usado como ferramenta para treinar os pilotos para o pouso no convoo de um navio em movimento. Para atingir este objetivo é de uma importância que tanto a aeronave como o navio tenham comportamento o mais realista possível. As condições climáticas também podem vir a influenciar bastante o pouso, sendo normalmente um fator dificultador,



sendo importante também que seja implementado. É importante também que todos os parâmetros da simulação possam ser alterados em tempo real e controlados remotamente ~~via~~ rede por um instrutor qualificado. Os demais fatores secundários ao pouso em si serão abstraídos como, por exemplo, comunicações via rádio, navegação, demais instrumentos da aeronave, equipe de apoio no convés etc.

Face ao exposto, os seguintes requisitos foram definidos:

1. O simulador deve conter principalmente a função de pouso em convoo de navio em movimento;
2. Em um cenário com oceano e ondas, o navio deverá flutuar, deslocar-se e se comportar também de forma realista reagindo de acordo com o oceano, ficando o navio e seu convés sujeitos a este movimento oscilatório do mar;
3. O vento deverá atuar como uma força sobre o helicóptero;
4. Os parâmetros da simulação como vento, visibilidade e estado do mar poderão ser controlados remotamente, via rede, por um instrutor em outra máquina;
5. Controles da aeronave: Um piloto poderá controlar por meio de joystick o Acelerador ( *Throttle* ), o Cíclico (Cyclic), o Coletivo (Collective) e os Pedais (Pedals);
6. O piloto terá acesso às informações de velocidade e altitude da aeronave.

## 6 PLANO DE AÇÃO E CRONOGRAMA

A seguir serão apresentados o plano de ação e o cronograma das atividades envolvidas para concluir a dissertação.

Primeiramente, será utilizado o motor criação de jogos Unity3D [29] para desenvolver o simulador que será utilizado como ferramenta principal para a pesquisa. A aeronave de referência será o Helicóptero H125 (Esquilo) fabricado pela Airbus e utilizado pela MB (Fig. 6). Será criado o modelo 3D e implementada a modelagem física que governará o comportamento da aeronave.



Em seguida, será criado o cenário com céu, sol e nuvens simplificadas e um oceano com ondas cujo modelo matemático será o *Gerstner Wave*. Para aumentar o grau de realismo da simulação serão implementados: um efeito de chuva, neblina com intensidade variável, controle da hora (dia e noite) e o vento aplicando uma força sobre a aeronave.

O próximo passo será utilizar um modelo 3D de Fragata classe Niterói (Fig. 7), o qual será o navio de referência com convoo próximo à popa disponível para o pouso. Será feita a modelagem da flutuação do navio para reagir de acordo com as ondas do oceano, sendo aplicado também uma propulsão e um controle de leme simplificados para que seja possível controlar o movimento do navio.



Fig. 7 – Fragata Liberal (F43) Classe Niterói pertencente à Marinha do Brasil. [31]

Após a conclusão destas etapas de desenvolvimento do simulador, serão convidados pilotos para testar o mesmo e verificar, principalmente, se os controles da aeronave respondem de acordo com a realidade, onde os ajustes necessários deverão ser feitos até atingir um grau satisfatório. Após a devida calibração e validação, de acordo com o esperado, poderão ser iniciados os adestramentos.

Será elaborado, então, um questionário para os pilotos com perguntas-chave para avaliar o quanto o simulador está contribuindo para seu nível de adestramento. Durante os exercícios de pouso serão também registradas algumas métricas, como o tempo de realização da manobra, precisão do pouso, quantidade de erros e acertos e velocidade relativa da aeronave em relação ao convoo.

Por fim, existe a intenção de comparar os resultados com exercícios idênticos realizados nos simuladores do CIAAN, sendo esta etapa ainda incerta pois dependerá da disponibilidade e autorização daquele Centro de Instrução.

A Tabela XII apresenta o cronograma de acordo com o plano de ação apresentado neste capítulo.

TABLE VII  
CRONOGRAMA

ATIVIDADE	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Elaboração da Proposta de Dissertação	X	X	X									
Defesa da Proposta				X								
Simulador – Aeronave voando controlada pelo piloto			X	X								
Simulador – Cenário pronto com oceano			X	X	X							
Simulador – Navio em deslocamento			X	X	X	X						
Simulador – Pronto para testes							X					
Testes com pilotos convidados (CIAAN)*							X	X				
Escrita de Artigo Científico									X	X	X	
Elaboração da Dissertação							X	X	X	X	X	
Defesa												X

\* Centro de Instrução e Adestramento Aeronaval Almirante José Maria do Amaral Oliveira, em São Pedro da Aldeia – RJ.

## 7 REFERÊNCIAS

- [1] Pooyan Doozandeh (2021) From surface realism to training considerations: a proposal for changing the focus in the design of training systems, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 22:6, 689-728, DOI: 10.1080/1463922X.2020.1849442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1849442>>
- [2] Marinha do Brasil. Aeronave realiza exercícioconvoo do Navio Doca Multipropósito Bahia [...]. 23 de set. de 2016. Facebook: Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.facebook.com/marinhaoficial/photos/a.121850657885914/1138203069583996/?type=3>>. Acesso em: 01 de abr. de 2024.
- [3] D. Pati, L.N. Lorusso, How to write a systematic review of the literature, *HERD* 11 (1) (2018) 15–30.
- [4] K. Petersen, S. Vakkalanka, L. Kuzniarz, Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update, *Information and software technology* 64 (2015) 1-18.
- [5] C. Wohlin, P. Runeson, M. Höst, M.C. Ohlsson, B. Regnell, A. Wesslén, Systematic Literature Reviews, in: *Experimentation in Software Engineering*, Springer, Berlin Heidelberg, 2012, pp. 45–54, doi:10.1007/978-3-642-29044-2\_4
- [6] E. Vieira, J. Gomes, A comparison of Scopus and Web of Science for a typical university, *Scientometrics* 81 (2) (2009) 587–600.
- [7] A. Carrera-Rivera, W. Ochoa, F. Larrinaga, G. Lasa, “How to conduct a systematic literature review: A quick guide for computer science research”, *MethodsX* 9, 2022, 101895, 10.1016/j.compind.2022.103730
- [8] Robinson, S. (2004). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [9] Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L. & Nicol, M. (2013). *Discrete-Event System Simulation*. Londres: Pearson.
- [10] Law, A. M. & Kelton, W. D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill Education.
- [11] Mora-Soto, et al. (2021). Building a Realistic Simulator for Unmanned Aerial Vehicle Teleoperation.
- [12] Lung-Nan Wu (2020). Development of an Affordable and High-Fidelity Flight Simulation Training Device.
- [13] Aláez, D.; Olaz, X.; Prieto, M.; Porcellinis, P.; Villadangos, J. HIL Flight Simulator for VTOL-UAV Pilot Training Using X-Plane. *Information* 2022, 13, 585. <https://doi.org/10.3390/info13120585>.

- [15] César Villacís, et al. (2017). Real-Time Flight Simulator Construction with a Network for Training Pilots using Mechatronics and Cyber-Physical System Approaches.
- [16] Xinfan Yin, et al. (2023). An Unsteady Rotor Aerodynamics Analytical Model of Hybrid Compound High-speed Helicopter.
- [17] Sebastian Topczewski, et. al. (2020). Helicopter Control During Landing on a Moving Confined Platform.
- [18] Wei Wang, et. al. (2021). Helicopter dynamic modeling and system development for flight simulation.
- [19] Antônio Doneda, et. al. (2020). Helicopter visual signaling simulation Integrating VR and ML a low-cost solution to optimize Brazilian Navy training.
- [20] Yanting Huang et. al. (2022). Linear Velocity-Free Visual Servoing Control for Unmanned Helicopter Landing on a Ship With Visibility Constraint.
- [21] Neda Taymourtash, et. al. (2021). Experimental study of a helicopter model in shipboard operations.
- [22] Weihan Qiu, et. al. (2024). Modeling and analysis of landing collision dynamics for an active helideck based on the Stewart platform.
- [23] 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.
- [24] Mathieu Thomas, et. al. (2023). Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions.
- [25] FLIGHTLAB Homepage. Disponível em: <<https://www.flightlab.com/flightlab.html>>. Acesso em: 16 de abr. de 2024.
- [26] Sherman, W. R. & Craig, A. B. (2003). Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design. Morgan Kaufmann.
- [27] EGN. Doutrina Militar Naval (DMN). Escola de Guerra Naval: Marinha do Brasil, 2017. 1-4 p.
- [28] Revista Força Aérea. Disponível em: <<https://forcaarea.com.br/ciaan-da-marinha-inaugura-simulador-de-voo-de-sh-16/>>. Acesso em: 19 de maio de 2024.
- [29] Unity game engine. Disponível em: <<https://unity.com>>. Acesso em: 19 de maio de 2024.
- [30] Airbus homepage. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/products-services/helicopters/civil-helicopters/h125>>. Acesso em: 28 de maio de 2024.
- [31] Marinha do Brasil. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/meios-navais/fragatas-classe-niteroi>>. Acesso em: 28 de maio de 2024.

João Marcos Leão Pereira de Araújo

CT João Marcos Leão Pereira de Araújo  
Aluno de Pós-graduação em Sistemas e Computação

[Assinatura]

Maj Gabriela Moutinho de Souza Dias - DSc  
Orientadora

[Assinatura]

Prof. Jauvane Cavalcante de Oliveira - DSc  
Orientador

[Assinatura]

Maj Gabriela Moutinho de Souza Dias - DSc  
Coordenadora de Pós-graduação

Concordo com a presente Proposta de Dissertação e declaro que as necessidades para sua execução serão garantidas pela Seção.

IME, em 3 de julho de 2024.

[Assinatura]

JULIO CESAR DUARTE - Cel  
CHEFE da SE/9