

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL, BASEADO EM
JOGOS SÉRIOS, PARA TREINAMENTO DE TIRO
EMBARCADO APLICADO À AERONAVES DA POLÍCIA
MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

ROBERTO JÚNIO SILVA CAETANO

UBERLÂNDIA

2024

ROBERTO JÚNIO SILVA CAETANO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL, BASEADO EM
JOGOS SÉRIOS, PARA TREINAMENTO DE TIRO
EMBARCADO APLICADO À AERONAVES DA POLÍCIA
MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Metodologia e Técnicas da Computação

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cardoso

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos

UBERLÂNDIA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C128d
2024

Caetano, Roberto Júnio Silva, 1989-

Desenvolvimento e avaliação de um simulador de realidade virtual, baseado em jogos sérios, para treinamento de tiro embarcado aplicado à aeronaves da Polícia Militar do Estado de Minas Gerais [recurso eletrônico] / Roberto Júnio Silva Caetano. - 2024.

Orientador: Alexandre Cardoso.

Coorientador: Daniel CostaRamos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.5538>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Realidade virtual. 3. Tiro (Ciência militar).
I. Cardoso, Alexandre, 1964-, (Orient.). II. Ramos, Daniel Costa, 1984-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária Documentalista – CRB6/1925

ROBERTO JÚNIO SILVA CAETANO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM
SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL, BASEADO EM
JOGOS SÉRIOS, PARA TREINAMENTO DE TIRO
EMBARCADO APLICADO À AERONAVES DA POLÍCIA
MILITAR DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da
Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como
requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.**

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Cardoso

(Orientador – UFU)

Prof. Dr. Mauro Borges França

(Examinador – IFTM)

Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva

(Examinador – IFGoiano)

Uberlândia, 25 de novembro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 799 PPGEELT				
Data:	Vinte e cinco de novembro de dois mil e vinte e quatro	Hora de início:	8h30	Hora de encerramento:	10h00
Matrícula do Discente:	12312EEL002				
Nome do Discente:	Roberto Júnio Silva Caetano				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento e Avaliação de um Simulador de Realidade Virtual, baseado em Jogos Sérios, para treinamento de tiro embarcado aplicado à aeronaves da Polícia Militar do estado de Minas Gerais.				
Área de concentração:	Processamento da Informação				
Linha de pesquisa:	Metodologia e Técnicas da Computação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Alexandre Cardoso. Título do projeto: Estratégia de concepção de Jogos Sérios baseados em Realidade Virtual e Aumentada para Ensino e Aprendizagem. Agência financiadora: CNPq, CAPES e FAPEMIG. Vigência do projeto: 2023 a atual.				

Reuniu-se no Anfiteatro do bloco 1E, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Professores Doutores: Mauro Borges França (IFTM), Alexandre Carvalho Silva (IFGoiano), e Alexandre Cardoso, orientador do discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Alexandre Cardoso, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE CARVALHO SILVA, Usuário Externo**, em 25/11/2024, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Cardoso, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/11/2024, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauro Borges França, Usuário Externo**, em 09/12/2024, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5899579** e o código CRC **CD2CC718**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela força, direção e sabedoria concedidas ao longo desta jornada. A Ele dedico todas as conquistas, certos de que sem Sua presença este trabalho não teria sido possível.

À minha família, por ser meu alicerce e inspiração constantes. À minha esposa, Richellyne, pelo amor, apoio e paciência, e ao meu filho, Roberto Neto, por me lembrar diariamente da importância de seguir em frente e dar o meu melhor. Vocês são a minha motivação e razão de todo o esforço dedicado a esta conquista.

Ao meu orientador, Alexandre Cardoso, e ao coorientador, Daniel Costa Ramos, agradeço profundamente pela orientação, incentivo e confiança ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Seus ensinamentos foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios deste projeto e aprimorar cada etapa da pesquisa.

Ao meu comandante, pela compreensão e apoio prático, permitindo ajustes de escala e disponibilizando materiais, bem como autorizando a realização desta pesquisa. Agradeço pela confiança e pelo suporte, que foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus irmãos de equipe, os operadores aerotáticos, que me incentivaram e se empenharam ativamente em cada fase da pesquisa. Suas colaborações e dicas foram inestimáveis para a conclusão deste trabalho.

Por fim, ao Grupo de Pesquisas em Realidade Virtual e Aumentada (GRVA), pelo suporte incondicional e por acreditar no valor deste projeto. O apoio de todos foi fundamental para a realização e validação deste estudo.

RESUMO

Esta dissertação aborda o problema das limitações e riscos associados ao treinamento tradicional de tiro embarcado em helicópteros da Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG). Para mitigar esses desafios, foi desenvolvido e avaliado um simulador de realidade virtual baseado em jogos sérios, alinhado ao treinamento anual de tiro do Comando de Aviação do Estado (COMAVE). O simulador visa proporcionar um ambiente virtual imersivo e controlado, que permita o aprimoramento das habilidades dos Operadores Aerotáticos (OATs), como manejo de armas, tiro de precisão e tomada de decisão em cenários críticos. O desenvolvimento seguiu o framework Design Science Research (DSR), envolvendo a criação de modelos detalhados de aeronaves, armamentos e cenários urbanos específicos da PMMG. A avaliação do protótipo foi realizada com os OATs, considerando aspectos de usabilidade, imersão e eficácia no treinamento. Os resultados demonstram que o simulador é uma solução viável e segura, oferecendo uma alternativa promissora ao treinamento convencional. Para trabalhos futuros, sugere-se a inclusão de funcionalidades que ampliem o realismo e a diversidade de cenários, contribuindo para uma preparação ainda mais completa dos OATs.

Palavras-chave: realidade virtual; treinamento de tiro; jogos sérios; helicópteros; polícia militar.

ABSTRACT

This dissertation addresses the challenges and risks associated with traditional training for helicopter-based shooting in the Military Police of Minas Gerais (PMMG). To mitigate these issues, a virtual reality simulator based on serious games was developed and evaluated, aligned with the annual shooting training of the State Aviation Command (COMAVE). The simulator aims to provide an immersive and controlled virtual environment that enables the improvement of Tactical Operators' (OATs) skills, including weapon handling, precision shooting, and decision-making in critical scenarios. The development followed the Design Science Research (DSR) framework, involving the creation of detailed models of aircraft, weapons, and urban scenarios specific to the PMMG. The prototype was evaluated by OATs, focusing on usability, immersion, and training effectiveness. The results demonstrate that the simulator is a viable and safe solution, offering a promising alternative to conventional training. Future work suggests adding functionalities to enhance realism and scenario diversity, further improving OATs' preparation.

Keywords: virtual reality; shooting training; serious games; helicopters; military police.

PUBLICAÇÕES

CAETANO, R. J. S., CARDOSO, A., RAMOS, D. C. **Tecnologias de Interação Humano-Robô em Operações de Resgate Aéreo com Helicópteros: Um paralelo à Luz dos Procedimentos Operacionais Padrão do Comando de Aviação de Estado.** Revista Científic@ Universitas, v. 10, n. 2, p. 154–177, 2023.

CAETANO, R. J. S., CARDOSO, A., RAMOS, D. C. **Virtual Reality as a Training Tool for Onboard Shooting Operations in Helicopters A Comparative Approach.** In: CISTI'2024 - 19ª Conferência Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, 25-28 de junho de 2024, Salamanca, Espanha.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Lacuna Encontrada nos Trabalhos Relacionados	20
Figura 2.1 - pista de tiro MT .40 disparos realizados da caminhonete.....	25
Figura 2.2 – disparos em solo a bordo de uma caminhonete.....	26
Figura 2.3 – 1ª série de disparos a bordo de helicópteros.....	27
Figura 2.4 – 1ª série de disparos a bordo do helicóptero	28
Figura 2.5 – 2ª série de disparos a bordo de helicópteros.....	28
Figura 4.1 - Protocolo DSR	58
Figura 4.2 - Visão real do exterior da aeronave Pégasus 11 da PMMG (esquerda) vs Visão em RV da aeronave Pégasus 11 da PMMG (direita).....	65
Figura 4.3 – Visão real do interior da aeronave Pégasus 11 (esquerda) vs Visão em RV do interior da aeronave Pégasus 11 (direita).	65
Figura 4.4 – imagem real do fuzil imbel 7,62 IA2.	67
Figura 4.5 – imagem RV fuzil imbel 7,62 IA2.....	67
Figura 4.6 – Vista real do carregador lateral (esquerda) e superior (direita).....	68
Figura 4.7 – Vista real do carregador lateral (esquerda) e superior (direita).....	68
Figura 4.8 – Cidade criada no unity com o Fantastic City Generator.	70
Figura 4.9 – Controle do helicóptero pelo teclado.	72
Figura 4.10 – Joystick que simula o cíclico e coletivo de um helicóptero.	72
Figura 4.11 – Joystick que simula pedais do helicóptero.	73
Figura 4.12 – Interação com Joystick Pico 4.....	74
Figura 4.13 – Especificações pico 4.	76
Figura 4.14 – Joystick MaxFighter F-17.	76
Figura 4.15 – Joystick Logitech J-U0005.....	77
Figura 4.16 – Gunstock MK1 para o pico 4.	78
Figura 4.17 - visão do OAT no início da simulação.....	82
Figura 4.18 - visão do OAT aguardando início da subida da aeronave.....	83
Figura 4.19 - visão do OAT durante o carregamento do fuzil.....	83
Figura 4.20 - Visão do alvo pelo OAT	84
Figura 4.21 - visão do OAT durante a realização dos tiros.	84
Figura 4.22 – Ambiente real durante realização dos disparos.....	85
Figura 4.23 - Quantidade de acertos e tempo de treinamento.	85
Figura 4.24 - Controle do simulador pelo teclado.	86

Figura 4.25 - Controle do simulador pelos Joysticks.	86
Figura 5.1 – Fuzil Equipado com Sensores e feedback Tátil.	96
Figura 5.2 – Número de Acertos por OAT.....	100
Figura 5.3 – Tempo em Cada Rodada por OAT.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos Funcionais.....	62
Tabela 2 – Requisitos Não Funcionais	62
Tabela 3 – Respostas das questões sobre Usabilidade.	94
Tabela 4 – Resposta das questões sobre Imersão	97
Tabela 5 – Respostas das Questões Sobre Eficácia do Treinamento	101

LISTA DE ABREVIATURAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AVG	Jogos de Ação em Vídeo
BRAvE	Base Regional de Aviação de Estado
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
COMAVE	Comando de Aviação do Estado
DSR	<i>Design Science Research</i>
EBT	Ensino Baseado em Tarefas
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual
FSTD	<i>Flight Simulation Training Device</i>
GRVA	Grupo de Pesquisas em Realidade Virtual e Aumentada
ISO	Organização Internacional de Normalização
JS	Jogo Sérió
KT	<i>Knot</i>
NADSO	Nível Aceitável de Desempenho da Segurança Operacional
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
OAT	Operador Aerotático
PMMG	Polícia Militar de Minas Gerais
POP	Procedimento Operacional Padrão
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
RA	Realidade Aumentada
RS	Revisão Sistemática
RV	Realidade Virtual

UFU Universidade Federal de Uberlândia

UX Experiência do Usuário

XR Realidade Estendida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÕES.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos.....	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	18
1.4	HIPÓTESE	20
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	REALIDADE VIRTUAL.....	22
2.1.1	Conceitos e Aplicações	22
2.1.2	Vantagens e Desvantagens no Treinamento.....	23
2.2	TREINAMENTO DE TIRO EMBARCADO	24
2.2.1	Método Tradicional de Treinamento.....	25
2.2.2	Desafios e Riscos	30
2.3	SIMULADORES E JOGOS SÉRIOS.....	31
2.3.1	Definição e Características	32
2.4	AValiação DE SIMULADORES DE RV	35
2.4.1	Experiência do Usuário (UX)	37
2.4.2	Métricas de Desempenho	38
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	41
3.1	PLANEJAMENTO DA RS.....	42
3.2	RESUMO DOS ARTIGOS RELEVANTES	44
3.3	PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS	50
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
4	METODOLOGIA	57
4.1	DESIGN DO SIMULADOR.....	60
4.1.1	Requisitos do Sistema.....	61
4.1.2	Modelagem do Ambiente Virtual.....	63

4.1.3	Desenvolvimento de Mecânicas de Jogo	71
4.1.4	Integração de Hardware	75
4.2	ESTUDO DE CASO: SIMULADOR EM OPERAÇÃO	79
4.3	PARTICIPANTES DA PESQUISA	87
4.3.1	CrITÉrios de Inclusão e Exclusão	87
4.3.2	Perfil dos Operadores Aerotáticos	88
4.4	INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	88
4.4.1	Questionário	88
4.4.2	Métricas de Desempenho no Simulador	89
4.4.3	Observação Direta	89
4.5	PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	90
4.5.1	Protocolo de Treinamento	90
4.5.2	Análise Estatística dos Dados	91
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.1	USABILIDADE	93
5.2	IMERSÃO	97
5.3	CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE USABILIDADE E IMERSÃO	99
5.4	EFICÁCIA DO TREINAMENTO	100
5.5	DISCUSSÃO	102
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
6	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	107
	ANEXO A - QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL PARA TREINAMENTO DE TIRO EMBARCADO .	116
	ANEXO B – CÓDIGOS EM PYTHON PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	118
	ANEXO C – DIRETRIZES E CONDUÇÃO DA RS	129

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente da Realidade Virtual (RV) tem revolucionado diversos campos de atuação, aplicando técnicas e métodos inovadores para criar novas possibilidades em treinamento, design, manutenção e educação. A RV, ao substituir completamente o ambiente físico por um mundo virtual tridimensional e interativo, proporciona uma imersão profunda que permite a prática segura e controlada de habilidades em cenários variados e complexos. Essa tecnologia tem sido utilizada em indústrias como aviação, saúde e educação, onde oferece soluções ergonômicas para treinamento, melhora a consciência situacional e reduz a carga de trabalho dos usuários. O impacto da RV é significativo, destacando seu potencial para refinar métodos tradicionais e ampliar os horizontes de aplicação, com benefícios que incluem maior segurança, eficiência e engajamento em ambientes de trabalho modernos e de alto risco (BROWN; HICKS; RINAUDO; BURCH, 2021).

Jogos sérios, integrados à RV, constituem uma prática consolidada, demonstrando sua eficácia em múltiplos campos de aplicação. as pesquisas desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisa em Realidade Virtual e Aumentada (GRVA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), demonstram isso. Por exemplo, o jogo sério "Aprendendo com Tarefas" que utilizou RV para alfabetizar crianças com deficiência intelectual, comprovando o potencial dessa tecnologia para superar barreiras educacionais e criar ambientes inclusivos (VASCONCELOS, 2018). Da mesma forma, o "Hard Game" trouxe benefícios para a educação técnica em manutenção de computadores, ao combinar elementos de RV com mecânicas de jogos (DIAS, 2014). Na área da saúde, aplicações como o "Hospital Escape VR" (MARTIN, 2022) e o "*Harpy Game*" (SOUZA, 2019) mostraram o impacto positivo de jogos sérios baseados em RV, seja na capacitação de profissionais de saúde ou na reabilitação pós-AVC, ao oferecer experiências imersivas e interativas que ampliam o engajamento e a eficácia do aprendizado. Essa convergência entre RV e jogos sérios não apenas potencializa o alcance de objetivos educacionais e terapêuticos, mas também estabelece um padrão de inovação que transforma o aprendizado em diferentes setores.

Os simuladores que utilizam RV têm ganhado destaque como ferramentas essenciais para o treinamento em operações complexas e de alto risco, oferecendo ambientes controlados e seguros para o desenvolvimento de habilidades críticas.

Trabalhos destacam a necessidade de soluções alternativas de treinamento para melhorar as técnicas de voo e manutenção de helicópteros (STRUNIAWSKI, 2022), além dos treinamentos de reposta pelos pilotos em situações de emergências aeronáuticas aprimorando a segurança de voo (SANTOS; PARRACA; FERNANDES; VILLAFAINA *et al.*, 2022). Esses exemplos refletem o impacto crescente da RV em aprimorar treinamentos, garantindo maior eficácia, segurança e economia em setores críticos.

O treinamento de tiro embarcado em operações aéreas representa um desafio no campo da capacitação operacional, exigindo habilidades técnicas avançadas, precisão e tomada de decisão em ambientes dinâmicos e de alto risco. Em cenários de voo, os operadores devem lidar com variáveis como vibrações da aeronave, deslocamento constante e fatores externos, como condições climáticas adversas e movimentação dos alvos. Tradicionalmente, o treinamento é realizado com o uso de munição real e aeronaves, o que acarreta altos custos operacionais, além de riscos significativos à segurança dos participantes. Adicionalmente, as limitações logísticas, custo, riscos envolvidos e o desgaste do equipamento restringem a frequência e a abrangência desses treinamentos, dificultando o desenvolvimento contínuo e a avaliação detalhada das habilidades dos operadores. Nesse contexto, a busca por soluções alternativas, capazes de replicar com as condições de tiro embarcado e mitigar os riscos associados, torna-se uma prioridade.

A RV, integrada a mecânicas de jogos sérios e simuladores, surge como uma solução promissora para otimizar o treinamento de tiro embarcado. Com a capacidade de criar ambientes imersivos, interativos e seguros, a RV permite simular cenários operacionais complexos de forma repetitiva e com alto nível de detalhamento. A combinação com jogos sérios adiciona elementos como desafios progressivos, feedback imediato e engajamento contínuo, proporcionando uma experiência de aprendizado que alia técnica e motivação. Essas tecnologias têm o potencial de não apenas reduzir custos e riscos, mas também ampliar a frequência do treinamento e possibilitar avaliações mais precisas das habilidades dos operadores em contextos simulados. Essa abordagem inovadora oferece uma oportunidade única de preparar os operadores para situações reais, melhorando sua performance em missões críticas.

Neste estudo, a proposta foi aplicada ao treinamento de tiro embarcado da Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG), um contexto onde as habilidades de tiro são essenciais para a eficácia e a segurança das operações aéreas. Por meio do desenvolvimento e

avaliação de um simulador de RV baseado em jogos sérios, buscou-se atender às necessidades específicas da corporação, como a simulação de cenários urbanos, o manejo de armamentos e a resposta a situações críticas. O estudo de caso, além de validar a aplicabilidade da tecnologia, demonstrou seu potencial para transformar os métodos de treinamento, oferecendo uma alternativa mais eficiente e segura para o aprimoramento das habilidades de tiro embarcado.

1.1 MOTIVAÇÕES

O treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros é uma habilidade crítica para os OAT da PMMG, demandando proficiência no manejo de armas de fogo em um ambiente dinâmico e desafiador. No entanto, o Relatório Final A-065/CENIPA/2019 (CENIPA, 2019) sobre o acidente ocorrido durante um treinamento de tiro embarcado em 2019 realizado pela PMMG evidencia os riscos inerentes a essa atividade e a necessidade de aprimorar os métodos de treinamento para garantir a segurança e eficácia das operações aéreas. O acidente, classificado como perda de controle em voo, resultou na destruição total da aeronave e em lesões graves para alguns dos tripulantes que estavam a bordo da aeronave. Fatores como a aplicação inadequada dos comandos, a falta de coordenação de cabine e a dificuldade em perceber e responder a situações de guinada inadvertida foram identificados como contribuintes para o acidente. Como resposta, o relatório recomenda que a ANAC e o Batalhão de Radiopatrulhamento Aéreo da PMMG avaliem e controlem os riscos nos treinamentos especializados, como voos táticos a baixa altura e tiro embarcado, para garantir a conformidade com o Nível Aceitável de Desempenho da Segurança Operacional (NADSO), bem como a divulgação dos ensinamentos extraídos do acidente para outras unidades aéreas.

A partir desse contexto, a busca por alternativas de treinamento que minimizem os riscos e maximizem a aprendizagem torna-se crucial. Simuladores de realidade virtual baseados em jogos sérios emergem como uma solução promissora, proporcionando um ambiente seguro e controlado para o desenvolvimento de habilidades essenciais ao tiro embarcado. A pesquisa de Assis (2019) corrobora essa perspectiva, demonstrando a viabilidade e o potencial dos simuladores de tiro virtual para aprimorar as técnicas de tiro e o desempenho dos policiais em situações reais.

O treinamento de tiro embarcado em helicópteros, crucial para a atuação da Polícia Militar em operações aéreas, apresenta desafios significativos. O ambiente dinâmico e de alta pressão da aeronave em movimento exige dos operadores aerotáticos

um domínio preciso das técnicas de tiro, incluindo o controle do recuo da arma e a compensação dos movimentos do helicóptero. No entanto, o treinamento tradicional com munição real impõe limitações consideráveis. O alto custo da munição e da hora de voo do helicóptero, os riscos de segurança inerentes ao disparo em voo e as restrições de tempo e espaço nos campos de tiro dificultam a realização de treinamentos frequentes e abrangentes. Além disso, a complexidade do tiro embarcado exige a simulação de cenários realistas, o que é difícil de alcançar em treinamentos convencionais.

Nesse contexto, a realidade virtual (RV) e os jogos sérios surgem como alternativas promissoras para aprimorar o treinamento de tiro embarcado. A RV permite a criação de ambientes virtuais imersivos e realistas, nos quais os OAT podem treinar em cenários variados e desafiadores, sem os riscos e custos associados ao treinamento com munição real. Os jogos sérios, por sua vez, incorporam elementos de jogos, como narrativa, desafios e recompensas, para aumentar o engajamento e a motivação dos participantes, tornando o aprendizado mais eficaz e prazeroso. A combinação dessas tecnologias oferece um ambiente seguro e controlado para o desenvolvimento de habilidades, a prática de procedimentos e a tomada de decisões em situações críticas, preparando os OAT para um desempenho superior em missões reais.

O presente estudo se propõe a investigar o uso de simuladores de realidade virtual baseados em jogos sérios no treinamento de tiro embarcado em helicópteros da PMMG, buscando desenvolver e avaliar um simulador que atenda às necessidades específicas da corporação e contribua para a formação de operadores aerotáticos mais capacitados e seguros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Esta dissertação tem o objetivo geral de desenvolver e avaliar um simulador de realidade virtual, baseado em jogos sérios, para o treinamento de tiro embarcado realizando um estudo de caso em helicópteros da Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG). O estudo de caso estará alinhado com o treinamento anual de tiro do Comando de Aviação do Estado (COMAVE). O simulador deve proporcionar um ambiente virtual imersivo e interativo para o aprimoramento das habilidades de tiro, incluindo o manejo de armas, tiro de precisão, a tomada de decisão em cenários realistas e a resposta a situações críticas, visando aumentar a segurança e a eficácia das operações aéreas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos temos os seguintes:

- Projetar e desenvolver um simulador de RV imersivo e interativo que reproduza com fidelidade o ambiente operacional de tiro embarcado em helicópteros, incluindo os modelos da aeronave, armamento e equipamentos relevantes para a PMMG;
- Implementar mecânicas de jogo realistas e desafiadoras que simulem as condições de voo, os alvos e os diferentes tipos de missões do treinamento de tiro embarcado, proporcionando uma experiência de treinamento envolvente e eficaz;
- Desenvolver funcionalidades que simulem com precisão e detalhamento as etapas das operações de tiro de fuzil a bordo de helicópteros, incluindo a manipulação de equipamentos, técnicas de tiro e posicionamento no interior da aeronave, bem como a configuração dos ambientes internos do helicóptero modelo AS350, considerando os parâmetros específicos do COMAVE;
- Avaliar a usabilidade do simulador por meio de testes com usuários e investigar a percepção dos OATs sobre a sua aceitação, utilidade e potencial para aprimorar o treinamento, coletando dados sobre a facilidade de uso, a intuitividade da interface e a satisfação geral;
- Iniciar o desenvolvimento de uma aplicação virtual que sirva como referência para futuras diretrizes do COMAVE, visando uma abordagem modular e adaptável às necessidades específicas de treinamento em Realidade Virtual para operações de tiro embarcado.

1.3 JUSTIFICATIVA

A utilização de simuladores de RV baseados em jogos sérios oferece uma alternativa promissora para suprir a lacuna encontrada nos trabalhos correlatos de não existir. Ao proporcionar um ambiente virtual imersivo e interativo, a RV permite o treinamento seguro e controlado de habilidades essenciais, como o manejo de armas, a tomada de decisão e a resposta a situações de emergência, sem os riscos e custos associados ao uso de munição real e horas de voo. Adicionalmente, os jogos sérios podem aumentar o engajamento e a motivação dos OAT, tornando o aprendizado mais eficaz e duradouro.

Além disso, a pesquisa de Assis (2019) demonstrou a viabilidade e o potencial dos simuladores de tiro virtual para aprimorar as técnicas de tiro e o desempenho dos policiais em situações reais. Este estudo busca aprofundar essa investigação, explorando o uso da RV e dos jogos sérios no contexto específico do tiro embarcado em helicópteros, com o objetivo de desenvolver um simulador que atenda às necessidades da PMMG e contribua para a formação de profissionais mais capacitados e seguros.

A implementação de um simulador de RV baseado em jogos sérios pode trazer benefícios significativos para a PMMG, como a redução de custos com munição e o desgaste de aeronaves, a minimização dos riscos de acidentes durante o treinamento, o aumento da frequência e da qualidade do treinamento, a possibilidade de simular cenários complexos e a personalização do aprendizado de acordo com as necessidades individuais de cada OAT.

Durante o desenvolvimento, optou-se por um modelo funcional, que possibilita a avaliação imediata pelos operadores aerotáticos (OATs) da PMMG, permitindo a validação do realismo e da utilidade no treinamento de tiro embarcado. A modelagem detalhada do ambiente virtual, que inclui o interior da aeronave e cenários urbanos externos, juntamente com a simulação precisa do comportamento de voo por meio do *Silantro Helicopter Simulator Toolkit*, garante uma base realista e imersiva para o protótipo.

A integração de dispositivos de hardware, como o Pico 4 para realidade virtual, os *joysticks* especializados e a *Gunstock MK1* para melhorar o *feedback* tátil durante o manuseio do fuzil, contribuiu para aumentar a sensação de imersão. No entanto, foi reconhecido que este é um primeiro passo no desenvolvimento do simulador. O protótipo atual atende aos requisitos iniciais ao replicar de forma fiel o controle da aeronave e o manuseio das armas, mas ainda não inclui funcionalidades como o *feedback* de recuo das armas durante o disparo, devido a limitações de recursos.

Portanto, como demonstra a Figura 1.1, a dissertação busca preencher a lacuna existente na bibliografia atual destes quatro temas abordados em conjunto.

Figura 1.1 - Lacuna Encontrada nos Trabalhos Relacionados



Fonte: Produzido pelo autor.

1.4 HIPÓTESE

A hipótese central desta pesquisa propõe que o uso de simuladores de realidade virtual, baseados em jogos sérios, pode superar diversas limitações do treinamento tradicional de tiro embarcado, incluindo altos custos operacionais, riscos à segurança e dificuldades na reprodução de cenários complexos. Acredita-se que o simulador desenvolvido será capaz de replicar as condições de treinamento em voo, oferecendo uma alternativa segura, imersiva e acessível. Além disso, espera-se que o simulador proporcione uma experiência de usabilidade intuitiva e uma sensação de imersão elevada, fatores que contribuirão para a eficácia do treinamento e para o desenvolvimento das habilidades operacionais dos operadores aerotáticos. Essa hipótese será avaliada por meio de uma análise experimental, utilizando métricas quantitativas e qualitativas, que permitirão validar o potencial do simulador para atender às demandas específicas da Polícia Militar de Minas Gerais e seu alinhamento com os objetivos do treinamento operacional.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1, são apresentadas as motivações para o estudo, destacando a importância do treinamento de tiro embarcado e as lacunas no uso de simuladores de realidade virtual para essa finalidade. O capítulo também inclui os objetivos gerais e específicos, a justificativa da pesquisa, hipótese e uma visão geral da estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, é realizada a fundamentação teórica, abordando o treinamento de tiro embarcado, os desafios e riscos associados a esse tipo de operação, e o potencial da realidade virtual para simulação e treinamento. Este capítulo também explora o uso de simuladores e jogos sérios para treinamento e a avaliação de simuladores de realidade virtual, utilizando normas como a ISO/IEC 25010 e a NBR 9241-11.

O Capítulo 3 descreve a revisão sistemática da literatura realizada para identificar estudos relacionados ao uso de realidade virtual, jogos sérios e treinamento de tiro embarcado. Este capítulo destaca as principais contribuições da literatura para o desenvolvimento de um simulador de tiro embarcado, além das lacunas que justificam a pesquisa.

No Capítulo 4, é detalhada a metodologia adotada para o desenvolvimento do simulador. São abordados o design do simulador, os requisitos do sistema, a modelagem do ambiente virtual, o desenvolvimento das mecânicas de jogo e a integração de hardware. Este capítulo também apresenta os critérios para seleção dos participantes e os instrumentos de coleta e análise de dados.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussão da avaliação do simulador, divididos em usabilidade, imersão, eficácia do treinamento e discussão dos achados. Cada seção inclui uma análise quantitativa e qualitativa, com base nas respostas dos operadores aerotáticos, bem como sugestões de melhorias para o simulador.

Por fim, no Capítulo 6, são feitas as considerações finais da dissertação, discutindo o cumprimento dos objetivos propostos, as contribuições da pesquisa para a área de treinamento policial e militar, e as recomendações para futuros aprimoramentos do simulador.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta o embasamento teórico essencial para a compreensão do problema e da solução proposta nesta dissertação. Serão explorados os conceitos e desafios relacionados ao treinamento de tiro embarcado, a tecnologia da realidade virtual (RV), o potencial dos simuladores e jogos sérios para o treinamento e a avaliação de simuladores de RV.

2.1 REALIDADE VIRTUAL

A Realidade Virtual (RV) é um sistema computacional que cria um ambiente artificial, proporcionando ao usuário a sensação de estar presente e interagir nesse mundo simulado de forma intuitiva e natural. Essa imersão é alcançada através de dispositivos multissensoriais, como óculos de RV, que projetam imagens tridimensionais nos olhos do usuário, e dispositivos de rastreamento, que capturam os movimentos do corpo e da cabeça, permitindo a interação com o ambiente virtual (CARDOSO; JÚNIOR; KIRNER; KELNER, 2007).

Para (TORI, 2006) a realidade virtual é uma interface avançada para aplicações computacionais que possibilita ao usuário navegar e interagir em tempo real em um ambiente tridimensional, utilizando dispositivos multissensoriais para controle ou *feedback*.

A RV se destaca como uma interface homem-máquina poderosa, possibilitando experiências sensoriais únicas, que transcendem as interfaces tradicionais. Em um ambiente virtual, o usuário pode manipular objetos, explorar espaços e realizar ações que simulam a realidade com notável fidelidade. Essa interatividade e imersão diferenciam a RV de técnicas de Computação Gráfica, que geralmente se limitam a reproduzir sequências de animações pré-definidas (CARDOSO; JÚNIOR; KIRNER; KELNER, 2007).

2.1.1 Conceitos e Aplicações

A Realidade Virtual (RV) tem se mostrado uma tecnologia transformadora, com aplicações em áreas como medicina, educação, e treinamento militar e policial. (MATTILA, 2021) destaca que, enquanto videogames nos mantêm como observadores externos, a RV nos coloca dentro da ação, permitindo a interação por meio de movimentos reais. A partir de 2016, com o lançamento de dispositivos como *Oculus Rift* e *HTC Vive*,

a RV se popularizou. Segundo (CARDOSO; JÚNIOR; KIRNER; KELNER, 2007), a RV pode ser classificada como imersiva, isolando o usuário em um ambiente simulado, ou não-imersiva, onde o usuário permanece parcialmente conectado ao mundo real.

A RV é especialmente valiosa para treinamento, proporcionando ambientes realistas, seguros e economicamente viáveis (Burdea e Coiffet, 2003, apud Muñoz et al., 2020; Lehmann et al., 2005, apud Muñoz et al., 2020). No treinamento com armas, ela permite a prática segura, como demonstrado pelo Departamento de Defesa dos EUA (Oliver et al., 2019, apud Muñoz et al., 2020). (KLEYGREWE, 2023) ressalta que a RV é amplamente utilizada no treinamento policial, melhorando habilidades cognitivas e de percepção (MUNOZ; QUINTERO; STEPHENS; POPE, 2020), com transferência de aprendizado para situações reais semelhante ao treinamento tradicional (Harris et al., 2021; Saunders et al., 2019 apud Kleygrewe, 2023).

No campo militar, a RV é usada tanto para treinamento operacional quanto para desenvolvimento de tecnologia (DAHLEN-LERVAG, 2023), com aplicações que incluem familiarização com equipamentos e tratamento de estresse pós-traumático (Dahlen-Lervag, 2023; Velichko, 2022 apud Dahlen-Lervag, 2023). Em resumo, a RV está revolucionando diversos setores ao possibilitar inovação contínua em treinamento, tecnologia e terapia.

2.1.2 Vantagens e Desvantagens no Treinamento

A Realidade Virtual (RV) tem se destacado como uma ferramenta eficaz e acessível para treinamentos na área de segurança, proporcionando uma experiência imersiva que aprimora habilidades cognitivas e motoras. Segundo (ARMAS DE ARMAS, 2020), a RV oferece vantagens como a redução de custos e riscos associados ao uso de munição real, além de promover o engajamento dos treinandos. (KVALNES, 2021) reforça que a imersão é fundamental para a eficácia dos simuladores, destacando que, mesmo com uma possível queda no desempenho devido à complexidade dos controles, a experiência imersiva da RV é preferida.

(KINBERG, 2022) aponta que a percepção de controle e o custo influenciam diretamente a aceitação de simuladores de RV, com os consumidores valorizando a qualidade percebida e a facilidade de uso. Já (JOESSEL, 2022) destaca o impacto positivo de jogos de ação em vídeo (AVG) em habilidades como atenção e cognição espacial, o que reforça o potencial desses jogos para o treinamento policial. No entanto, (MATTILA,

2021) ressalta que a cinetose, causada pela discrepância entre os movimentos visuais e físicos, é um desafio a ser superado para ampliar o uso dessa tecnologia.

Por outro lado, (EGOROV, 2023) enfatiza as vantagens econômicas e a interatividade oferecidas pelos simuladores de RV, que permitem um *feedback* imediato e aprimoram o desenvolvimento de habilidades táticas. Ainda assim, (KLEYGREWE, 2023) alerta sobre a limitação sensorial da RV, apontando que a falta de simulação realista de todos os sentidos pode afetar a qualidade do treinamento. Esses desafios, associados aos custos e à resistência de alguns educadores em adotar novas tecnologias, precisam ser resolvidos para que a RV atinja seu pleno potencial no treinamento policial.

Em resumo, a RV oferece grandes benefícios para o treinamento policial, mas enfrenta desafios como cinetose, limitações sensoriais e barreiras econômicas. Pesquisas contínuas e investimentos em tecnologias imersivas são essenciais para superar esses obstáculos, tornando a RV uma ferramenta ainda mais eficiente na capacitação de agentes de segurança.

2.2 TREINAMENTO DE TIRO EMBARCADO

O treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros é fundamental para garantir a eficácia e segurança das operações aéreas da PMMG, especialmente em missões de alto risco que envolvem o uso de armas de fogo, conforme a descrição do método tradicional de treinamento. No entanto, este tipo de treinamento apresenta desafios e riscos consideráveis, que serão detalhados a seguir. No contexto do COMAVE, o treinamento de OAT, incluindo o tiro embarcado, é atualmente realizado com frequência anual, seguindo as determinações internas da organização e da ANAC. No entanto, o Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 90, em sua Subparte N, que trata especificamente do treinamento para operador aerotático, estabelece que o treinamento periódico deve ser realizado em intervalos não superiores a 36 meses. Essa diferença entre a prática atual e a regulamentação vigente destaca a importância dada ao treinamento de tiro embarcado pela unidade aérea, sempre primando pela segurança e eficácia das operações aéreas.

A implementação de um simulador de realidade virtual para o treinamento de tiro embarcado pode ser uma ferramenta valiosa para auxiliar nesse processo, permitindo um treinamento mais frequente e acessível, sem comprometer a segurança ou os recursos da instituição.

2.2.1 Método Tradicional de Treinamento

O treinamento anual de tiro embarcado no COMAVE, tido como um método tradicional, conforme descrito nos slides teóricos do treinamento (GERAIS, 2023b), é dividido em duas fases distintas que buscam preparar os operadores aerotáticos para os desafios do tiro em movimento. A primeira fase, realizada em solo, simula o deslocamento da aeronave através da fixação de uma cadeira na carroceria de uma caminhonete em movimento. Durante esse exercício, os atiradores utilizam uma submetralhadora FAMA MT .40 para realizar disparos contra alvos, buscando aprimorar sua precisão em um ambiente dinâmico.

Na Figura 2.1 é demonstrado a forma de realização dos disparos na primeira fase.

Figura 2.1 - pista de tiro MT .40 disparos realizados da caminhonete.



Fonte: (GERAIS, 2023b).

Conforme ilustrado na Figura 2.1, a sequência da pista de tiro na carroceria de uma caminhonete é a seguinte:

1. OAT sentado em uma cadeira fixada à carroceria de uma caminhonete:
 - a. OAT pega um carregador municiado com 15 munições e insere em uma submetralhadora MT .40;
 - b. Realiza o carregamento da arma;
 - c. Caminhonete desloca a frente em uma velocidade constante e baixa;
 - d. OAT efetua 5 disparos no primeiro tambor;

- e. OAT efetua 5 disparos no segundo tambor;
- f. Alvo móvel é acionado e vai em direção contrária da caminhonete;
- g. OAT efetua 5 disparos no alvo móvel;

Com um carregador com 15 munições, o OAT deve distribuir seus disparos de forma precisa, efetuando 5 tiros no alvo móvel e 5 em cada tambor fixo, enquanto a caminhonete se desloca a frente, simulando o movimento da aeronave em uma pista dinâmica. A Figura 2.2 foi extraída do treinamento citado realizado na cidade de Uberlândia-MG.

Figura 2.2 – disparos em solo a bordo de uma caminhonete.



Fonte: Produzido pelo autor.

A segunda fase do treinamento ocorre efetivamente a bordo do helicóptero, com o emprego do fuzil 7,62 mm. O processo é gradual, iniciando com disparos em voo pairado, visando a familiarização com o ambiente da aeronave e o controle do armamento. Em seguida, a complexidade aumenta com a introdução de alvos fixos, mas a aeronave em movimento, tanto em deslocamento linear quanto em órbita, desafiando os atiradores a ajustar sua mira e compensar o movimento da aeronave e do alvo. Essa progressão no treinamento busca aprimorar a capacidade dos operadores de engajar alvos em diferentes condições, simulando situações reais de combate e resgate.

Na Figura 2.3 é demonstrado a 1ª série de disparos a bordo do helicóptero.

Figura 2.3 – 1ª série de disparos a bordo de helicópteros.



Fonte: (GERAIS, 2023b).

Conforme ilustrado na Figura 2.3, a sequência da pista de tiro embarcado na 1ª série de disparos é a seguinte:

1. Com o helicóptero na posição pairado:
 - a. OAT pega um carregador municiado com 5 munições e insere no fuzil;
 - b. Efetua o carregamento e inicia os disparos no primeiro tambor até acabar as munições;
 - c. Retira o carregador vazio da arma;
 - d. Pega outro carregador municiado com 10 munições e insere no fuzil;
 - e. Efetua o carregamento e aguarda atingir velocidade de deslocamento.
2. Com o helicóptero em deslocamento a frente em uma velocidade média entre 40 e 60 *Knot* (KT):
 - a. OAT efetua 5 disparos no primeiro tambor;
 - b. OAT efetua 5 disparos no segundo tambor;
 - c. Conclui a 1ª série de disparos.

Essa etapa dinâmica do treinamento visa aprimorar a capacidade do OAT de compensar o movimento da aeronave e manter a mira precisa em alvos fixos durante o

voo. A Figura 2.4 foi extraída do treinamento citado realizado na cidade de Belo-horizonte-MG.

Figura 2.4 – 1ª série de disparos a bordo do helicóptero



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 2.5 é demonstrado a 2ª série de disparos a bordo do helicóptero.

Figura 2.5 – 2ª série de disparos a bordo de helicópteros.



Fonte: (GERAIS, 2023b).

Conforme ilustrado na Figura 2.5, a sequência da pista de tiro embarcado na 2ª série de disparos é a seguinte:

1. Com o helicóptero realizando um voo em órbita ao redor de um único alvo fixo (tambor)

- a. OAT pega um carregador municiado com 5 munições e insere no fuzil;
- b. Carrega a arma e aguarda durante o giro do helicóptero o ângulo de disparos, ao transfixar o alvo, seja contido pelo para balas;
- c. Estando no ângulo correto de disparos, OAT inicia os tiros até acabar as munições do 1º carregador;
- d. Retira o carregador vazio da arma;
- e. Pega outro carregador municiado com 5 munições e insere no fuzil;
- f. Carrega a arma e aguarda durante o giro do helicóptero o ângulo de disparos, ao transfixar o alvo, seja contido pelo para balas;
- g. Estando no ângulo correto de disparos, OAT inicia os tiros até acabar as munições do 2º carregador;
- h. Retira o carregador vazio da arma;
- i. Pega outro carregador municiado com 5 munições e insere no fuzil;
- j. Carrega a arma e aguarda durante o giro do helicóptero o ângulo de disparos, ao transfixar o alvo, seja contido pelo para balas;
- k. Estando no ângulo correto de disparos, OAT inicia os tiros até acabar as munições do 3º carregador;

Essa fase do treinamento exige do OAT não apenas pontaria precisa, mas também a capacidade de adaptar sua mira e postura ao movimento circular da aeronave, simulando um cenário operacional complexo e dinâmico.

É importante ressaltar que o treinamento prático no COMAVE é sempre conduzido sob a supervisão de instrutores de voo e instrutores de tiro devidamente habilitados. Além disso, o treinamento prático é precedido por um treinamento teórico abrangente, que aborda aspectos cruciais como a segurança de voo, o manuseio correto e seguro do armamento, os procedimentos operacionais padrão e as técnicas específicas de tiro embarcado. Essa combinação de teoria e prática, sob a orientação de profissionais experientes, visa garantir que os OATs estejam devidamente preparados para enfrentar os desafios e riscos inerentes às operações de tiro embarcado, atuando com segurança, precisão e eficácia em missões reais.

2.2.2 Desafios e Riscos

O treinamento de tiro embarcado exige que os OAT dominem habilidades complexas em um ambiente dinâmico e desafiador. A aeronave em movimento, as vibrações, o ruído e as condições climáticas adversas podem afetar a precisão e a segurança dos disparos. O treinamento de tiro embarcado em helicópteros, apesar de essencial para a preparação dos operadores aerotáticos, apresenta uma série de desafios e riscos que exigem atenção e medidas de segurança rigorosas. Além dos perigos inerentes à própria aviação, como falhas mecânicas, condições climáticas adversas e erros humanos, o treinamento de tiro embarcado introduz uma camada adicional de complexidade e risco.

É fundamental ressaltar que, mesmo sendo um treinamento, o tiro embarcado envolve o uso de munição real e a realização de disparos em um ambiente dinâmico e desafiador. A vibração da aeronave, o deslocamento em alta velocidade, o ruído intenso e a necessidade de coordenação com a tripulação exigem dos operadores um alto nível de concentração e habilidade.

A história do treinamento de tiro embarcado registra diversas ocorrências que evidenciam os riscos envolvidos. Em alguns casos, os estojos deflagrados durante os disparos atingiram as pás do helicóptero, causando danos à aeronave e comprometendo a segurança da operação. Em outros, os estojos acionaram botões e interruptores na cabine, gerando situações de risco e comprometendo o controle da aeronave.

Um exemplo emblemático dos perigos do treinamento de tiro embarcado é o acidente ocorrido com a aeronave PP-MMG em 2019, durante um exercício da Polícia Militar de Minas Gerais. O helicóptero perdeu o controle em voo após uma guinada inadvertida, resultando em sua queda e destruição total, além de ferimentos graves nos tripulantes. O relatório do CENIPA (2019) sobre o acidente apontou fatores como a aplicação inadequada dos comandos, a falta de coordenação de cabine e a dificuldade em perceber e responder a situações críticas como contribuintes para o ocorrido.

O autor (SAMPAIO, 2008) traz como exemplo o manual do Exército Norte-Americano FM 3-06.1 que destaca os desafios do tiro embarcado em ambientes urbanos, incluindo a redução da efetividade da munição devido aos ângulos de impacto, o tempo limitado para engajamento de alvos, a presença de ângulos mortos, a dificuldade de identificação de alvos e o risco de fogo amigo e fratricídio. O autor enfatiza a importância de considerar esses fatores no planejamento e execução de operações, incluindo a

necessidade de sincronização entre unidades aéreas e terrestres e a manutenção de uma distância segura da área de crise.

Esses exemplos demonstram que o treinamento de tiro embarcado, mesmo quando conduzido com rigor e profissionalismo, não está isento de riscos. A possibilidade de acidentes, mesmo em treinamentos, ressalta a importância de buscar alternativas que permitam o desenvolvimento das habilidades necessárias de forma mais segura e controlada, minimizando os perigos para os operadores, a tripulação e a aeronave. A realidade virtual surge como uma ferramenta promissora nesse sentido, oferecendo um ambiente de treinamento imersivo e realista, sem os riscos inerentes ao uso de munição real.

2.3 SIMULADORES E JOGOS SÉRIOS

A aplicação de simuladores no treinamento militar vem ganhando destaque nos últimos anos, impulsionada pela busca por soluções inovadoras que otimizem o aprendizado e reduzam custos. Essa abordagem, que combina elementos de jogos com objetivos de treinamento, tem se mostrado eficaz em diversas áreas, desde a simulação de combate até o desenvolvimento de habilidades de liderança e tomada de decisão.

O conceito de simuladores e jogos sérios apresenta uma distinção importante no contexto do treinamento e do entretenimento. Segundo Dias (2014, apud Narayanasamy, 2006), enquanto os simuladores de jogos (*Simulator Games*) focam em simular situações com um alto grau de realismo, oferecendo desafios e entretenimento aos jogadores, os jogos sérios (*Serious Games*) têm um objetivo mais amplo. Estes não se limitam ao entretenimento, mas buscam cumprir um propósito educacional ou de treinamento, utilizando elementos lúdicos como ferramentas de engajamento. Ao contrário dos jogos tradicionais, que visam primordialmente o entretenimento, os jogos sérios são projetados para transmitir valores, influenciar pensamentos e, muitas vezes, gerar discussões relevantes para a vida real dos jogadores (Dias, 2014, apud Frasca, 2007). Assim, o impacto desses jogos ultrapassa a experiência imediata do jogo, afetando o comportamento e a tomada de decisões dos usuários em contextos práticos.

No contexto específico do treinamento de tiro embarcado em helicópteros, o uso de simuladores e jogos sérios pode oferecer vantagens significativas em relação aos métodos tradicionais. A imersão proporcionada pela realidade virtual, combinada com os elementos dos jogos sérios, como desafios, recompensas e narrativa, cria um ambiente de

treinamento altamente envolvente e motivador. Esses elementos estimulam o aprendizado ativo e facilitam a retenção do conhecimento. Além disso, os simuladores permitem a reprodução de diferentes cenários e situações, incluindo condições climáticas adversas e alvos em movimento, proporcionando aos operadores aerotáticos a oportunidade de praticar suas habilidades em um ambiente seguro e controlado, sem os riscos e os custos associados ao uso de munição real e horas de voo.

A literatura especializada apoia o uso de simuladores e jogos sérios no treinamento militar. Estudos como o de Johnson et al. (2018) demonstram que o uso de jogos sérios pode melhorar significativamente o desempenho dos soldados em tarefas complexas, como a tomada de decisão sob pressão em cenários de combate. Smith e Ericson (2017) também destacam o potencial desses jogos para o desenvolvimento de habilidades de liderança e comunicação, essenciais para o sucesso em operações militares e policiais. No contexto do simulador de tiro embarcado, a combinação de uma simulação precisa da aeronave com a lógica dos jogos sérios pode oferecer uma experiência de treinamento mais realista e eficaz.

Especificamente para o treinamento de tiro embarcado, os simuladores e jogos sérios contribuem para o aprimoramento de habilidades essenciais, como a precisão no disparo, o controle do recuo da arma, a compensação do movimento da aeronave e a tomada de decisões rápidas em situações de estresse. A repetição de cenários, a análise do desempenho em tempo real e o feedback imediato sobre o progresso permitem que os operadores aerotáticos melhorem continuamente suas habilidades. Além disso, o ambiente virtual possibilita a prática de situações que seriam de difícil ou perigosa simulação em treinamentos tradicionais, como o tiro em alvos em movimento ou em condições extremas.

Em suma, os simuladores e jogos sérios representam uma ferramenta valiosa para o treinamento militar e policial, oferecendo uma abordagem inovadora e eficaz para o desenvolvimento de habilidades cruciais. No contexto do tiro embarcado em helicópteros, a combinação entre a realidade virtual e os jogos sérios tem o potencial de revolucionar o treinamento, proporcionando aos operadores aerotáticos da PMMG um ambiente imersivo, seguro e desafiador, capaz de aprimorar sua preparação para missões reais.

2.3.1 Definição e Características

Simuladores e jogos sérios são ferramentas desenvolvidas para reproduzir de maneira fiel cenários e situações reais, com o objetivo de promover o aprendizado,

treinamento ou a mudança de comportamento. Enquanto os simuladores focam na reprodução precisa de processos e ambientes específicos, como o voo de uma aeronave ou a execução de tarefas complexas, os jogos sérios combinam a interatividade e os elementos de design dos jogos tradicionais com objetivos educacionais ou de treinamento. Ambos se diferenciam dos jogos de entretenimento, cujo propósito central é divertir os jogadores.

A simulação pode ser definida como uma técnica que utiliza um simulador, entendido como um objeto ou representação parcial ou total de uma tarefa a ser replicada. Essa definição enfatiza dois aspectos centrais da simulação: o ensino baseado em tarefas e o uso do simulador propriamente dito. O ensino baseado em tarefas (EBT) é um método no qual o aluno é confrontado com um problema prático e conduzido à busca de subsídios para sua resolução, permitindo uma abordagem ativa no aprendizado. Isso difere do ensino tradicional, em que o aluno é exposto passivamente a conceitos teóricos antes de aplicá-los (FILHO; SCARPELINI, 2007).

Os simuladores são instrumentos essenciais nesse processo, fornecendo um ambiente controlado para o desenvolvimento de habilidades psicomotoras e tomada de decisões rápidas, características comuns em situações de urgência. Eles permitem a repetição exaustiva de tarefas técnicas, possibilitando que os usuários aprimorem suas habilidades em um cenário seguro e sem riscos. Além disso, os simuladores variam em complexidade, desde modelos simples até simulações virtuais avançadas, como as utilizadas em aviação, medicina e treinamento militar, onde a simulação tem demonstrado ser altamente eficaz para reduzir erros e aumentar a competência profissional. A combinação do EBT com simuladores oferece uma forma mais prática e ativa de aprendizado, onde o instrutor atua como facilitador e o aluno assume um papel central no desenvolvimento de suas habilidades. Essa técnica tem sido utilizada em áreas onde o treinamento prático é crítico, como na aviação, contribuindo significativamente para a redução de erros humanos e melhorando a segurança operacional (FILHO; SCARPELINI, 2007).

Os simuladores têm como principal característica a reprodução realista de ambientes e processos, com foco na precisão técnica. Eles são utilizados em áreas como aviação, medicina, treinamento militar e outros setores que exigem a prática de habilidades complexas em um ambiente controlado. No contexto do treinamento de tiro

embarcado, por exemplo, simuladores permitem que operadores pratiquem manobras de voo e o uso de armas sem os riscos e custos associados ao treinamento real.

Jogos sérios, ou *serious games*, são jogos desenvolvidos com o propósito de ensino-aprendizagem ou treinamento, e não exclusivamente para entretenimento. Utilizam tecnologias de simulação de problemas do mundo real, oferecendo soluções eficazes em áreas como saúde, defesa, negócios e turismo. Eles são especialmente úteis em contextos que envolvem riscos à vida, ao patrimônio ou ao meio ambiente, pois permitem o treinamento seguro em ambientes controlados, reduzindo tanto os riscos quanto os custos dos treinamentos práticos tradicionais. No entanto, o desenvolvimento de jogos sérios é um processo complexo, exigindo a integração de conhecimentos de múltiplas áreas, como aprendizagem, simulação e design de jogos, além do domínio do conteúdo específico de aplicação (ROCHA; BITTENCOURT; ISOTANI, 2015).

Os jogos sérios são jogos que, além de entreter, possuem um propósito educativo ou de treinamento. Sua origem remonta à década de 1980, com o desenvolvimento do *Army Battlezone*, que foi projetado pela Atari para treinar militares em situações de combate. Desde então, o conceito se expandiu para uma ampla gama de áreas, incluindo educação, saúde, publicidade, políticas públicas e treinamento profissional (WIKIPÉDIA, 2024). Os jogos sérios oferecem uma maneira interativa de engajar os participantes, permitindo que eles tomem decisões ativamente e aprendam com o *feedback* em tempo real. Isso os diferencia de outros meios educacionais, como filmes e livros, que tendem a ser passivos.

Entre as principais características dos jogos sérios estão a presença de metas claras, regras bem definidas, feedback constante e, em muitos casos, competição. Embora a participação voluntária seja comum, em situações de treinamento obrigatório, como em faculdades de medicina, essa característica pode não se aplicar. A grande vantagem dos jogos sérios é que, ao envolver o jogador de forma ativa e imersiva, eles aumentam a probabilidade de sucesso no aprendizado. Isso ocorre porque são motivadores intrínsecos, oferecendo complexidade e oportunidades contínuas para a aquisição de novas habilidades (WIKIPÉDIA, 2024).

Portanto, ao integrar as características dos simuladores e dos jogos sérios, é possível criar ambientes imersivos e eficazes para o treinamento, como no caso do simulador de tiro embarcado. Ele não apenas reproduz o realismo das operações em voo, mas também utiliza elementos dos jogos sérios para engajar os operadores e proporcionar uma experiência de aprendizado ativa e interativa.

2.4 AVALIAÇÃO DE SIMULADORES DE RV

A avaliação de simuladores de realidade virtual (RV) envolve a análise de fatores qualitativos e quantitativos, sendo um processo essencial para verificar se os objetivos de treinamento estão sendo alcançados e se a interação com o ambiente virtual proporciona uma experiência adequada e eficaz. A ISO/IEC 25010 estabelece um modelo de qualidade de software e sistemas que é utilizado na avaliação de tecnologias como os simuladores de RV. Entre as características de qualidade abordadas estão usabilidade, funcionalidade, confiabilidade, desempenho, eficiência e imersão do usuário (PORTAL, 2024).

O modelo de qualidade de software é fundamental para a avaliação de produtos, pois define as características e subcaracterísticas que serão analisadas para medir a qualidade. Segundo a ISO/IEC 25010, a qualidade de um sistema é determinada pelo grau em que ele atende às necessidades explícitas e implícitas dos *stakeholders*, fornecendo valor e eficácia. Essas necessidades são traduzidas em diversas características, como funcionalidade, desempenho, segurança, manutenibilidade, entre outras. O modelo categoriza essas dimensões em características principais e subcaracterísticas, oferecendo um guia claro para a avaliação e melhoria contínua dos produtos de *software* (PORTAL, 2024). Dessa forma, o modelo atua como um *framework* robusto para garantir que o produto entregue atenda tanto aos requisitos funcionais quanto às expectativas de qualidade dos usuários. O quadro 1 demonstra características de qualidade de *software*.

Quadro 1 – Características de qualidade de software.

QUALIDADE DO PRODUTO DE SOFTWARE	ADEQUAÇÃO FUNCIONAL	COMPLETUDE FUNCIONAL CORREÇÃO FUNCIONAL ADEQUAÇÃO FUNCIONAL
	EFICIÊNCIA DE DESEMPENHO	COMPORTAMENTO DO TEMPO UTILIZAÇÃO DE RECURSOS CAPACIDADE
	COMPATIBILIDADE	COEXISTÊNCIA INTEROPERABILIDADE
	CAPACIDADE DE INTERAÇÃO	ADEQUAÇÃO RECONHECIMENTO APRENDIZAGEM OPERACIONALIDADE PROTEÇÃO CONTRA ERROS DO USUÁRIO ENGAJAMENTO DO USUÁRIO INCLUSIVIDADE ASSISTÊNCIA AO USUÁRIO AUTODESCRIÇÃO
	CONFIABILIDADE	IMPECÁVEL DISPONIBILIDADE TOLERÂNCIA A FALHAS RECUPERABILIDADE
	SEGURANÇA	CONFIDENCIALIDADE INTEGRIDADE NÃO-REPUDIÇÃO RESPONSABILIDADE AUTENTICIDADE RESISTÊNCIA
	MANUTENÇÃO	MODULARIDADE REUTILIZAÇÃO ANALISABILIDADE MODIFICABILIDADE

		TESTABILIDADE
	FLEXIBILIDADE	ADAPTABILIDADE ESCALABILIDADE INSTALABILIDADE SUBSTITUIÇÃO
	SEGURANÇA	RESTRIÇÃO OPERACIONAL IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS À PROVA DE FALHAS AVISO DE PERIGO INTEGRAÇÃO SEGURA

Fonte: adaptado de (PORTAL, 2024).

A NBR 9241-11 estabelece diretrizes fundamentais para a avaliação da usabilidade de sistemas computacionais, focando em como os usuários alcançam seus objetivos e quão satisfeitos eles estão com o produto. Ao avaliar a usabilidade, três aspectos principais são considerados: eficácia, eficiência e satisfação. A norma define usabilidade como o grau em que um produto pode ser usado por usuários específicos para atingir objetivos de maneira eficaz, com eficiência e satisfação dentro de um contexto de uso particular (ABNT, 2002). Esses princípios reforçam a importância de medir a interação entre o usuário e o sistema, considerando não apenas a realização das tarefas, mas também os recursos necessários e a percepção subjetiva da experiência de uso.

Além disso, a ISO 9241-11 enfatiza que a usabilidade é fortemente influenciada pelo contexto de uso, que abrange fatores como o ambiente físico e social, o *hardware*, o *software*, e as tarefas que os usuários precisam realizar. Isso significa que um produto que é altamente usável em um contexto pode não ser em outro. Ao aplicar essas diretrizes, as organizações podem garantir que seus produtos proporcionem uma experiência otimizada para o usuário, levando em consideração as necessidades e limitações específicas do contexto de uso. Assim, o foco não está apenas nos atributos de design do produto, mas na interação do usuário com o sistema como um todo.

Paralelamente, A ISO 20282-1 define os requisitos e recomendações para o design de produtos de uso cotidiano com ênfase na facilidade de operação, sendo este um subconjunto da usabilidade que se concentra na interface com o usuário. Esta norma abrange produtos mecânicos e/ou elétricos que possuem uma interface interativa, como eletrodomésticos e máquinas de uso público (como máquinas de venda de bilhetes). A norma oferece orientações para projetar produtos que sejam fáceis de operar para a maioria dos usuários, levando em consideração características do usuário, como idade e capacidades físicas, e o contexto de uso, como ambiente físico e social. A facilidade de operação é avaliada com base na eficácia de operação, eficiência de operação e satisfação com o uso do produto (ISO, 2006).

O principal objetivo da ISO 20282-1 é garantir que os produtos de uso diário sejam fáceis de operar e que os usuários consigam atingir suas metas principais com alta taxa

de sucesso, em tempos aceitáveis, e com um nível satisfatório de conforto e satisfação. A norma se aplica principalmente a produtos que requerem pouca ou nenhuma experiência prévia por parte do usuário, como cafeteiras e máquinas de bilhetes, e busca aumentar a adoção de práticas de design centrado no usuário em produtos de fácil operação. Ao promover a usabilidade em diferentes contextos e para diferentes perfis de usuários, a ISO 20282-1 contribui para uma experiência de usuário mais inclusiva e eficiente.

A aplicação dessas normas padronizadas assegura que a avaliação dos simuladores seja feita de forma sistemática e que os resultados possam ser utilizados para aprimorar tanto o design dos simuladores quanto o treinamento realizado pelos usuários.

2.4.1 Experiência do Usuário (UX)

O uso da RV no campo da Experiência do Usuário (UX) oferece uma abordagem inovadora para o design de produtos, permitindo uma avaliação mais rica de aspectos como satisfação, usabilidade e percepção emocional. A imersão proporcionada pela RV cria ambientes simulados que facilitam a interação dos usuários com produtos em um cenário controlado, simulando situações do mundo real. Além disso, a RV permite que designers e pesquisadores colem dados de forma remota, garantindo a continuidade de pesquisas e testes mesmo em situações adversas, como a pandemia de COVID-19 (NUCCI PORSANI; CONSTÂNCIO TRINDADE; DEMAISON; MONT'ALVÃO *et al.*, 2023). Dessa forma, a RV se consolida como uma ferramenta crucial para melhorar a experiência de interação dos usuários com produtos e serviços, tornando o processo de desenvolvimento e avaliação mais dinâmico e eficiente.

A experiência do usuário é um dos principais fatores na avaliação de simuladores de RV, sendo fundamental para garantir que o ambiente virtual ofereça imersão, interatividade e realismo suficientes para que o treinamento seja eficaz. De acordo com a ISO 9241-11, a experiência do usuário é avaliada em termos de eficácia, eficiência e satisfação (ABNT, 2002). Esses três elementos são fundamentais para analisar como os operadores interagem com o simulador e como essas interações impactam o aprendizado e a retenção de habilidades.

- **Eficácia** mede a capacidade dos usuários de alcançar os objetivos de treinamento dentro do simulador, avaliando se as tarefas podem ser concluídas com sucesso. Em simuladores de tiro embarcado, por exemplo,

a eficácia pode ser avaliada observando a precisão dos disparos e a execução correta de procedimentos operacionais.

- **Eficiência** refere-se à quantidade de recursos (como tempo e esforço) necessários para completar as tarefas no simulador. A eficiência é importante para garantir que os usuários possam realizar as ações necessárias de forma fluida e rápida, especialmente em cenários de alta pressão, como em operações de resgate ou combate.
- **Satisfação** é uma medida da experiência subjetiva dos usuários, ou seja, o quanto eles se sentiram confortáveis e imersos durante o uso do simulador. A ISO/IEC 25010 também destaca a **imersão** como um critério importante, pois está diretamente ligada ao engajamento e à sensação de presença dos usuários no ambiente virtual. Simuladores de RV de alta qualidade devem ser capazes de manter os usuários imersos no cenário e fornecer feedback imediato e realista sobre suas ações.

A avaliação da experiência do usuário pode ser realizada por meio de questionários, entrevistas, observação direta e análise de dados de uso do simulador. É importante considerar tanto os aspectos quantitativos, como as métricas de desempenho, quanto os aspectos qualitativos, como a percepção dos usuários sobre a usabilidade, a imersão e o realismo do simulador.

2.4.2 Métricas de Desempenho

As métricas de desempenho fornecem dados objetivos sobre como os usuários interagem com o simulador e quão eficazes eles são em cumprir os objetivos do treinamento. A ISO 20282-1 destaca a importância de medir a eficácia em sistemas voltados para treinamento, onde o foco é o desenvolvimento de habilidades específicas (ISO, 2006). No caso dos simuladores de tiro embarcado, as métricas de desempenho relevantes incluem:

- **Precisão:** A precisão dos disparos é uma métrica essencial para avaliar o sucesso no cumprimento dos objetivos de tiro. Essa métrica é particularmente relevante em cenários onde o operador precisa compensar o movimento da aeronave e as condições climáticas simuladas.
- **Tempo de Reação:** Essa métrica avalia a rapidez com que os operadores são capazes de identificar ameaças e tomar decisões. Em um contexto

militar, onde o tempo de resposta pode ser vital, o simulador deve testar a capacidade dos operadores de reagir rapidamente a situações imprevistas.

- **Tomada de Decisão:** A qualidade das decisões tomadas durante a simulação é outra métrica crucial. O simulador deve ser capaz de fornecer cenários complexos onde os operadores precisem avaliar riscos e tomar decisões sob pressão.
- **Colaboração:** Em treinamentos onde a interação entre equipes é essencial, a capacidade de colaboração entre operadores é avaliada. Essa métrica mede a eficiência da comunicação e coordenação entre os membros da equipe durante o treinamento.

Essas métricas fornecem uma base quantitativa para avaliar a eficácia do simulador e a transferência de habilidades para o mundo real, garantindo que o treinamento virtual seja capaz de preparar os operadores para cenários complexos e exigentes. Além disso, o uso de tecnologias de *feedback*, como pontuações e relatórios detalhados, permite aos operadores monitorar seu progresso e identificar áreas que precisam de melhorias.

A combinação da análise das métricas de desempenho com a avaliação da experiência do usuário permite uma compreensão completa da eficácia do simulador de RV e do seu impacto no treinamento dos operadores aerotáticos. Essa avaliação é fundamental para identificar pontos fortes e fracos do simulador, orientar o seu aprimoramento e garantir que ele atenda às necessidades e expectativas dos usuários, contribuindo para um treinamento mais eficaz, seguro e motivador.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo forneceu os alicerces teóricos necessários para o desenvolvimento do simulador de realidade virtual, abordando conceitos fundamentais e aplicações práticas relacionadas a treinamentos complexos, como o tiro embarcado. Ao explorar aspectos técnicos e operacionais, como os desafios do método tradicional de treinamento e as vantagens proporcionadas por simuladores e jogos sérios, foi possível estabelecer uma visão crítica e embasada sobre o uso dessas tecnologias. Assim, esta fundamentação teórica orienta o desenvolvimento e avaliação do simulador, garantindo que suas funcionalidades atendam às necessidades práticas e científicas.

No próximo capítulo, será apresentada a revisão sistemática de literatura, que complementa a fundamentação teórica ao analisar os estudos relevantes e identificar lacunas de pesquisa que justificam a proposta deste trabalho.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A crescente utilização da Realidade Virtual (RV) no treinamento em diversos setores, como militar, policial, médico e industrial, impulsionou o desenvolvimento de simuladores de RV cada vez mais sofisticados e eficazes (GARCIA, 2024). Esta seção se dedicará a explorar o estado da arte dos simuladores de RV para treinamento, por meio de uma revisão sistemática da literatura. Serão identificadas as principais tendências, tecnologias e desafios que moldam este campo em constante evolução, com o objetivo de fornecer um panorama abrangente sobre o papel crucial que os simuladores de RV desempenham na preparação e capacitação de profissionais em diferentes áreas.

Na busca por respostas e soluções em qualquer campo de pesquisa, é essencial contar com métodos confiáveis para analisar e interpretar a vasta quantidade de informações disponíveis. A Revisão Sistemática (RS) surge como uma metodologia robusta que se destaca por sua abordagem criteriosa e transparente na síntese do conhecimento científico.

Para (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017) uma RS consiste em um processo estruturado e planejado para identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências científicas relevantes sobre um determinado tópico de pesquisa. Diferentemente de uma revisão tradicional da literatura, que pode ser mais subjetiva e suscetível a vieses, a RS segue um protocolo predefinido, com critérios claros para a busca, seleção e análise dos estudos, garantindo maior rigor e transparência ao processo.

As raízes da Revisão Sistemática, segundo (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017), remontam à área da Medicina, onde se tornou um pilar da pesquisa baseada em evidências. A necessidade de fundamentar a prática clínica em dados científicos sólidos impulsionou o desenvolvimento dessa metodologia, que se provou eficaz na identificação e avaliação crítica das melhores evidências disponíveis para embasar decisões clínicas. Com o tempo, a RS expandiu-se para outras áreas do conhecimento, incluindo a Engenharia de Software, demonstrando seu valor na construção de um corpo de conhecimento confiável e na identificação de lacunas e oportunidades para pesquisas futuras.

A RS conduzida nesse estudo foi desenvolvida no ANEXO C, sendo os detalhes da fase de diretrizes e condução contidas nele.

3.1 PLANEJAMENTO DA RS

Para fase de planejamento será definido o protocolo a ser seguido, que é, segundo (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017), um roteiro detalhado que guia a condução de uma Revisão Sistemática (RS), desde o planejamento até a apresentação dos resultados. Ele define estratégias e critérios para cada etapa, como busca, seleção e análise de estudos, buscando minimizar vieses e garantir a reprodutibilidade da pesquisa. O protocolo é estruturado em seções que abrangem desde informações gerais sobre a RS até a estratégia de publicação, servindo como um guia transparente e acessível para outros pesquisadores interessados no tema.

O protocolo adotado para esta RS sobre Jogos Sérios em Realidade Virtual para Treinamento de Tiro a Bordo de Helicópteros é definido no Quadro 2.

Quadro 2 – Protocolo sobre Jogos Sérios em Realidade Virtual para Treinamento de Tiro a Bordo de Helicópteros.

Informações Gerais	
Título	Jogos Sérios em Realidade Virtual para Treinamento de Tiro a Bordo de Helicópteros
Pesquisador	Roberto Júnio Silva Caetano
Descrição	Esta Revisão Sistemática tem como foco principal a análise abrangente do uso de jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro a bordo de helicópteros. Ela busca investigar e sintetizar as evidências disponíveis sobre a eficácia e aplicabilidade dessas tecnologias no contexto militar e policial, visando fornecer uma compreensão aprofundada do estado atual do campo e identificar as melhores práticas e desafios para a implementação desse tipo de treinamento.
Objetivos	<ol style="list-style-type: none"> 1- Avaliação Abrangente: Investigar e avaliar de maneira abrangente o uso de jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro a bordo de helicópteros, abordando seus diversos aspectos, como funcionalidades, eficácia, limitações e inovações. Identificar as melhores práticas e os desafios na implementação desse tipo de treinamento. 2- Identificação de Lacunas: Identificar lacunas no conhecimento atual relacionadas à aplicação de jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro em helicópteros. Apontar áreas que necessitam de mais pesquisa e desenvolvimento, visando aprimorar a efetividade e o realismo do treinamento. 3- Contribuição para Tomada de Decisões: Fornecer informações valiosas que possam orientar tomadores de decisão, instrutores e profissionais da área militar e policial no desenvolvimento, implementação e avaliação de programas de treinamento baseados em jogos sérios em realidade virtual para o aprimoramento das habilidades de tiro em helicópteros.
Questão de Pesquisa	
<ol style="list-style-type: none"> 1- Eficácia e Aplicabilidade: Em treinamentos de tiro a bordo de helicópteros, como os jogos sérios em realidade virtual são atualmente empregados e quais resultados são alcançados em comparação com abordagens tradicionais de treinamento? 2- Limitações e Desafios: Ao implementar jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro em helicópteros, quais são as principais limitações ou desafios enfrentados em comparação com outras abordagens de treinamento? 	

- 3- Lacunas no Conhecimento: Quais são as lacunas no conhecimento atual sobre o uso de jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro em helicópteros? Quais áreas específicas necessitam de mais pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a efetividade e o realismo do treinamento?
- 4- Implicações Práticas: Como as descobertas desta revisão sistemática podem ser aplicadas para orientar tomadores de decisão, instrutores e profissionais da área militar e policial no desenvolvimento, implementação e avaliação de programas de treinamento baseados em jogos sérios em realidade virtual para o aprimoramento das habilidades de tiro em helicópteros?

Identificação de estudos	
Palavras-chave	Como palavras chave temos virtual reality, Simulation, Training, Shot, Shooting range, Police, Military, Helicopter, Aircraft, Serious game.
Strings de busca	<p>Como string de busca adotaremos uma específica para cada motor de busca, sendo:</p> <p>((("virtual reality" OR "simulation" OR "training") AND ("police" OR "military" OR "shot" OR "shooting range") AND ("helicopter" OR "aircraft")) para o Capes café</p> <p>("virtual reality") AND ("shooting range") para o Google Scholar</p> <p>("virtual reality") AND ("serious game") para o Repositório institucional da Universidade Federal de Uberlândia</p> <p>("simulador") AND ("tiro") AND ("Realidade virtual") AND ("Realidade aumentada") AND ("Helicóptero") para a biblioteca virtual Capitão Geraldo Walter da Cunha da PMMG</p>
Fontes de busca	A busca será realizada nas diversas bases do periódico capes, dentre elas Springer, MDPI, SageJournals, IEEE, Sage, ScienceDirect, Wiley, Frontiers, IET Journals e Oxford, além do Google Scholar, Repositório institucional da Universidade Federal de Uberlândia e biblioteca virtual Capitão Geraldo Walter da Cunha da PMMG
Estratégia de busca	<p>Devido a especificidade de cada motor de busca, foi utilizado uma estratégia para cada um, sendo:</p> <p>Capes café Revisado por pares, 2019-2024, Artigos;</p> <p>Google Scholar Desde 2020 e disponível para download;</p> <p>Repositório institucional da Universidade Federal de Uberlândia Produzido pela faculdade de Engenharia Elétrica FEELT;</p> <p>Biblioteca virtual Capitão Geraldo Walter da Cunha da PMMG Após 2019</p>
Seleção e avaliação de estudos	
Crítérios de Inclusão e exclusão dos estudos	<ol style="list-style-type: none"> 1- Estar relacionados ao tópico de pesquisa, ou seja, uso de jogos sérios em realidade virtual para treinamento de tiro a bordo de helicópteros, no contexto militar ou policial. 2- Revisados por pares. 3- Criados entre 2019 e 2024. 4- Acessados publicamente ou por meio do capes-café e disponíveis para o download. 5- Abordar diretamente os objetivos e questões de pesquisa definidos. 6- Excluir repetidos
Estratégia para seleção dos estudos	Para a seleção de um estudo ele deve cumprir os critérios de inclusão e exclusão definidos.

Avaliação da qualidade dos estudos	Fala sobre estande de tiro, helicópteros ou avião, simuladores, jogos sérios, realidade virtual ou aumentada.
Síntese dos dados e apresentação dos resultados	
Estratégia de Extração e Sumarização dos dados	Será feita uma tabela para extração e sumarização dos dados coletados dos estudos trazendo a ideia de cada artigo selecionado.
Estratégia de publicação	Após a etapa anterior, para publicação dos resultados, serão respondidas as questões de pesquisa de acordo com os objetivos da RS.

Fonte: Produzido pelo autor adaptado de (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017)

3.2 RESUMO DOS ARTIGOS RELEVANTES

Após a seleção dos estudos de interesse, a próxima etapa envolve a extração dos dados relevantes dos 49 artigos selecionados para a revisão sistemática. Esse processo será conduzido utilizando uma tabela resumo que organiza os tópicos em Referência, XR, Jogos Sérios/Treinamento, Tiro e Helicóptero. Para cada artigo, se o tópico estiver presente, ele será marcado com um "✓" em verde; caso contrário, um "✗" em vermelho será utilizado para indicar sua ausência.

Tabela 3 – Tabela síntese da extração de dados.

Referência	XR	Jogos Sérios/ Treinamento	Tiro	Helicóptero
(VIDAKOVIC; LAZAREVIC; KVRGIC; VASOVIC MAKSIMOVIC <i>et al.</i> , 2021)	✓	✓	✗	✓
(STRUNIAWSKI, 2022)	✓	✓	✗	✓
(NI; ZHANG; ZHAO; CHEN <i>et al.</i> , 2022)	✓	✓	✗	✓
(SANTOS; PARRACA; FERNANDES; VILLAFAINA <i>et al.</i> , 2022)	✓	✓	✗	✓
(BROWN; HICKS; RINAUDO; BURCH, 2021)	✓	✗	✗	✗
(MUNOZ; QUINTERO; STEPHENS; POPE, 2020)	✓	✓	✓	✗
(PRATHIER; SAHOO; ACHARYA; RADHAKRISHNAN <i>et al.</i> , 2022)	✓	✓	✓	✗
(MATTILA, 2021)	✓	✗	✓	✗
(GRECH; SACCO, 2020)	✓	✓	✓	✗
(SUDIARNO; DEWI; WIDYANINGRUM; AKBAR <i>et al.</i> , 2024)	✓	✓	✓	✗
(ALSAEED, 2020)	✓	✓	✗	✗
(FONSECA; HEIM; HOUSER; COOK <i>et al.</i> , 2023)	✓	✓	✗	✗
(MARTONO; NURHAYATIL; WULWIDA, 2023)	✓	✓	✓	✗
(TRINDADE; FERREIRA; PEREIRA, 2023)	✓	✓	✓	✗
(GAO; ZHANG, 2023)	✓	✗	✓	✗
(DAHLEN-LERVAG, 2023)	✓	✓	✓	✗
(KANKAANPÄÄ, 2023)	✓	✓	✓	✗
(SHIN; CHOI; PARK, 2021)	✓	✓	✗	✗
(JOESSEL, 2022)	✓	✗	✓	✗
(BASOGLU; SERBETCIOGLU; CELIK; DEMIRHAN, 2022)	✓	✗	✓	✗
(EGOROV, 2023)	✓	✓	✓	✗
(NISSAN; LEANDER, 2023)	✓	✓	✓	✗
(HIWAT, 2023)	✓	✓	✓	✗
(KLEYGREWE, 2023)	✓	✓	✓	✗

(KVALNES, 2021)	✓	✗	✓	✗
(SHIN; LEE; OH, 2021)	✓	✓	✓	✗
(KINBERG, 2022)	✓	✓	✗	✗
(ARMAS DE ARMAS, 2020)	✓	✓	✓	✗
(MENG; ALBERT, 2022)	✓	✗	✓	✗
(ZOTOV; KRAMKOWSKI, 2022)	✓	✓	✓	✗
(SPANGLER; ALAM; RAHMAN; CRONE <i>et al.</i> , 2021)	✓	✗	✓	✗
(P. GRAY-MASON; J. COULTAS; TECE BAYRAK, 2021)	✓	✗	✓	✗
(GIRARDI; PEREIRA FILHO; TEODORO; DE OLIVEIRA, 2022)	✓	✓	✓	✗
(NITKIEWICZ; ZAREMBA; TYTUŁA, 2023)	✓	✓	✓	✗
(GRABOWSKI; BERESKA; PROBIERZ; GAŁUSZKA, 2024)	✓	✓	✓	✗
(KU; HYUN; LEE, 2022)	✓	✗	✓	✗
(DE ARMAS; TORI; NETTO, 2019)	✓	✓	✓	✗
(KENT, 2020)	✓	✓	✗	✗
(ALOTAIBI, 2023)	✓	✓	✗	✗
(BULANOV; ZAKHAROV; SERGIO; LEBEDEV, 2021)	✓	✓	✗	✗
(DIAS, 2014)	✓	✓	✗	✗
(MARTIN, 2022)	✓	✓	✗	✗
(TEODORO, 2023)	✓	✓	✗	✗
(MARTIN, 2019)	✓	✓	✗	✗
(SILVA, 2012)	✓	✓	✗	✗
(SAMPAIO, 2008)	✗	✓	✓	✓
(FERREIRA, 2024)	✗	✓	✗	✗
(JUNIOR, 2024)	✓	✗	✓	✗
(ASSIS, 2019)	✓	✓	✓	✗

Fonte: produzido pelo autor

Já na fase de síntese de dados da revisão sistemática, foram analisados os 49 artigos relevantes à temática estudada. A análise inicial revelou que, embora existam estudos que abordam separadamente os elementos de XR, jogos sérios, treinamento, tiro e a aplicação em helicópteros, nenhum deles integra todos esses aspectos em um único estudo coeso, passando a sintetizar os dados de cada estudo.

Dentre os artigos revisados, apenas cinco tratam especificamente de helicópteros. Apesar de sua relevância, nenhum desses estudos cumpre totalmente os requisitos necessários para o desenvolvimento e avaliação de um simulador de realidade virtual baseado em jogos sérios para o treinamento de tiro embarcado. (VIDAKOVIC; LAZAREVIC; KVRGIC; VASOVIC MAKSIMOVIC *et al.*, 2021) exploram o uso de dispositivos *Flight Simulation Training Device* (FSTD) na aviação, com ênfase na segurança de voo e na eficiência operacional. Embora essa contribuição seja significativa para a simulação de voo, o estudo não abrange o uso de realidade virtual, jogos sérios, ou o treinamento de tiro embarcado. (STRUNIAWSKI, 2022) discute a necessidade de

soluções alternativas de treinamento para melhorar a técnica de voo por meio de simuladores. Contudo, o estudo não aborda a integração de realidade virtual ou jogos sérios, nem considera o contexto específico do treinamento de tiro embarcado.

Os autores (NI; ZHANG; ZHAO; CHEN et al., 2022) investigam a manobrabilidade dos helicópteros em situações críticas, como pousos e decolagens em locais restritos, além de explorar o uso da realidade virtual para aprimorar habilidades. No entanto, o foco é mais voltado para a operação dos helicópteros, sem incluir o treinamento de tiro embarcado. (SANTOS; PARRACA; FERNANDES; VILLAFAINA et al., 2022) examinam a resposta autônoma e o desempenho operacional durante manobras de emergência em simuladores de voo, destacando a importância desses simuladores para melhorar a resposta em situações críticas. Mesmo assim, o estudo não abrange o treinamento de tiro nem a aplicação de jogos sérios.

Os estudos relacionados ao uso de RV para treinamento de tiro apresentam diversas abordagens e resultados promissores. Como o estudo (GRECH; SACCO, 2020) investiga a eficácia da RV no aprendizado de novos esportes, como o tiro de pistola, demonstrando que essa tecnologia é eficaz para aprimorar habilidades de tiro. O estudo de (SUDIARNO; DEWI; WIDYANINGRUM; AKBAR et al., 2024) compara o desempenho em um estande de tiro real e virtual, evidenciando que o uso de jogos em VR pode melhorar a precisão do tiro. Já o estudo de (MARTONO; NURHAYATIL; WULWIDA, 2023) utiliza um simulador de tiro em Realidade Aumentada (RA) com rifles, analisando a relação entre a distância da arma ao alvo e a quantidade de acertos.

No estudo de (KANKAANPÄÄ, 2023), é realizada uma comparação entre um simulador RV criado para as Forças de Defesa Finlandesas e um simulador real, com ênfase no desenvolvimento de *feedback* para a arma utilizada. O estudo de (EGOROV, 2023) aborda o desenvolvimento de simuladores eletrônicos para rifles, enquanto o estudo de (SHIN; LEE; OH, 2021) se concentra na criação de três simuladores XR na Academia Militar da Coreia, voltados para o treinamento de precisão em tiro, habilidades de combate em pequenas unidades e exercícios militares.

O estudo de (ZOTOV; KRAMKOWSKI, 2022) destaca o uso de VR para tiros em alvos móveis, resultando em melhorias significativas na precisão. Além disso, o Exército Brasileiro, conforme descrito no estudo de (GIRARDI; PEREIRA FILHO; TEODORO; DE OLIVEIRA, 2022), utiliza um simulador denominado TAT VR para treinamento com pistolas. Por fim, o estudo de (NITKIEWICZ; ZAREMBA; TYTUŁA, 2023) compara o treinamento de tiro intermitente e contínuo em RV, e o estudo (GRABOWSKI;

BERESKA; PROBIERZ; GALUSZKA, 2024) avalia as diferenças entre um campo de tiro típico e um campo de tiro em VR, considerando diferentes níveis de complexidade. Esses estudos ilustram como a VR está sendo empregada para aprimorar o treinamento de tiro em diferentes contextos.

Embora alguns autores abordem diretamente o treinamento em RV e tiro, a maioria dos estudos não trata especificamente de tiro embarcado em helicópteros ou de treinamento de tiro específico para essa modalidade. Em vez disso, esses estudos focam na aplicação da realidade estendida (XR) e do treinamento de tiro em áreas como a saúde, desviando a atenção das necessidades e particularidades do treinamento militar ou de segurança pública que envolvem cenários mais complexos e dinâmicos, como o uso de helicópteros.

Por exemplo, (MUNOZ; QUINTERO; STEPHENS; POPE, 2020) concentra sua pesquisa em como as ondas cerebrais oscilatórias frontais e as respostas cardiovasculares de policiais treinados são afetadas durante uma rotina de treinamento em RV. Os autores (PRATIHER; SAHOO; ACHARYA; RADHAKRISHNAN et al., 2022) exploram ambientes de VR para que ofereçam novas possibilidades para estudar o estado cognitivo e afetivo dos participantes, abordando as lacunas e analisando as respostas fisiológicas aos níveis de dificuldade de tiro e desenvolvendo modelos preditivos interpretáveis para o tiro de precisão. enquanto o estudo de (GAO; ZHANG, 2023) destaca os resultados positivos em uma competição de tiro virtual após a prática meditação *mindfulness* antes da competição melhorando o controle atencional dos atletas.

O estudo de (JOESSEL, 2022) investiga a melhora na atenção e na cognição espacial em jogos de ação em vídeo, resultando em um processamento mais rápido. Em aplicações na saúde, o estudo de (BASOGLU; SERBETCIOGLU; CELIK; DEMIRHAN, 2022) utiliza o tiro em RV para melhorar a qualidade de vida de pacientes com hipofunção vestibular periférica, e o estudo de (MENG; ALBERT, 2022) se concentra na reabilitação física de pacientes pós-AVC visando recuperar a habilidade motora e reduzir limitações físicas permanentes, através da interação com armas virtuais.

Além disso, o estudo de (SPANGLER; ALAM; RAHMAN; CRONE et al., 2021) examina a variação cardíaca e o desempenho humano em tarefas estressantes de tiro em VR, e o estudo de (P. GRAY-MASON; J. COULTAS; TECE BAYRAK, 2021) investiga o efeito *Stroop* no contexto de tiro em primeira pessoa. Outros estudos, como o de (KU; HYUN; LEE, 2022), examinam como os sintomas de ansiedade de morte afeta a

ansiedade estatal e consequentemente afeta o desempenho de tiro em simulações de campo de batalha, enquanto o estudo de (KENT, 2020) examina como RV pode incentivar a desescalada em operações policiais. Por fim, o estudo de (BULANOV; ZAKHAROV; SERGIO; LEBEDEV, 2021) foca na reabilitação pós-AVC, onde os participantes apontam o braço na direção do alvo em uma simulação de tiro em RV. Embora esses estudos contribuam significativamente para o avanço da tecnologia RV, eles ainda não abordam o treinamento específico de tiro embarcado a bordo de helicópteros. (FONSECA; HEIM; HOUSER; COOK et al., 2023) pesquisam sobre a ativação neurológica em agentes de aplicação da lei em situações de alto risco oferecendo uma maneira natural de estudar esses processos.

Ao analisarmos os estudos que envolvem treinamentos, sem envolver diretamente tiro, temos que o autor (ALSAEED, 2020) traz em seu estudo o aprimoramento do treinamento militar através da RV e técnicas de aprendizado de máquina, (DAHLEN-LERVAG, 2023) examina como a RV pode ser utilizada no treinamento tático na polícia, considerando a segurança como fator crucial e a RV sendo vista como uma alternativa mais segura para certos tipos de treinamentos, principalmente de alto risco. Já os autores (SHIN; CHOI; PARK, 2021) descrevem em seu estudo uma plataforma XR para treinar soldados em várias táticas de combate, assim como (NISSAN; LEANDER, 2023) que utilizam RA para o treinamento militar, simulando veículos reais, soldados e ambiente de combate. Já o autor (KLEYGREWE, 2023) traz em seu estudo a utilização da RV na prática policial, destacando a importância do treinamento para o policial enfatizando a necessidade de desenvolver habilidades físicas e psicológicas para situações complexas e ambíguas. (ARMAS DE ARMAS, 2020) propõe um sistema de baixo custo, baseado em sensores, para capturar dados durante o treinamento em RV na área militar e de segurança.

Ainda no treinamento sem tiro, temos o autor (ALOTAIBI, 2023) que aborda a RA propondo e avaliando um modelo de aceitação de tecnologia no intuito de utilização na educação e treinamento nas áreas de educação, saúde e militar; (DIAS, 2014) desenvolve um jogo sério (JS) para aprendizagem de manutenção de computadores; (MARTIN, 2022) desenvolve um JS para treinamento de evacuação hospitalar em um cenário de incêndio; (TEODORO, 2023) alinha o *framework* 70-20-10 para realização e treinamento em RV de operadores de subestações de energia elétrica; (MARTIN, 2019) desenvolve um simulador em JS de como apagar um incêndio de pequeno porte com os principais extintores existentes; (SILVA, 2012) desenvolve o “VIRTUAL SUBSTATION” para treinar operadores de subestações elétricas em RV; (FERREIRA,

2024) traz as tecnologias emergentes no uso da força e como elas podem influenciar as ações policiais, especialmente em situações que exigem o uso da força; (JUNIOR, 2024) avalia a viabilidade da utilização da RA nos treinamentos realizados pela PMMG no aprimoramento de competências e (ASSIS, 2019) analisa as vantagens e desvantagens do uso de tecnologias de tiro virtual em comparação ao treinamento com munição real, além de comparar os custos de cada abordagem.

Os autores (BROWN; HICKS; RINAUDO; BURCH, 2021), (TRINDADE; FERREIRA; PEREIRA, 2023), (DE ARMAS; TORI; NETTO, 2019) trazem estudos de caráter secundário, concentrando-se em revisões sistemáticas ou na análise do estado da arte. Embora ofereçam contribuições significativas para o avanço da pesquisa, eles não contemplam experimentos práticos que explorem o uso de simuladores em realidade estendida (XR) aplicados ao contexto específico de helicópteros e treinamento de tiro embarcado. Essa lacuna é particularmente relevante, pois o desenvolvimento e a avaliação de tais simuladores requerem uma abordagem experimental que permita validar sua eficácia em situações realistas de treinamento, algo que esses estudos ainda não fornecem. Assim, apesar de sua importância teórica, há uma necessidade evidente de investigações mais aprofundadas e empíricas para preencher essa falta de experimentação prática abordada nesse capítulo de RS.

Em termos de técnicas de estudos de usabilidade, imersão e qualidade da RV, temos os estudos de (MATTILA, 2021), (KVALNES, 2021) e (KINBERG, 2022) que utilizam jogos que envolvem tiro para condução dos seus estudos nessas áreas. Já o estudo de (HIWAT, 2023) foca no feedback dos participantes e instrutores após uma atividade de treinamento de tiro desenvolvida em RV. Assim, são estudos importantes da área de desenvolvimento em RV, mas não focam no treinamento específico de tiro embarcado.

Por fim, o estudo de (SAMPAIO, 2008) é o único que aborda diretamente o tiro embarcado a bordo de helicópteros na PMMG, fornecendo uma contribuição relevante ao explorar técnicas de tiro, estratégias de deslocamento da aeronave e treinamentos realizados em outras corporações. No entanto, o trabalho se concentra exclusivamente no treinamento de tiro embarcado real, utilizando helicópteros e armamentos convencionais, sem considerar o uso de tecnologias como realidade virtual ou aumentada, que poderiam complementar e modernizar os métodos de treinamento abordados.

Dessa forma, conclui-se que, apesar de alguns estudos abordarem elementos chave, nenhum deles integra de maneira completa os aspectos necessários para o

desenvolvimento de um simulador de realidade virtual baseado em jogos sérios que atenda às necessidades específicas do treinamento de tiro embarcado em helicópteros.

Os estudos avaliados geralmente focam em dois ou três elementos-chave, mas deixam de lado a integração completa que é essencial para o desenvolvimento de um treinamento de tiro embarcado em realidade virtual que seja verdadeiramente abrangente e eficaz. Essa lacuna na literatura ressalta a necessidade de um estudo mais holístico que consiga unir essas tecnologias e práticas em uma abordagem única e integrada, permitindo assim uma experiência de treinamento mais realista e completa.

3.3 PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS

A fase de publicação dos resultados é crucial em uma revisão sistemática, pois é onde as respostas para as questões de pesquisa ganham forma e evidenciam os achados e lacunas identificados ao longo do processo de análise dos estudos. No presente estudo, que aborda a eficácia do uso de realidade virtual (RV) no treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros, a apresentação dos resultados visa não apenas trazer um panorama sobre o estado atual da pesquisa, mas também fornecer direcionamentos práticos para a implementação de tecnologias imersivas no contexto militar e policial. Com o intuito de responder às perguntas formuladas inicialmente, a publicação dos resultados estrutura-se em torno de tópicos como eficácia e aplicabilidade, limitações e desafios, lacunas no conhecimento, e implicações práticas para o futuro da área.

É importante destacar que a condução dessa revisão sistemática buscou mapear estudos que pudessem validar a utilização de jogos sérios em RV, especificamente para operações que envolvem tiro embarcado. Ao longo dessa fase, ficou evidente que, embora existam estudos robustos sobre o uso de tecnologias de RV no treinamento militar e policial, poucos exploram de forma detalhada a complexidade de operações a bordo de helicópteros. Isso enfatiza a relevância deste estudo como pioneiro na análise e síntese de dados acerca de um nicho pouco explorado, o que tem implicações diretas para o futuro da formação e capacitação de operadores aerotáticos.

Com a apresentação das respostas para as questões de pesquisa, espera-se que este estudo sirva de base não só para pesquisadores que busquem entender mais profundamente a aplicabilidade da RV no contexto militar, mas também para instrutores e tomadores de decisão que pretendem implementar essas soluções tecnológicas em suas unidades. A resposta às perguntas aqui delineadas pode oferecer um panorama completo

sobre os benefícios, desafios e áreas a serem melhoradas na adoção de jogos sérios para o treinamento de tiro em ambientes virtuais a bordo de helicópteros.

1- Eficácia e Aplicabilidade: Em treinamentos de tiro a bordo de helicópteros, como os jogos sérios em realidade virtual são atualmente empregados e quais resultados são alcançados em comparação com abordagens tradicionais de treinamento?

A realidade virtual tem se mostrado uma ferramenta eficaz em diversos contextos de treinamento, e no âmbito do tiro embarcado a bordo de helicópteros, suas possibilidades são promissoras. A revisão sistemática mostrou que, apesar de não haver estudos específicos sobre o uso de RV em tiro embarcado, as pesquisas existentes sobre treinamento de tiro utilizando RV destacam resultados positivos. Estudos sobre o uso de RV no treinamento com pistolas e fuzis, por exemplo, demonstraram melhorias significativas na precisão e na memória muscular dos usuários. Esses resultados indicam que a RV pode não apenas replicar, mas também aprimorar o treinamento de tiro, simulando cenários realistas que desafiam os reflexos e a tomada de decisão em situações de pressão.

Outro ponto relevante identificado nos estudos revisados é a capacidade da RV de oferecer um ambiente de treinamento controlado e seguro, com a possibilidade de repetir manobras e ações quantas vezes forem necessárias sem os custos e riscos associados a treinamentos com munição real. Isso não apenas reduz significativamente os custos com materiais, como também permite que os treinandos alcancem maior precisão e familiaridade com as armas e situações simuladas. A aplicabilidade da RV, portanto, vai além do treinamento inicial, podendo ser utilizada para manutenção e aperfeiçoamento constante das habilidades dos operadores.

Em comparação com abordagens tradicionais de treinamento, a RV oferece ainda a possibilidade de treinar em diferentes cenários climáticos, topográficos e de combate, o que seria mais difícil de simular em ambientes físicos. Embora o treinamento tradicional de tiro embarcado exija uma infraestrutura robusta e complexa, a RV torna mais acessível a realização de treinamentos frequentes. Isso poderia ser particularmente valioso em regiões ou momentos em que o treinamento prático é limitado por questões logísticas ou orçamentárias. No entanto, para se obter um quadro completo da eficácia da RV no tiro embarcado, mais estudos que se concentrem especificamente nesse tipo de operação são necessários.

2- Limitações e Desafios: Ao implementar jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro em helicópteros, quais são as principais limitações ou desafios enfrentados em comparação com outras abordagens de treinamento?

Os resultados da revisão indicam que, apesar das vantagens proporcionadas pela RV, existem desafios e limitações que precisam ser superados para que o treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros atinja seu potencial máximo. Uma das principais limitações observadas é o custo inicial de implementação, que envolve não só a aquisição de equipamentos, mas também a necessidade de manter uma equipe capacitada para operar e atualizar os sistemas. Esse desafio é especialmente significativo em instituições com orçamentos restritos, como algumas unidades de segurança pública, onde os recursos são frequentemente canalizados para atividades essenciais.

Outro desafio destacado nos estudos analisados é a ausência de feedback tátil em certas simulações de armas de fogo. Embora a RV seja eficaz em simular o ambiente e as manobras, a falta de um recuo realista das armas pode afetar a imersão e a eficácia do treinamento em situações que exigem reações automáticas e instintivas ao disparo. Alguns sistemas de RV ainda não conseguem replicar com precisão o impacto do tiro ou a ciclagem do armamento, limitando o realismo do treinamento. Essa limitação é uma área crucial para o desenvolvimento futuro, com o objetivo de melhorar o feedback físico oferecido pelas plataformas de simulação.

Ademais, questões relacionadas ao *ciberenjoo* e à adaptação ao ambiente virtual foram relatadas em alguns estudos, especialmente entre usuários que não estão familiarizados com a tecnologia. Embora essas barreiras possam ser superadas com treinamento adequado e a familiarização gradual com a RV, elas podem representar um obstáculo inicial à implementação de programas de treinamento baseados em jogos sérios. Também foi identificada uma resistência de alguns profissionais, que preferem métodos de treinamento mais tradicionais e podem demorar a adotar novas tecnologias. Isso reforça a importância de campanhas de conscientização e formação contínua sobre os benefícios da RV.

3- Lacunas no Conhecimento: Quais são as lacunas no conhecimento atual sobre o uso de jogos sérios em realidade virtual para o treinamento de tiro em helicópteros? Quais áreas específicas necessitam de mais pesquisa e desenvolvimento para aprimorar a efetividade e o realismo do treinamento?

A revisão sistemática revelou uma lacuna significativa no conhecimento existente sobre o uso de RV especificamente para o treinamento de tiro embarcado a bordo de

helicópteros. Apesar da vasta literatura sobre RV e seu uso em treinamentos militares e policiais, não foram encontrados estudos que abordem diretamente o tiro embarcado nesse contexto. Essa lacuna evidencia a necessidade de desenvolver pesquisas que explorem a viabilidade, a eficácia e o realismo dessa abordagem para situações de tiro em movimento e em ambiente aéreo, o que apresenta desafios únicos em termos de manobrabilidade e precisão.

É possível que essa ausência de estudos se deva à complexidade das operações aéreas, que exigem não apenas a simulação de cenários tridimensionais, mas também a replicação de condições reais de voo, como vibração, movimento constante e o efeito do vento. Para que o treinamento em RV possa efetivamente replicar a realidade de um tiro embarcado, será necessário um investimento maior no desenvolvimento de hardware e software que simulem essas variáveis com precisão. A criação de um protótipo de simulador de tiro embarcado pode ser um primeiro passo para preencher essa lacuna e gerar novos estudos sobre o tema.

Além disso, áreas como a integração de sistemas de RV com plataformas reais de helicópteros e o estudo dos efeitos psicológicos e fisiológicos de operações de tiro embarcado em ambiente virtual são campos que ainda carecem de investigação. O desenvolvimento de sensores táteis e de movimento para replicar a experiência real de manobras aéreas, por exemplo, poderia aprimorar o realismo da simulação. A pesquisa futura deve se concentrar em explorar essas questões para aumentar a eficácia e a aplicabilidade da RV no treinamento de tiro embarcado.

4- Implicações Práticas: Como as descobertas desta revisão sistemática podem ser aplicadas para orientar tomadores de decisão, instrutores e profissionais da área militar e policial no desenvolvimento, implementação e avaliação de programas de treinamento baseados em jogos sérios em realidade virtual para o aprimoramento das habilidades de tiro em helicópteros?

As descobertas desta revisão sistemática oferecem uma base sólida para guiar o desenvolvimento de programas de treinamento em RV para operações de tiro embarcado a bordo de helicópteros. Para os tomadores de decisão, essas informações indicam a necessidade de investir em tecnologias emergentes que permitam um treinamento mais seguro, econômico e eficaz. A criação de um protótipo de simulador de tiro embarcado pode ser o primeiro passo para testar a eficácia dessa abordagem e para entender como

ela pode complementar ou, eventualmente, substituir partes do treinamento tradicional com munição real.

Além disso, instrutores e responsáveis pelo treinamento devem considerar a possibilidade de integrar a RV gradualmente em suas rotinas, especialmente em contextos onde o treinamento prático pode ser limitado por questões orçamentárias ou logísticas. A implementação da RV pode ajudar a reduzir a quantidade de munição real utilizada, o desgaste de equipamentos e os riscos associados a operações reais. No entanto, é essencial que a introdução da tecnologia seja acompanhada de treinamento adequado, tanto para os instrutores quanto para os operadores, a fim de garantir que a transição seja suave e que os benefícios sejam plenamente alcançados.

Finalmente, a adoção de simuladores de tiro em RV pode representar uma mudança significativa na forma como as habilidades de tiro embarcado são desenvolvidas e avaliadas. A RV permite que os profissionais enfrentem uma variedade maior de cenários, incluindo situações extremas que seriam difíceis de replicar em um ambiente de treinamento tradicional. Com base nas descobertas desta revisão, recomenda-se que as instituições de segurança pública e militar acompanhem de perto os avanços tecnológicos nessa área, de modo a garantir que seus programas de treinamento estejam sempre alinhados com as melhores práticas e inovações disponíveis no mercado.

Para avaliar os resultados relatados na RS, é crucial reconhecer as contribuições que os estudos selecionados trouxeram para a área de treinamento em RV. Embora nenhum estudo específico aborde diretamente o treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros, os artigos que tratam de treinamento de tiro em RV oferecem percepções significativas. Eles destacam benefícios como o aumento da precisão, melhoramento do desempenho cognitivo e motor dos usuários, e a redução de custos em comparação com o treinamento tradicional. Esses pontos fornecem uma base sólida para futuras pesquisas, sugerindo que a RV pode, potencialmente, ser adaptada para o contexto de tiro embarcado com bons resultados, desde que as adaptações necessárias sejam feitas.

Além disso, os estudos revisados revelaram a eficácia da RV em criar ambientes imersivos que simulam cenários realistas, o que é essencial para o treinamento militar e policial. No entanto, uma das principais limitações encontradas foi a falta de feedback físico, como o recuo das armas, o que pode afetar o realismo da experiência de treinamento. Essa limitação, embora presente em muitos dos estudos, pode ser superada com o avanço das tecnologias de RV e a integração de dispositivos hápticos que simulam melhor essas sensações. Dessa forma, ao analisar os resultados, conclui-se que a RV

oferece um potencial considerável para a aplicação em treinamentos de tiro embarcado, desde que esses desafios técnicos sejam abordados.

Outro ponto relevante na avaliação dos resultados é a questão dos desafios de adaptação, tanto por parte dos instrutores quanto dos próprios treinandos. Os estudos demonstram que a transição para o uso de RV pode ser dificultada por barreiras tecnológicas e de familiaridade com os sistemas virtuais. No entanto, os benefícios relatados pelos artigos indicam que, uma vez superadas essas dificuldades iniciais, o uso de RV oferece uma curva de aprendizado eficiente, permitindo que os treinandos realizem mais exercícios em menos tempo e com maior segurança. Dessa forma, a inclusão de programas de treinamento com RV requer não apenas investimentos em tecnologia, mas também em capacitação técnica e suporte constante.

Em conclusão, a RS traz resultados promissores sobre o uso de RV no treinamento de tiro, que podem ser aplicados no desenvolvimento de um protótipo para treinamento de tiro embarcado. A avaliação dos estudos demonstra que, embora existam desafios a serem superados, os benefícios potenciais são claros e amplos. Com isso, as recomendações se voltam para o desenvolvimento contínuo de tecnologias mais imersivas e acessíveis, assim como a implementação de programas de capacitação para maximizar o impacto da RV no treinamento militar e policial. A continuidade dessa pesquisa é essencial para validar os achados e adaptar as metodologias às necessidades operacionais específicas de helicópteros.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo consolidou os resultados obtidos na revisão sistemática de literatura, apresentando uma análise abrangente dos estudos relevantes sobre a aplicação de tecnologias de realidade virtual, jogos sérios e simuladores no treinamento de tiro embarcado. Foi possível identificar que, embora existam contribuições significativas em áreas como saúde, desempenho cognitivo e treinamento militar/policial, nenhuma das obras revisadas aborda de maneira integrada os aspectos de realidade virtual, treinamento de tiro e operações aéreas.

Essa lacuna de pesquisa reforça a relevância deste trabalho, destacando a necessidade de um simulador que contemple essas dimensões de forma conjunta. A categorização dos artigos e a publicação dos resultados também forneceram subsídios

sólidos para a estruturação da proposta deste estudo, direcionando o desenvolvimento do simulador com base em fundamentos científicos e evidências empíricas.

No próximo capítulo, serão detalhados os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento do simulador, incluindo aspectos como modelagem, design de mecânicas de jogo, integração de hardware e validação prática, buscando preencher as lacunas identificadas e atender aos objetivos propostos.

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento de um simulador de RV para o treinamento de tiro embarcado a bordo dos helicópteros da PMMG envolve uma abordagem sistemática que integra design, requisitos técnicos, modelagem e desenvolvimento de mecânicas de jogo. A metodologia utilizada visa garantir que o simulador seja realista, funcional e adequado às necessidades dos OAT. A criação desse simulador é um processo iterativo, envolvendo múltiplas fases de design e avaliação, com a participação de especialistas em RV, profissionais de treinamento de tiro e operadores de helicópteros. Essa abordagem colaborativa garante que todos os aspectos técnicos e operacionais sejam atendidos, desde a fidelidade visual até a precisão da interação do usuário com o ambiente virtual.

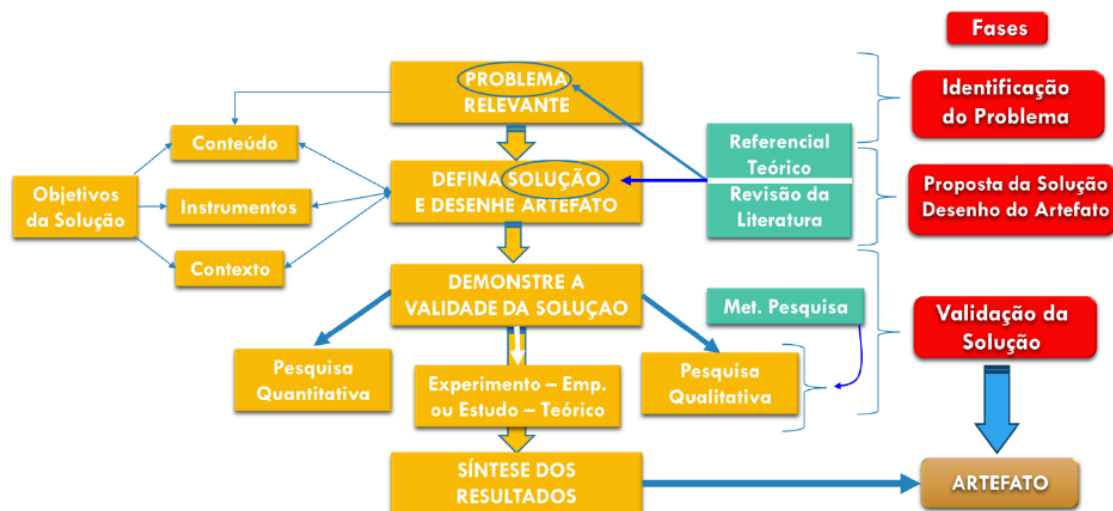
Na presente pesquisa, optou-se pela utilização da metodologia *Design Science Research* (DSR), uma abordagem que visa não apenas descrever problemas, mas também propor soluções práticas através do desenvolvimento de artefatos. A DSR é especialmente adequada para pesquisas que buscam modificar a realidade por meio da criação de produtos, ferramentas ou metodologias (MARIA DOS SANTOS GALVÃO; MADUREIRA; SCHNEIDER, 2024). Neste caso, o objetivo é abordar a problemática do treinamento de tiro embarcado em helicópteros da Polícia Militar de Minas Gerais (PMMG) com o desenvolvimento de um simulador de realidade virtual (RV), que contribua para a qualificação e segurança dos operadores envolvidos nesse processo.

Essa abordagem metodológica possibilita que a pesquisa não apenas investigue os desafios relacionados ao treinamento em contextos de risco, como também apresente uma solução viável que possa ser aplicada no campo (MARIA DOS SANTOS GALVÃO; MADUREIRA; SCHNEIDER, 2024). O uso da DSR se justifica, pois o intuito é criar um artefato, no caso o simulador de RV, que seja capaz de atender às necessidades específicas de treinamento e proporcionar um ambiente seguro para a prática de tiro embarcado. A metodologia permitirá o design, desenvolvimento, avaliação e refinamento contínuo do simulador, seguindo protocolos científicos rigorosos, porém aplicáveis a um problema real e presente no dia a dia das operações aéreas da PMMG.

O protocolo DSR é amplamente utilizado como uma ferramenta de orientação para a construção de dissertações e teses, especialmente em áreas que buscam solucionar problemas práticos, como a engenharia elétrica (RODRIGUES; MEZZAROBÀ; PEIXOTO, 2024). Esse protocolo estrutura a pesquisa em três fases: identificação do problema, proposta da solução e desenho do artefato, e, por fim, validação da solução.

Cada uma dessas fases permite ao pesquisador transitar de uma análise teórica para a implementação prática de um artefato que visa solucionar um problema específico. A figura 4.1 resume o protocolo da DSR visualmente.

Figura 4.1 - Protocolo DSR



Fonte: (RODRIGUES; MEZZARROBA; PEIXOTO, 2024).

A primeira fase, a identificação do problema, é crucial para definir o referencial teórico da pesquisa, que deve abranger os conceitos e processos mais importantes relacionados ao tema. Já na segunda fase, a atenção se desloca do problema para a solução, com o foco na construção de um artefato que viabilize a resolução do problema identificado. Esse artefato pode assumir diversas formas, dependendo da natureza da solução, como um guia, um modelo ou um projeto normativo. Finalmente, a terceira fase envolve a validação da solução, por meio de métodos qualitativos ou quantitativos, com o objetivo de testar sua viabilidade prática (RODRIGUES; MEZZARROBA; PEIXOTO, 2024). Em resumo, o protocolo DSR não apenas orienta o desenvolvimento de soluções inovadoras, mas também assegura que essas soluções sejam efetivamente aplicáveis e sustentáveis no contexto real.

Na primeira fase do DSR realizada anteriormente, o problema foi identificado por meio de uma revisão sistemática detalhada, explicada no Capítulo 3 da dissertação. Essa revisão tinha como objetivo investigar a eficácia do uso de RV no treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros, abordando a integração de tecnologias imersivas no contexto militar e policial. A análise dos 49 artigos selecionados revelou que, apesar de estudos robustos sobre o uso de RV em treinamentos de tiro e operações militares, há uma

lacuna significativa no conhecimento específico sobre o uso de RV para simular o tiro embarcado, destacando a relevância do estudo proposto.

Os resultados da RS evidenciaram não apenas os benefícios potenciais da RV, como melhorias na precisão e redução de custos em treinamentos, mas também os desafios, como a falta de *feedback* físico adequado e a resistência à adoção de novas tecnologias. Essas limitações foram fundamentais para a formulação das questões de pesquisa e orientaram o desenvolvimento de um simulador que busca abordar essas lacunas. Com isso, a primeira fase do DSR cumpriu o papel crucial de delimitar claramente o problema e identificar oportunidades para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras no treinamento de tiro embarcado.

A segunda fase do DSR será abordada neste Capítulo 4 de metodologia, onde será apresentada a proposta da solução e o desenho do artefato desenvolvido. Esta fase envolve a concepção de um simulador de realidade virtual baseado em jogos sérios, projetado especificamente para o treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros. O artefato visa integrar tecnologias imersivas de realidade virtual com mecânicas de simulação de tiro, abordando os desafios únicos desse ambiente operacional, como o movimento aéreo, as condições climáticas variáveis e a necessidade de precisão sob pressão. O design do simulador foi orientado para replicar fielmente as condições reais de voo, buscando superar as lacunas identificadas na revisão sistemática.

Nesse contexto, o desenvolvimento do simulador envolveu a modelagem de um ambiente virtual que reproduz as características essenciais do cenário de tiro embarcado, incluindo o helicóptero, a paisagem tridimensional e as variáveis ambientais. A proposta de solução detalha também a escolha de tecnologias e dispositivos integrados ao sistema, como controladores de movimento, óculos de realidade virtual e mecanismos de *feedback* tátil que visam aumentar o realismo da experiência. As mecânicas de jogo, por sua vez, foram desenvolvidas para simular diferentes tipos de operações de tiro em movimento, permitindo ao usuário praticar a precisão, o tempo de resposta e a tomada de decisão sob condições adversas.

Na terceira fase da DSR, a ser explorada no Capítulo 5 de Resultados e Discussão, a validade da solução será avaliada por meio de uma pesquisa experimental conduzida com operadores aerotáticos. Essa etapa é crucial para testar a eficácia do simulador em um contexto realista, utilizando participantes com experiência prática em operações de helicópteros. O objetivo da pesquisa experimental é verificar se o simulador desenvolvido

pode replicar de forma eficaz as condições de tiro embarcado e se os operadores percebem melhorias em seu desempenho e na aquisição de habilidades operacionais. Serão coletados dados quantitativos e qualitativos para avaliar a precisão, o nível de imersão e a aplicabilidade do simulador como ferramenta de treinamento.

A avaliação experimental não apenas fornecerá *feedback* sobre a qualidade técnica do simulador, mas também ajudará a identificar áreas de melhoria para futuras iterações do artefato. A análise dos resultados será fundamental para validar a hipótese de que o uso de realidade virtual pode superar algumas das limitações do treinamento tradicional, especialmente em termos de custo, segurança e repetição de cenários complexos. Com base nos dados coletados e nas percepções dos operadores, espera-se que essa fase ofereça uma compreensão sobre a viabilidade do simulador para uso em treinamentos regulares, além de contribuir para o avanço das tecnologias de simulação no contexto militar e policial.

4.1 DESIGN DO SIMULADOR

O primeiro passo na criação do simulador foi a definição de seus requisitos técnicos e funcionais, estabelecendo uma plataforma de desenvolvimento adequada e identificando os recursos de *hardware* necessários. Esse processo envolveu a análise das demandas específicas do treinamento de tiro embarcado, com foco na replicação fiel dos cenários operacionais da PMMG. Em seguida, a modelagem do ambiente virtual foi desenvolvida, buscando-se um alto grau de realismo por meio da criação de cenários tridimensionais que simulam tanto os interiores das aeronaves quanto o ambiente externo. Além disso, foram implementadas mecânicas de jogo que proporcionam uma experiência imersiva e realista aos operadores, desde o controle do helicóptero até a execução dos disparos a bordo.

Para garantir a eficiência do treinamento, foi crucial a integração de dispositivos de *hardware*, como óculos de realidade virtual e armas simuladas, permitindo que os operadores interajam de maneira intuitiva e natural com o ambiente virtual. O processo de integração do *hardware* com o *software* foi rigorosamente testado para garantir a precisão e a responsividade dos comandos, elementos essenciais para a eficácia do simulador como uma ferramenta de treinamento. Com o avanço da tecnologia de RV, é possível criar ambientes cada vez mais imersivos, o que contribui significativamente para a preparação dos policiais militares em situações de alto risco.

Essa metodologia oferece uma estrutura robusta para o desenvolvimento do simulador, desde a concepção inicial até os testes de usabilidade, buscando sempre o equilíbrio entre a simulação realista e a acessibilidade tecnológica. A seguir, são apresentados os detalhes de cada etapa do processo de desenvolvimento.

4.1.1 Requisitos do Sistema

Os requisitos técnicos e funcionais do simulador foram definidos com base nas necessidades específicas do treinamento de tiro embarcado da PMMG. A plataforma de desenvolvimento escolhida foi o *Unity*, um motor gráfico utilizado na criação de simuladores devido à sua flexibilidade e suporte a dispositivos de RV. O *Unity* é uma plataforma de desenvolvimento de jogos amplamente utilizada, com uma arquitetura voltada para a criação e manipulação de objetos 3D. O principal componente em *Unity* é o *GameObject*, que serve como um contêiner vazio para outros componentes que realizam tarefas específicas, como animações, físicas e interações. Além disso, *Unity* permite que os desenvolvedores escrevam scripts em C# para personalizar a funcionalidade dos objetos (JURÁNEK, 2021).

Uma das razões pelas quais foi escolhido o *Unity* no projeto é sua comunidade sempre ativa, o que facilita encontrar soluções para problemas ou aprender novas técnicas por meio de tutoriais e fóruns. O suporte da comunidade permite uma curva de aprendizado mais rápida, além de ajudar a resolver problemas que possam surgir durante o desenvolvimento. Outra vantagem do *Unity* é a vasta biblioteca de *assets* prontos que a plataforma oferece. Esses *assets* podem ser reutilizados em diversos projetos, economizando tempo e recursos. Por exemplo, ao invés de criar objetos 3D do zero, é possível encontrar modelos prontos e adaptá-los, o que acelera o processo de desenvolvimento.

Com seu suporte robusto para VR (Realidade Virtual), o *Unity* também se destaca como a escolha ideal para o projeto, que envolve o desenvolvimento de um simulador de treinamento em VR. A combinação de ferramentas de alta qualidade, uma comunidade engajada e um vasto repositório de *assets* prontos tornou o *Unity* uma escolha natural e eficiente para o projeto.

O hardware necessário inclui óculos de RV de alta resolução com *joystick* que acompanham o movimento, computadores de alto desempenho com placas gráficas robustas e coronhas adaptadas para simulação de armas em RV. Além disso, foram

definidas as funcionalidades principais do simulador, como a simulação realista do voo do helicóptero, a física das armas e munições, a interação com o ambiente e o sistema de pontuação. O nível de realismo foi priorizado para garantir que os OAT tivessem uma experiência a mais próxima possível da realidade, com uma reprodução fiel dos movimentos do helicóptero e dos efeitos dos disparos.

4.1.1.1 Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais descrevem as funcionalidades específicas que o simulador deve oferecer para atender às necessidades do treinamento de tiro embarcado. Esses requisitos refletem as interações diretas entre o usuário e o sistema, garantindo que o simulador seja capaz de replicar situações operacionais reais.

Tabela 1 – Requisitos Funcionais

Código	Descrição do Requisito
RF01	Iniciar a simulação de treinamento a partir de um cenário configurado.
RF02	Interagir com o ambiente virtual utilizando o equipamento de RV.
RF03	Executar disparos com o fuzil virtual, simulando recarregamento e ejeção do estojo.
RF04	Fornecer feedback em tempo real sobre precisão e desempenho do treinamento.
RF05	Registrar dados de desempenho das sessões de treinamento para análise futura.
RF06	Gerar relatórios sobre o desempenho do OAT após cada sessão.
RF07	Integrar dispositivos de entrada ao sistema de simulação.

Fonte: Produzido pelo Autor

4.1.1.2 Requisitos Não Funcionais

Os requisitos não funcionais dizem respeito às características de qualidade do sistema, como desempenho, segurança e usabilidade, que garantem sua eficiência e confiabilidade.

Tabela 2 – Requisitos Não Funcionais

Código	Descrição do Requisito
RNF01	Deve garantir compatibilidade com os dispositivos de entrada e saída utilizados, como rastreadores e HMDs.

RNF02	O tempo de carregamento do ambiente virtual não deve exceder 5 segundos.
RNF03	O sistema deve ser executado em hardware padrão de realidade virtual sem necessidade de configuração avançada.
RNF04	Deve ser projetado com uma interface intuitiva e fácil de usar para instrutores e operadores (OAT).
RNF05	O simulador deve permitir expansão futura para suportar novos dispositivos e cenários de treinamento.
RNF06	Apresentar elementos de Jogos Sérios

Fonte: Produzido pelo Autor

4.1.2 Modelagem do Ambiente Virtual

A modelagem do ambiente virtual foi uma das etapas mais críticas no desenvolvimento do simulador, uma vez que a fidelidade dos cenários diretamente impacta a qualidade do treinamento. O objetivo era criar ambientes que refletissem tanto o interior do helicóptero quanto os cenários externos de operação, garantindo que os operadores fossem imersos em uma experiência visual e sensorial o mais próximo possível da realidade. Para isso, foram escolhidos cenários que simulam diversas condições operacionais, como áreas urbanas densamente povoadas e zonas rurais de difícil acesso, ambientes comuns em missões reais. O foco na imersão visual foi obtido através da aplicação de técnicas avançadas de renderização, texturização detalhada e sistemas de iluminação dinâmica que replicam diferentes horários do dia e condições climáticas, como neblina, chuva e tempestades.

O processo de modelagem 3D começou com a criação de um *cockpit* altamente detalhado, com todos os instrumentos e controles replicados de maneira precisa. Cada painel, alavanca e mostrador foram recriados a partir de modelos reais, com base em fotografias e medidas do helicóptero Esquilo, utilizado pela PMMG. Além disso, as armas embarcadas, como fuzis, foram modeladas minuciosamente, visando garantir que os operadores tivessem uma experiência visual e tátil a mais próxima possível do uso de equipamentos reais. As texturas foram aplicadas com base em materiais reais, como metais, vidros e superfícies plásticas, conferindo um nível de realismo elevado às superfícies do helicóptero e outros objetos presentes no simulador.

A iluminação desempenhou um papel fundamental na criação de um ambiente virtual imersivo. Foram aplicados sistemas de iluminação dinâmica que variam conforme

a posição do sol ou as condições meteorológicas, simulando o reflexo do sol nos instrumentos do *cockpit* ou a luz difusa em um dia nublado. O uso de sombras dinâmicas e iluminação global contribuiu para uma experiência visual imersiva e realista, fundamental para treinos de alto desempenho. Essa abordagem ajudou a criar cenários que desafiam os operadores, exigindo atenção aos detalhes visuais durante o treinamento, semelhante às condições de uma missão real.

4.1.2.1 Simulador de Helicóptero

A escolha do *Silantro Helicopter Simulator Toolkit* foi um dos elementos chave para a construção de um simulador de voo realista e dinâmico. Esse *asset* foi selecionado devido à sua capacidade de simular com precisão a física de voo, permitindo que os operadores se familiarizassem com as manobras e condições específicas de operação de um helicóptero em diferentes cenários. O *Silantro* permite a criação de modelos altamente customizáveis de helicópteros (OYEDOYIN, 2024), o que possibilitou a replicação do modelo esquilo, utilizado pela PMMG, com todos os parâmetros de voo ajustados conforme as especificações reais da aeronave. Essa atenção aos detalhes foi fundamental para garantir que o treinamento realizado no simulador fosse diretamente aplicável às operações reais.

Além da precisão na simulação de voo, o *Silantro* oferece uma série de recursos que ampliam a flexibilidade e o nível de realismo do simulador. A ferramenta permite simular condições de voo adversas, como mudanças repentinas de clima, turbulência e falhas mecânicas, desafiando os operadores a reagirem de maneira rápida e eficaz (OYEDOYIN, 2024). Esse nível de customização também inclui a possibilidade de simular diferentes tipos de motores e sistemas de propulsão, permitindo que o simulador seja utilizado para uma gama mais ampla de treinamentos, desde missões táticas de resgate até operações de reconhecimento. Outro fator que influenciou a escolha do *Silantro* foi sua compatibilidade com múltiplos dispositivos de controle, como joysticks, óculos de realidade virtual e sistemas de rastreamento de movimento, criando uma experiência de voo completa e imersiva.

O uso do tutorial detalhado fornecido pelo *Silantro* foi essencial para a integração rápida e eficiente de novos modelos de helicópteros ao simulador. O processo de importação do modelo Esquilo foi realizado de forma estruturada, utilizando dados reais da aeronave e configurando seus parâmetros de voo de acordo com as normas e especificações do manual da aeronave. Isso permitiu uma correspondência quase exata

entre o comportamento da aeronave no simulador e a experiência de voo real. Além disso, o uso de tutoriais práticos facilitou a criação de novos cenários de treinamento, onde o helicóptero pode ser testado em condições extremas ou colaborativas. Além disso, a comunidade de usuários do *toolkit* é bastante ativa, proporcionando suporte e recursos adicionais para a resolução de problemas e o aprimoramento do simulador (OYEDOYIN, 2024).

A escolha desse *asset* também se justifica pela sua capacidade de integrar diferentes sistemas e dispositivos, o que permitirá a criação de um ambiente de treinamento mais imersivo e realista, com a utilização de equipamentos como *joysticks*, óculos de realidade virtual e sistemas de rastreamento de movimento.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram a comparação entre o helicóptero real e o modelo virtual criado no *Silantro Helicopter Simulator Toolkit*. É possível observar a semelhança entre os dois, tanto em termos de aparência quanto de características de voo.

Figura 4.2 - Visão real do exterior da aeronave Pégasus 11 da PMMG (esquerda) vs Visão em RV da aeronave Pégasus 11 da PMMG (direita).



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.3 – Visão real do interior da aeronave Pégasus 11 (esquerda) vs Visão em RV do interior da aeronave Pégasus 11 (direita).



Fonte: Produzido pelo autor.

4.1.2.2 *Auto Hand – VR interaction*

Para garantir que os operadores tivessem uma experiência completa e realista de interação com o ambiente virtual, foi utilizado o *asset Auto Hand – VR Interaction*, uma ferramenta altamente especializada em simulação de interações manuais em VR. Essa ferramenta possibilitou que os usuários interagissem com os objetos no simulador de forma intuitiva, simulando o comportamento físico dos itens, como armas e controles do helicóptero. O *Auto Hand* recria a sensação de peso, resistência e comportamento dos objetos quando manipulados, o que foi crucial para simular o uso de armas durante o treinamento. A personalização das poses de mão para diferentes interações, como segurar um fuzil ou ajustar uma alavanca de controle, aumentou o realismo e a naturalidade dos movimentos (ROBOT, 2024).

Um dos aspectos mais importantes da integração do *Auto Hand* foi a recriação do manuseio do fuzil Imbel IA2, utilizado pela PMMG. O *asset* já incluía um modelo pré-configurado do fuzil, com todas as interações e animações necessárias, o que facilitou o processo de implementação no simulador. No entanto, para garantir o máximo de fidelidade ao equipamento real, foram realizadas adaptações específicas, baseadas no manual de operação e manutenção da carabina 7,62 IA2 (IMBEL, 2019), ajustando as texturas e animações de acordo com as características reais do fuzil. Isso permitiu que o treinamento fosse o mais próximo possível da manipulação real do equipamento, preparando os operadores para o uso eficiente do armamento em missões reais.

Para garantir uma imersão completa e realista na simulação, o *Auto Hand* foi a ferramenta escolhida para gerenciar as interações das mãos com o ambiente virtual. Sua capacidade de simular o peso, a resistência e as diferentes formas de pegar objetos foi fundamental para criar uma experiência de treinamento mais realista e envolvente. A flexibilidade do *Auto Hand* permitiu adaptar as interações às especificidades do simulador, como a criação de poses personalizadas para o manuseio de armas e a configuração de diferentes níveis de resistência para os objetos virtuais. Essa ferramenta também facilitou a integração com o *Silantro Helicopter Simulator Toolkit*, permitindo a criação de um ambiente de treinamento coeso e eficaz. A combinação do *Auto Hand* com o *Silantro* resultou em uma simulação que não apenas reproduz as ações de pilotar um helicóptero, mas também oferece uma experiência de interação com os controles e equipamentos a bordo de forma natural e intuitiva, preparando os usuários para situações reais de maneira mais eficaz.

As Figuras 4.4 e 4.5 comparam o fuzil real e virtual.

Figura 4.4 – imagem real do fuzil imbel 7,62 IA2.



Fonte: (IMBEL, 2019)

Figura 4.5 – imagem RV fuzil imbel 7,62 IA2



Fonte: produzido pelo autor.

As Figuras 4.6 e 4.7 demonstram a vista lateral e superior de um carregador de fuzil do modelo 7,62 utilizado no treinamento, sendo o carregador real e virtual.

Figura 4.6 – Vista real do carregador lateral (esquerda) e superior (direita)



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 4.7 – Vista real do carregador lateral (esquerda) e superior (direita)



Fonte: produzido pelo autor.

No simulador, as interações com o fuzil foram desenvolvidas para replicar com alta fidelidade as operações reais, como o processo de inserção do carregador alimentando

a arma, o acionamento da alavanca de manejo para carregar a arma, e o disparo, que é seguido pela ejeção do estojo pela janela de ejeção. Esses elementos foram cuidadosamente implementados para garantir que a experiência do usuário seja a mais próxima possível da realidade operacional. No entanto, devido a limitações de recursos, o simulador não pôde implementar a sensação de recuo durante o disparo. Embora essa característica seja importante para simulações mais imersivas, a ausência do recuo não compromete o treinamento básico de manuseio e operação do armamento, tendo como suporte a vibração do controle no momento do disparo. Mesmo sem essa função, o simulador oferece uma reprodução detalhada dos mecanismos essenciais da arma, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de habilidades práticas.

Esse nível de detalhamento é fundamental para preparar operadores em situações reais, permitindo que pratiquem o manuseio do fuzil e desenvolvam memória muscular para as ações mais críticas, como recarregar e disparar. As imagens na sequência fazem a comparação das interações reais e virtuais relacionados ao manejo do fuzil.

4.1.2.3 *Fantastic City Generator*

Para a criação de ambientes urbanos realistas e imersivos no projeto, foi adotado o *Fantastic City Generator*, uma ferramenta que facilita a construção de cidades virtuais detalhadas e dinâmicas. A capacidade de geração procedural de cidades é um dos grandes diferenciais dessa ferramenta, permitindo criar localidades com características variadas, como rios, túneis, viadutos e pontes, apenas com alguns cliques (MASTERPIXEL3D, 2024). Esse recurso é crucial para o desenvolvimento de cenários urbanos complexos que simulam áreas reais de operação, como favelas e centros urbanos, proporcionando uma experiência imersiva no treinamento.

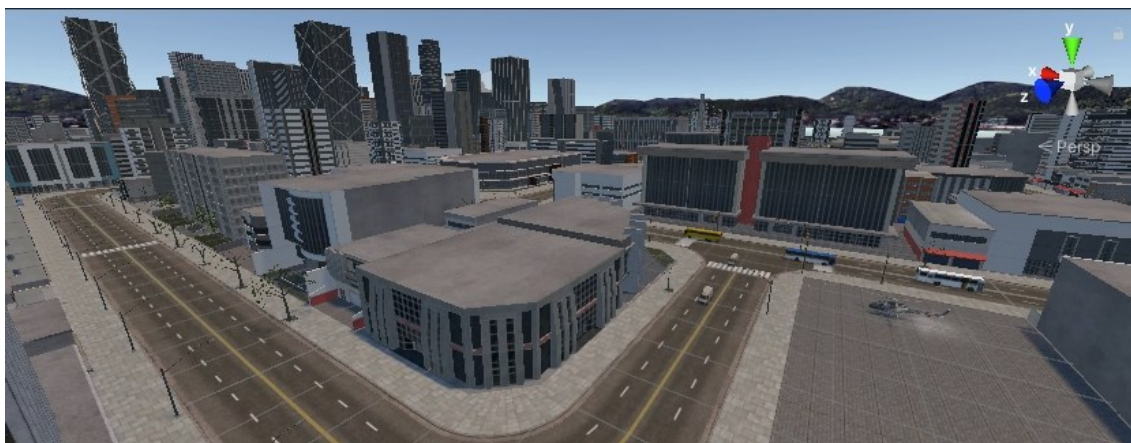
Além da geração procedural, o *Fantastic City Generator* oferece uma vasta biblioteca de mais de 300 modelos de edifícios exclusivos, além de elementos decorativos que enriquecem o ambiente urbano com diversidade visual. Essa flexibilidade permite que as cidades geradas sejam personalizadas para atender às necessidades específicas do treinamento, garantindo uma maior fidelidade ao representar locais típicos de operação policial e militar. A integração de edifícios, veículos e outros objetos personalizados é facilitada por tutoriais em vídeo detalhados, o que permite ao desenvolvedor moldar o cenário de acordo com a visão proposta para o treinamento.

Outro recurso valioso do *Fantastic City Generator* é a alternância entre os modos diurno e noturno, permitindo que os cenários urbanos sejam apresentados sob diferentes

condições de iluminação. Além disso, a simulação de tráfego de veículos aumenta o dinamismo dos ambientes, criando um cenário urbano mais envolvente. A compatibilidade com sistemas de tráfego de terceiros garante que o tráfego possa ser customizado para atender às demandas específicas do projeto, aprimorando ainda mais o realismo da simulação.

A Figura 4.8 demonstra o helicóptero Pegasus no cenário a direita da imagem e a cidade com seus recursos de prédios e tráfego de veículos.

Figura 4.8 – Cidade criada no unity com o Fantastic City Generator.



Fonte: Produzido pelo autor.

4.1.2.4 Considerações Sobre a Modelagem e Integração do Ambiente Virtual

A modelagem do ambiente virtual foi um elemento central no desenvolvimento do simulador, permitindo criar cenários realistas que abrangem tanto os ambientes internos, como o interior detalhado do helicóptero, quanto os externos, simulando áreas urbanas complexas. A integração dessas diferentes partes do ambiente foi essencial para alcançar um nível de imersão elevado, onde o operador pudesse transitar de maneira fluida entre o *cockpit* e os cenários externos durante as simulações. A combinação de técnicas avançadas de modelagem 3D, texturização e iluminação contribuiu significativamente para o realismo do ambiente, enquanto a integração com o *Silantro Helicopter Simulator Toolkit* e o *Auto Hand* garantiu uma interação precisa e intuitiva com os controles e equipamentos.

Essa coesão entre a modelagem detalhada do helicóptero e os cenários externos, juntamente com a interação manual por meio do *Auto Hand*, resultou em um ambiente virtual altamente funcional e imersivo. O uso do *Fantastic City Generator* para criar cidades dinâmicas permitiram que os operadores treinassem em um ambiente que replica fielmente os desafios operacionais, com respostas visuais precisas. Essa integração de

múltiplos elementos garantiu que o simulador oferecesse uma plataforma de treinamento robusta e envolvente, aprimorando a preparação dos usuários para situações reais de operação e combate.

4.1.3 Desenvolvimento de Mecânicas de Jogo

O desenvolvimento das mecânicas de jogo no simulador foi fundamental para garantir que a experiência de treinamento fosse realista e imersiva, simulando os desafios operacionais enfrentados pelos pilotos e atiradores da PMMG. Cada mecânica foi cuidadosamente projetada para replicar aspectos do treinamento real, desde a movimentação do helicóptero até a manipulação de armas e o sistema de pontuação que oferece *feedback* em tempo real para o OAT.

A movimentação do helicóptero foi simulada, levando em consideração as características de voo da aeronave esquilo, utilizada pela PMMG. Isso inclui o comportamento da aeronave em diferentes condições de voo e manobras. Além disso, o controle das armas no simulador foi implementado de forma a replicar a sensação e as operações de uso real, como recarregar o fuzil e disparar contra alvos. O sistema de pontuação foi desenvolvido para fornecer avaliações em tempo real, permitindo que os operadores ajustem suas estratégias e aprimorem suas habilidades durante o treinamento.

4.1.3.1 Controle de Helicóptero

Para o controle do helicóptero, duas modalidades foram implementadas no simulador: uma utilizando teclado e outra através de *joystick*. Isso oferece flexibilidade ao sistema, permitindo a escolha entre uma interface de controle mais simplificada ou um sistema mais preciso e envolvente, como o joystick, que simula os controles reais da aeronave.

Os comandos de voo via teclado incluem a partida e desligamento do motor (teclas F1 e F2), controle de subida e descida do helicóptero por meio do coletivo (teclas 1 e 2), e o movimento cíclico nas direções frontal, traseira e laterais (teclas W, S, A, D). Adicionalmente, as teclas E e Q controlam os pedais da aeronave, responsáveis por girá-la no próprio eixo para a direita e esquerda, respectivamente. A figura 4.9 demonstra o movimento com o teclado na simulação.

Figura 4.9 – Controle do helicóptero pelo teclado.



Fonte: produzido pelo autor

Para o controle via *joystick*, o OAT pode operar o motor do helicóptero com os botões 1 e 2, enquanto alavancas específicas controlam a potência e o cíclico, replicando com maior precisão os movimentos do helicóptero em um ambiente virtual. Os pedais também são operados pelo joystick, garantindo uma experiência mais realista e próxima ao controle físico de uma aeronave real. As figuras 4.10 e 4.11 demonstram o movimento pelo *joystick*.

Figura 4.10 – Joystick que simula o cíclico e coletivo de um helicóptero.



Fonte: produzido pelo autor.

Figura 4.11 – Joystick que simula pedais do helicóptero.



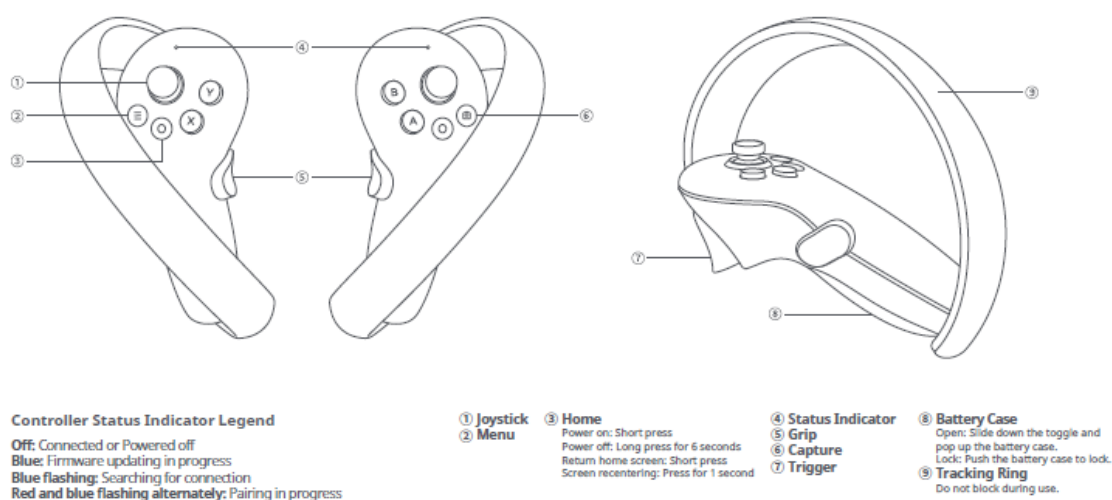
Fonte: produzido pelo autor.

4.1.3.2 Interação no Ambiente

A interação com o ambiente virtual é um aspecto crucial para garantir que o treinamento simule as condições operacionais que o OAT enfrentará em missões reais. Utilizando óculos de realidade virtual e controles de movimento (*joysticks*), o OAT pode interagir com o ambiente de forma imersiva, simulando o uso das mãos para manipular objetos, como armas e carregadores, no cenário virtual.

A interação no simulador é realizada principalmente através do botão "*grip*" nos *joysticks*, que simula o ato de fechar a mão para segurar objetos, como o fuzil e os carregadores. Este botão é essencial para realizar as operações de recarga da arma e outras interações físicas no simulador. Já o botão "*trigger*" é utilizado para efetuar disparos com o fuzil, replicando a ação de puxar o gatilho em um armamento real. A Figura 4.12 foi extraída do manual de usuário dos óculos de RV pico 4 que é o utilizado para os testes.

Figura 4.12 – Interação com Joystick Pico 4.



Fonte: (PICO, 2024b).

Esses controles tornam o treinamento mais realista, permitindo que o OAT desenvolva suas habilidades de manuseio de armas e reação em cenários simulados de alta pressão.

4.1.3.3 Sistema de Pontuação

Para fornecer *feedback* objetivo e em tempo real sobre o desempenho do OAT durante o treinamento, foi implementado um sistema de pontuação simples, mas eficaz. A pontuação é exibida na tela do OAT no formato "0/20", onde o número representa o total de alvos atingidos em relação ao número máximo de disparos permitidos.

O sistema foi projetado para registrar cada tiro bem-sucedido, incrementando a pontuação sempre que o alvo é acertado. O limite de 20 disparos garante que o OAT tenha uma margem para avaliar sua performance durante o exercício. Ao alcançar a pontuação máxima, os alvos desaparecem, sinalizando o encerramento do treinamento. Esse sistema não só oferece um mecanismo de avaliação de desempenho, mas também incentiva a melhoria contínua, permitindo ao OAT ajustar suas táticas e habilidades conforme necessário.

4.1.3.4 Considerações Sobre a Mecânica do Jogo

As mecânicas de jogo implementadas no simulador foram desenvolvidas com o objetivo de proporcionar uma experiência de treinamento altamente realista e envolvente. Desde o controle preciso do helicóptero até a interação fluida com o ambiente virtual, cada aspecto foi pensado para simular as condições de uma missão real da PMMG. A integração dessas mecânicas permite que o OAT vivencie a simulação de forma imersiva,

melhorando suas habilidades de pilotagem, manuseio de armas e tomada de decisões em cenários de alta pressão.

Além disso, o sistema de pontuação fornece um *feedback* imediato e objetivo, permitindo que o OAT acompanhe seu progresso e identifique áreas para melhoria. A combinação de controles simples e intuitivos com uma mecânica de jogo complexa e envolvente assegura que o simulador atenda às necessidades de treinamento, oferecendo uma plataforma eficaz para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de habilidades críticas

4.1.4 Integração de Hardware

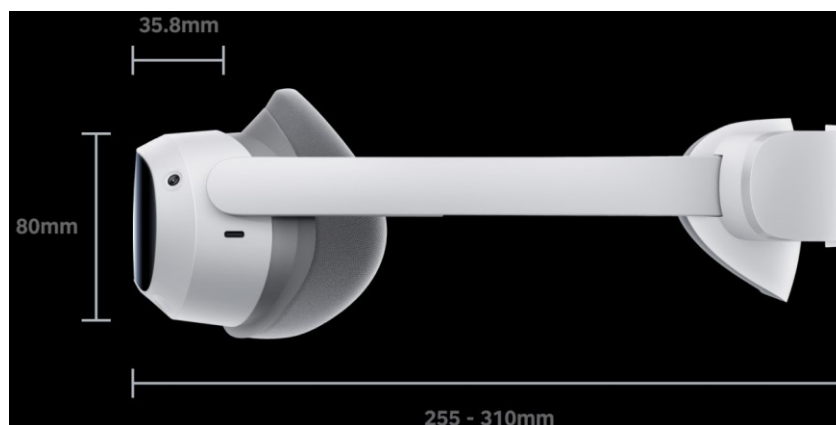
A integração de hardware no simulador foi um componente essencial para garantir uma experiência imersiva e realista para os OATs da PMMG. O processo de integração incluiu a utilização de dispositivos de realidade virtual e periféricos que replicam os controles de uma aeronave e o manuseio de armamentos. Para garantir que o simulador funcionasse de maneira fluida, o *software* foi desenvolvido no *Unity*, sendo necessário um computador ou notebook com placa de vídeo dedicada que tenha capacidade de rodar jogos de realidade virtual. O hardware recomendado inclui placas gráficas de alta performance, como a RTX 1080 ou superiores, além dos dispositivos específicos descritos nas seções a seguir.

4.1.4.1 Headset VR Pico 4

O Pico 4 foi o *headset* de realidade virtual escolhido para o simulador, graças às suas características avançadas e excelente performance em ambientes de VR. Este dispositivo oferece uma resolução de 2160 x 2160 por olho, proporcionando imagens nítidas e detalhadas, o que é crucial para a imersão do OAT durante o treinamento. Com um campo de visão de 105°, o Pico 4 aumenta a sensação de presença no ambiente virtual, tornando a experiência mais realista (PICO, 2024a).

Outro diferencial do Pico 4 é sua leveza, o que garante maior conforto durante longas sessões de uso, permitindo que os operadores se concentrem no treinamento sem distrações causadas por desconforto físico. O dispositivo também possui um rastreamento de seis graus de liberdade (6DoF), o que significa que ele é capaz de captar movimentos naturais do corpo e da cabeça com precisão. Isso é essencial para um treinamento de tiro e pilotagem eficaz, já que os operadores podem realizar movimentos amplos sem restrições. A figura 4.13 foi extraída das especificações no site do pico.

Figura 4.13 – Especificações pico 4.



Fonte: (PICO, 2024a).

4.1.4.2 Joysticks Utilizados

No controle da aeronave, além do teclado, dois *joysticks* principais foram integrados ao simulador, cada um desempenhando uma função fundamental na simulação de voo do helicóptero.

O Genius *MaxFighter* F-17 foi utilizado para simular o controle do coletivo e do cíclico da aeronave. Este *joystick* oferece um design ergonômico e resposta precisa aos comandos, permitindo que os operadores ajustem a altitude e a direção do helicóptero de forma eficiente (HARDSTORE, 2024). Seu layout e os botões programáveis tornam o processo de adaptação ao simulador intuitivo, garantindo que os pilotos possam replicar manobras com precisão, tal como faria em uma aeronave real. A Figura 4.14 foi extraída da página da *Hardstore* que vende o produto.

Figura 4.14 – Joystick MaxFighter F-17.



Fonte: (HARDSTORE, 2024).

Para simular os pedais da aeronave, foi escolhido o Logitech J-U0005. Este dispositivo foi integrado para replicar o controle direcional do helicóptero, permitindo que o piloto manipule o giro do helicóptero no próprio eixo, simulando o uso de pedais reais (LOGITECH, 2024). O Logitech J-U0005 proporciona uma resposta tátil satisfatória e precisa, facilitando a execução de manobras essenciais durante o voo. A Figura 4.15 foi extraída da página da Logitech de venda do produto.

Figura 4.15 – Joystick Logitech J-U0005.



Fonte: (LOGITECH, 2024).

4.1.4.3 Gunstock MK1

Para aprimorar a experiência háptica do simulador de tiro, optamos por integrar a *gunstock* VREvolver MK1 V3, uma ferramenta que se destaca pela sua capacidade de oferecer uma simulação mais imersiva e precisa. Esta *gunstock* foi projetada para ser compatível com a maioria dos jogos de tiro em realidade virtual, permitindo que os usuários sintam a manipulação de uma arma de fogo real de forma mais autêntica. O

design ergonômico da VREvolver MK1 V3 não apenas se assemelha a uma arma de fogo convencional, mas também proporciona conforto durante longos períodos de uso, fundamental em sessões de treinamento (VREVOLVER, 2023).

Entre suas principais características, a *gunstock* conta com encaixes magnéticos ou de proximidade e um apoio de peito ajustável, que garantem uma experiência de tiro mais estável e realista. Sua leveza e facilidade de uso fazem dela uma escolha prática para usuários de diferentes níveis de habilidade, pois a adaptação ao equipamento é rápida e intuitiva. Além disso, a VREvolver MK1 V3 pode ser utilizada em diversos tipos de jogos, incluindo simulações de voo e ação, o que a torna uma ferramenta versátil para além do treinamento militar e policial.

Apesar de sua excelente qualidade e funcionalidades, é importante considerar a desvantagens de não ter o recuo incluso na arma como feedback. Contudo, para aqueles que buscam uma experiência de treinamento mais rica e realista, a VREvolver MK1 V3 se revela uma opção valiosa. Sua integração ao simulador não só melhora a precisão nas interações, mas também intensifica a imersão do usuário, preparando-o de maneira mais eficaz para situações reais. Em suma, a adaptação da *gunstock* à nossa aplicação representa um passo significativo na evolução do treinamento em ambientes virtuais. A Figura 4.16 demonstra como ficou a *gunstock* integrada aos controles do dispositivo.

Figura 4.16 – Gunstock MK1 para o pico 4.



Fonte: (VREVOLVER, 2023).

A *Gunstock* MK1 foi integrada ao simulador com o objetivo de aprimorar a simulação do manuseio de armas. Este dispositivo é utilizado em jogos de tiro em realidade virtual devido à sua ergonomia e semelhança com uma arma de fogo real. A

Gunstock MK1 é leve e possui um encaixe magnético ou de proximidade, garantindo que o OAT possa facilmente alinhar a mira e disparar sem perder a precisão.

Além disso, o ajuste no apoio de peito proporciona maior estabilidade ao segurar o fuzil, melhorando o controle durante os disparos. Essa adição foi fundamental para simular o manuseio realista de armas a bordo de helicópteros, replicando a sensação de peso e a necessidade de estabilidade que um operador enfrentaria em uma situação real de combate.

4.1.4.4 Considerações Sobre a Integração de Hardware

A integração de hardware no simulador foi projetada para replicar as condições reais de operação com o máximo de fidelidade possível. O uso de dispositivos como o *headset* Pico 4, os *joysticks* Genius *MaxFighter* F-17 e Logitech J-U0005, além da *Gunstock* MK1, permitiu que o simulador fornecesse uma experiência de treinamento completa, onde o OAT pode interagir de forma imersiva com o ambiente virtual, controlar o helicóptero e manusear armas simuladas de maneira realista.

Essa integração foi essencial para criar um ambiente de treinamento eficaz, onde as habilidades operacionais dos OATs podem ser desenvolvidas e aprimoradas. A escolha dos dispositivos foi baseada não apenas em sua qualidade técnica, mas também na sua capacidade de proporcionar uma experiência imersiva e fluida, contribuindo para a formação de operadores mais capacitados e preparados para as missões reais.

A integração de *hardware* foi uma etapa fundamental no desenvolvimento do simulador, permitindo que os operadores utilizem dispositivos de RV, como óculos de realidade virtual e *joysticks*, para interagir com o ambiente de treinamento. Além disso, foram utilizadas armas simuladas conectadas ao sistema, permitindo que os operadores realizem disparos e recarregamentos de forma realista. A integração desses dispositivos foi realizada de forma a garantir a máxima precisão nos movimentos e ações, oferecendo uma experiência de treinamento que simula as condições reais enfrentadas em missões de tiro embarcado.

4.2 ESTUDO DE CASO: SIMULADOR EM OPERAÇÃO

O treinamento de tiro embarcado a bordo de helicópteros é um componente crucial das operações aéreas da PMMG, desempenhando um papel fundamental na garantia da eficácia e segurança das missões de proteção e resgate em todo o território mineiro. No

âmbito do Comando de Aviação de Estado (COMAVE), responsável pelo planejamento e emprego dessas aeronaves, o treinamento e o aprimoramento contínuo dos policiais envolvidos nessas atividades são prioridades inquestionáveis. Nesse contexto, o uso do fuzil calibre 7,62 mm a bordo desses helicópteros exige um treinamento especializado e minucioso, visando não apenas aprimorar as habilidades dos OAT, mas também garantir a segurança das operações e o cumprimento das normas, conforme estabelecido pelo Regulamento Brasileiro de Aviação Civil nº 90 (RBAC 90) (ANAC, 2022) que traz o seguinte:

“90.295 Uso de armas e munições embarcadas (tiro embarcado)

(a) Para uso de armas e munições embarcadas (tiro embarcado) o órgão ou ente público deverá realizar o **gerenciamento do risco** de tal modo que os riscos à aeronave, aos tripulantes, às outras pessoas com função a bordo, aos passageiros, às pessoas e propriedades em solo encontrem-se dentro do NADSO, estabelecido na matriz de risco para a segurança operacional.

(b) O uso de armas e munições a bordo de aeronaves civis públicas, incluindo, mas não se limitando ao tiro embarcado e lançamento de munições realizados por órgãos e entes públicos, com a devida atribuição legal, deverá observar os seguintes procedimentos:

(1) a realização de disparos, tais como tiro embarcado ou lançamento de munição de dentro do helicóptero, só poderá ser efetuada quando:

(i) previamente coordenado com o piloto em comando da aeronave;

(ii) em conformidade com os SOP e o MOP da UAP; e

(iii) **a tripulação e as outras pessoas com função a bordo estiverem devidamente treinadas para esta operação nos termos delineados pela UAP;**

(2) o atirador deverá utilizar os EPIs necessários à sua segurança; e

(3) as armas longas utilizadas para disparos de dentro da aeronave deverão dispor de coletores ou defletores para as cápsulas de munição.

(i) Na ausência dos coletores ou defletores, a UAP deverá dispor os procedimentos de segurança no SOP a fim de garantir que as cápsulas e munições não atinjam a

tripulação, outras pessoas com função a bordo, aeronave ou passageiros em voo.” (grifo nosso)

O RBAC 90 é fundamental para as operações de tiro embarcado em helicópteros da PMMG, pois estabelece diretrizes e procedimentos rigorosos para garantir a segurança da aeronave, da tripulação, dos passageiros e das pessoas e propriedades em solo. Ao exigir o gerenciamento de riscos, a coordenação com o piloto em comando, o treinamento adequado da tripulação e o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), o RBAC 90 busca minimizar os riscos inerentes ao uso de armas de fogo a bordo de aeronaves, como o fuzil calibre 7,62 mm. O cumprimento dessas normas não apenas assegura a legalidade das operações, mas também contribui para a eficácia e a segurança das missões

de proteção e resgate realizadas pela PMMG, fortalecendo a confiança da sociedade na atuação da instituição.

A PMMG, atenta às transformações sociais e tecnológicas que impactam a segurança pública, demonstra em seu Plano Estratégico 2024-2027 um compromisso com a modernização e a busca por soluções inovadoras (GERAIS, 2023a). A instituição reconhece a necessidade de adaptação constante para aprimorar seus serviços e manter a excelência no atendimento às demandas da sociedade. Nesse contexto, o desenvolvimento de um jogo sério em realidade virtual para treinamento de tiro embarcado se alinha à diretriz estratégica de "Ser uma organização simples, eficiente, transparente e inovadora" (GERAIS, 2023). Essa iniciativa visa modernizar as ferramentas de treinamento, potencializando a capacidade de resposta e a eficiência dos OAT do COMAVE. Ao incorporar a realidade virtual como ferramenta de capacitação, a PMMG busca aprimorar a formação profissional e promover o desenvolvimento contínuo de seus membros, alinhando-se à diretriz de "Ser referência em qualidade e eficiência na formação profissional" (GERAIS, 2023).

A utilização de simuladores para treinamento de pessoal em operações complexas e de alto risco é uma tendência crescente em diversas áreas, incluindo a aviação (VIDAKOVIC; LAZAREVIC; KVRGIC; VASOVIC MAKSIMOVIC *et al.*, 2021). A simulação de voo, como discutido por VIDAKOVIC *et al.*, 2021, oferece um ambiente seguro e controlado para o desenvolvimento de habilidades e tomada de decisões sob pressão, aspectos cruciais para o desempenho de operadores aerotáticos.

Em consonância com essa tendência, a pesquisa proposta neste trabalho busca explorar o potencial da realidade virtual (RV) como ferramenta de treinamento para tiro embarcado em helicópteros, alinhada à diretriz da PMMG de modernizar suas ferramentas e buscar soluções inovadoras (PMMG, 2023). A utilização de simuladores de realidade virtual permite a criação de cenários realistas e personalizados, proporcionando aos operadores a oportunidade de aprimorar suas habilidades de forma segura e eficiente, similarmente ao que é apresentado por (STRUNIAWSKI, 2022) no contexto de treinamento de pilotos de helicópteros *Black Hawk S70i*.

O presente estudo se baseia nessas descobertas, buscando aprofundar a investigação sobre o uso de simuladores de realidade virtual baseados em jogos sérios no contexto específico do treinamento de tiro embarcado em helicópteros da PMMG.

Esta seção apresenta um estudo de caso que detalha a aplicação prática do simulador desenvolvido, demonstrando seu funcionamento por meio de imagens capturadas durante a implementação e os testes realizados com os Operadores Aéreos Táticos (OAT). O objetivo é evidenciar o ambiente virtual, as interações do OAT com os equipamentos e as etapas do treinamento de tiro embarcado.

Ao iniciar o simulador o OAT com os óculos VR está sentado do lado esquerdo do helicóptero, sendo que ao esticar as mãos consegue ter acesso ao fuzil e um carregador logo a sua frente. A Figura 4.17 demonstra a visão do OAT no início da simulação.

Figura 4.17 - visão do OAT no início da simulação



Fonte: Produzido pelo Autor.

Após pegar o fuzil e alimentar a arma com o carregador o OAT está preparado para iniciar o voo, nesse momento fica na porta do helicóptero com o fuzil voltado para fora aguardando o helicóptero atingir a altitude suficiente para os disparos. A Figura 4.18 demonstra o OAT posicionado na porta da aeronave.

Figura 4.18 - visão do OAT aguardando início da subida da aeronave.



Fonte: Produzido pelo Autor.

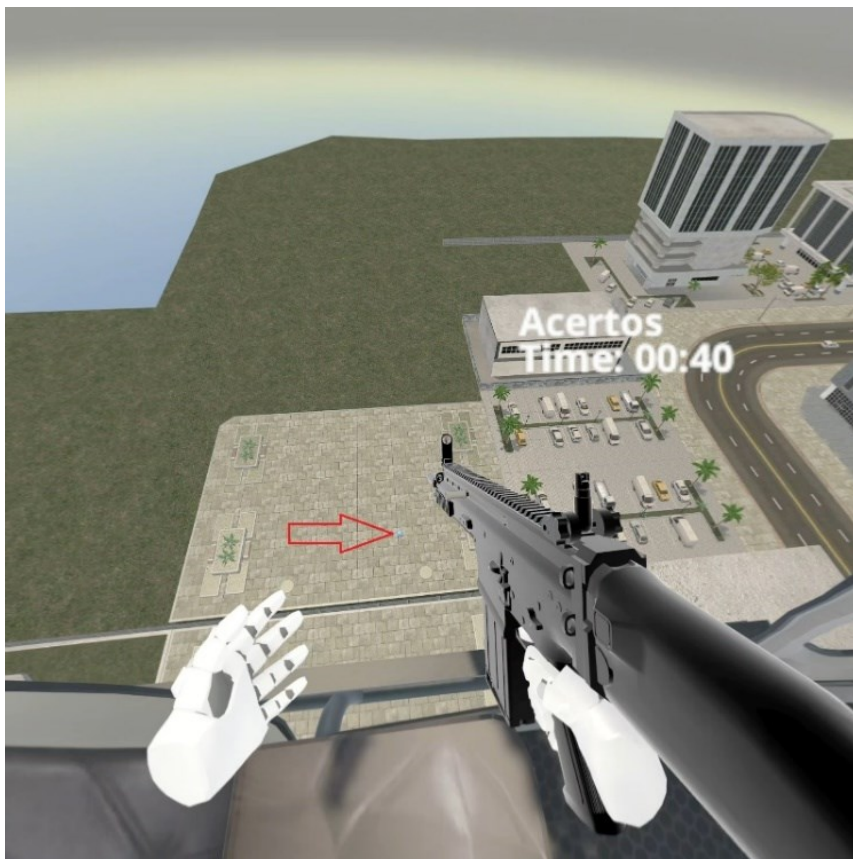
O piloto/instrutor, então aciona a aeronave e ao atingir a altitude de 300 pés, onde é mostrada na tela a altitude, é autorizado a realizar o carregamento do armamento pelo instrutor, identificar o alvo e iniciar a sequência de disparos. A Figura 4.19 demonstra o movimento de carregamento com o helicóptero em voo e a Figura 4.20 demonstra a identificação visual do alvo no solo indicado pela seta vermelha.

Figura 4.19 - visão do OAT durante o carregamento do fuzil.



Fonte: Produzido pelo Autor.

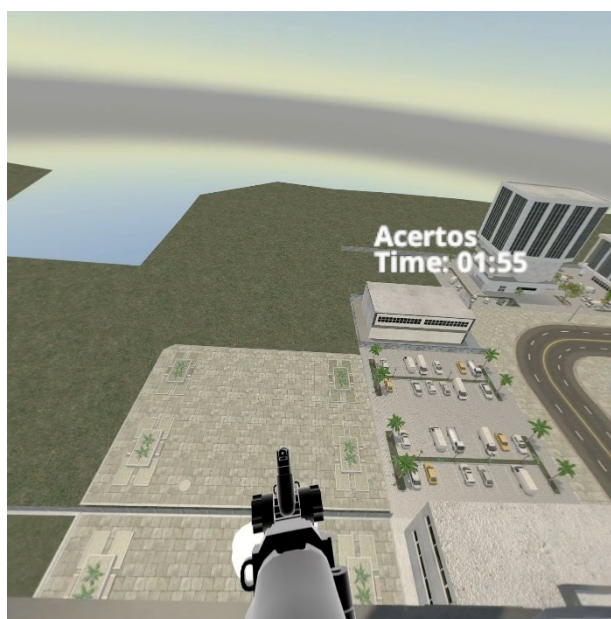
Figura 4.20 - Visão do alvo pelo OAT



Fonte: Produtor pelo Autor.

Com o fuzil carregado é solicitado que o OAT inicie os disparos de preservação da vida. A Figura 4.21 representa a visão do atirador durante os disparos no alvo e a Figura 4.22 representa o ambiente externo real durante a realização dos disparos.

Figura 4.21 - visão do OAT durante a realização dos tiros.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Figura 4.22 – Ambiente real durante realização dos disparos



Fonte: Produzido pelo autor

Durante todo o treinamento, o OAT tem o feedback dos acertos de tiro através do contador que é exibido na tela e o tempo percorrido durante o treinamento. A Figura 4.23 destaca a quantidade de disparos e o tempo de treinamento.

Figura 4.23 - Quantidade de acertos e tempo de treinamento.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Além do teclado, o helicóptero pode ser controlado pelos *joysticks* a Figura 4.24 representa o controle sendo feito pelo teclado e a Figura 4.25 pelos *joysticks*.

Figura 4.24 - Controle do simulador pelo teclado.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Figura 4.25 - Controle do simulador pelos Joysticks.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Portanto, as imagens apresentadas repassam toda a dinâmica do treinamento realizado com os OAT, sendo visualizado as características visuais do simulador.

4.3 PARTICIPANTES DA PESQUISA

Os participantes desta pesquisa foram selecionados com base em critérios específicos para garantir a relevância e a aplicabilidade dos resultados no contexto do treinamento de tiro embarcado em helicópteros. A pesquisa envolve OATs que atuam em operações aéreas da PMMG, e a amostra foi formada por profissionais com vasta experiência em operações de alta complexidade. O objetivo é verificar a eficácia do simulador de realidade virtual como ferramenta de treinamento, analisando o impacto da tecnologia na prática de tiro embarcado.

A escolha dos participantes foi feita de forma criteriosa, considerando fatores como experiência prévia no uso de armas em operações aéreas e familiaridade com tecnologias de RV. Além disso, foi fundamental garantir a disponibilidade dos participantes para envolver-se plenamente no processo de treinamento e responder ao questionário, que permitirá avaliar a usabilidade e eficácia do simulador no treinamento de tiro embarcado. Como se trata, inicialmente, de somente teste do simulador e não envolvendo experimento com pessoas não foi necessário o envio da pesquisa ao comitê de ética.

4.3.1 Critérios de Inclusão e Exclusão

Os critérios de inclusão foram definidos com base na necessidade de contar com profissionais qualificados e com experiência em operações aéreas. Para essa pesquisa, foram selecionados apenas operadores aerotáticos lotados na cidade de Uberlândia-MG, pertencentes ou que já pertenceram à 2ª Base Regional de Aviação de Estado (BRAvE). Além disso, OATs que atuam em outras bases, mas que se disponibilizaram a testar a aplicação na cidade de Uberlândia e responder ao questionário, também foram considerados elegíveis para participar, considerando que todo o desenvolvimento da pesquisa foi realizado nessa cidade.

Critérios de exclusão incluíram operadores que não tivessem experiência significativa em tiro embarcado ou que não estivessem familiarizados com o uso de tecnologias de realidade virtual, além do pesquisador que, apesar de ser OAT, participou somente como instrutor. Operadores que não pudessem dedicar tempo suficiente para

testar o simulador e responder ao questionário foram excluídos da pesquisa, para garantir a qualidade dos dados coletados.

4.3.2 Perfil dos Operadores Aerotáticos

Os operadores aerotáticos que participaram da pesquisa representam um grupo diversificado em termos de idade, sexo e tempo de serviço na PMMG. A média de idade dos participantes foi de 41 anos, com idades variando entre 34 e 49 anos. A maioria dos operadores é do sexo masculino, refletindo a predominância desse perfil em operações aéreas da Polícia Militar. Contudo, houve também a participação de operadoras, destacando a inclusão feminina em atividades operacionais de alta complexidade.

Quanto ao tempo de serviço, os participantes possuem, em média, 20 anos de experiência na corporação, sendo que a maioria acumula mais de 3 anos de atuação em operações aéreas. Esse tempo de serviço proporciona um profundo conhecimento das dinâmicas de operação a bordo de helicópteros, o que foi fundamental para avaliar a eficácia do simulador no treinamento de tiro embarcado. A experiência prévia em missões aéreas de combate e operações de resgate garantiu que os participantes tivessem uma perspectiva prática e crítica ao interagir com o simulador.

4.4 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

Para avaliar a eficácia e a experiência de uso do simulador de realidade virtual no treinamento de tiro embarcado, foram adotados diferentes instrumentos de coleta de dados. Esses instrumentos têm como objetivo captar a percepção dos operadores aerotáticos sobre a usabilidade do simulador, a transferência de habilidades para situações reais e o desempenho dos participantes durante o treinamento. A seguir, são descritos os principais métodos utilizados na pesquisa.

4.4.1 Questionário

O questionário utilizado na pesquisa foi desenhado para captar as impressões dos operadores aerotáticos sobre o simulador, abrangendo aspectos de usabilidade, imersão e eficácia no treinamento. As questões foram formuladas com base em normas de avaliação de usabilidade e experiência do usuário, como a ISO 9241-11 e ISO/IEC 25010. O questionário inclui perguntas que avaliam se o simulador foi fácil de usar, se a interface é intuitiva, e se os operadores se sentiram imersos no ambiente virtual (ANEXO A – Questionário). Também foram feitas perguntas para avaliar o nível de realismo gráfico,

sonoro e de movimento, e se o simulador ajudou a identificar pontos de melhoria nas habilidades de tiro embarcado.

Além de questões objetivas, o questionário oferece espaço para que os operadores façam sugestões ou comentários sobre suas experiências. As respostas fornecem dados importantes que ajudam a ajustar o simulador e torná-lo mais eficiente e eficaz no treinamento dos OATs. Esse *feedback* é fundamental para a contínua melhoria da ferramenta e para garantir que ela atenda às necessidades dos usuários.

4.4.2 Métricas de Desempenho no Simulador

Para mensurar o desempenho dos operadores durante o uso do simulador, foram definidas métricas objetivas que incluem precisão de tiro, tempo de reação e capacidade de tomada de decisão em situações de alta pressão. A **precisão de tiro** foi registrada a partir da quantidade de alvos acertados em relação ao número de disparos realizados. O **tempo de reação** foi avaliado com base no intervalo entre a apresentação do alvo e o disparo, e a **tomada de decisão** foi observada em cenários dinâmicos, onde o operador precisava identificar rapidamente alvos e reagir de acordo.

Essas métricas foram calculadas automaticamente pelo simulador e exibidas para o operador ao final de cada sessão de treinamento, permitindo uma avaliação contínua e objetiva do progresso. Isso também possibilitou a comparação entre diferentes sessões e operadores, fornecendo uma visão clara sobre o nível de proficiência dos participantes e as áreas que necessitavam de mais prática.

4.4.3 Observação Direta

Além dos questionários e das métricas de desempenho, a **observação direta** foi utilizada como método complementar de coleta de dados. Durante as sessões de treinamento, o pesquisador observou o comportamento dos operadores, registrando aspectos como a interação com os controles, a postura ao manusear o fuzil e a adaptação ao ambiente virtual. A observação direta permitiu a identificação de dificuldades que não foram mencionadas nos questionários, como eventuais desconfortos com o equipamento ou problemas de coordenação motora.

Os dados obtidos a partir da observação direta foram utilizados para complementar as respostas do questionário e para refinar a análise das métricas de desempenho. Essa metodologia forneceu uma visão abrangente do impacto do simulador

no treinamento dos OATs, facilitando ajustes no design e na funcionalidade do simulador, sempre com o objetivo de aumentar sua eficácia no desenvolvimento das habilidades dos operadores.

4.5 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os procedimentos de coleta e análise de dados nesta pesquisa foram projetados para garantir a obtenção de resultados detalhados e precisos sobre a avaliação do simulador de realidade virtual no treinamento de tiro embarcado. As etapas de coleta de dados foram cuidadosamente planejadas, desde a condução do protocolo de treinamento até a aplicação dos questionários e a análise estatística dos resultados obtidos.

4.5.1 Protocolo de Treinamento

O protocolo de treinamento adotado nesta pesquisa seguiu uma estrutura padronizada, garantindo a consistência das sessões e a comparabilidade dos dados. O OAT deve ser posicionado sentado em uma cadeira fixa, em um ambiente controlado e livre de obstáculos físicos que pudessem interferir na execução do treinamento. Antes do início da simulação, é fornecida instruções detalhadas sobre o funcionamento dos controles e a dinâmica do treinamento.

Após as instruções, o OAT coloca o *headset* de realidade virtual e a bandoleira da Gunstock MK1, e a simulação é iniciada. Um cronômetro é acionado automaticamente para marcar a duração da sessão. No ambiente virtual, o OAT está sentado no banco traseiro de um helicóptero, com um fuzil posicionado ao seu lado direito e um carregador contendo 20 munições à sua frente. O primeiro passo do treinamento envolve pegar o fuzil, inserir o carregador na arma e aguardar o acionamento da aeronave, que estava inicialmente desligada.

O pesquisador, atuando como piloto comandante da aeronave, controla o helicóptero, elevando-o até 300 pés de altitude (aproximadamente 91 metros). Nesse momento, o OAT é instruído a identificar o alvo, representado por um tambor de metal azul no cenário simulado. O OAT, após confirmar visualmente o alvo, é autorizado a acionar a alavanca de manejo para carregar a arma e solicita autorização ao comandante para iniciar os disparos de preservação da vida. Cada operador tem a quantidade de 2 carregadores com 20 munições para acertar até 20 disparos no alvo, onde o cronômetro é parado automaticamente ao final de uma das condições. Ao finalizar a sequência de

disparos, a simulação é encerrada, e o feedback do OAT coletado para a observação direta.

Logo após o participante é convidado a repetir o cenário, com o objetivo de melhorar o tempo de reação e a precisão dos disparos em comparação com o primeiro teste. Este protocolo será repetido para todos os participantes, garantindo um ambiente controlado e uniformidade nas simulações.

4.5.2 Análise Estatística dos Dados

A análise estatística dos dados coletados será conduzida com foco em três dimensões principais: usabilidade, imersão e eficácia do treinamento, conforme avaliadas pelos participantes através do questionário fornecido (Anexo A). Para isso, serão utilizadas várias abordagens estatísticas que permitirão examinar com profundidade a percepção dos OATs sobre o simulador de realidade virtual.

Inicialmente, a análise utilizará estatísticas descritivas para as respostas relacionadas à usabilidade e imersão. Variáveis como a facilidade de uso do simulador, a intuitividade dos controles e a navegação no ambiente virtual serão resumidas em termos de médias, desvios padrão e frequências relativas. Essas estatísticas fornecerão uma visão geral da experiência dos participantes, por exemplo, identificando se a maioria dos OATs considerou a interface do simulador acessível e intuitiva. Uma tabela será gerada para visualizar claramente os padrões de respostas.

Além disso, para garantir a consistência das respostas, será aplicada uma análise de consistência interna utilizando o coeficiente *Alpha de Cronbach*. Isso permitirá verificar se as questões relacionadas à usabilidade estão correlacionadas de forma consistente entre si, garantindo a confiabilidade do instrumento de coleta de dados. Espera-se que, caso o coeficiente seja superior a 0.7, as questões apresentem uma boa correlação interna, assegurando que todas estão avaliando a mesma dimensão de maneira coerente.

Adicionalmente, será conduzida uma análise de correlação de *Pearson* para explorar a relação entre usabilidade e imersão. A hipótese é que um simulador mais fácil de usar também proporcionará maior imersão, o que será confirmado se houver uma correlação positiva significativa entre essas duas variáveis. Valores próximos de 1 indicarão uma correlação positiva forte, sugerindo que o aumento na usabilidade pode contribuir diretamente para uma experiência mais imersiva e envolvente.

Em relação à eficácia do treinamento, a análise focará nas respostas sobre a transferência de habilidades para o mundo real, avaliando a precisão dos disparos e o tempo da execução no treinamento simulado. Serão aplicadas estatísticas descritivas, médias e desvios padrão, para entender as percepções dos participantes sobre a capacidade do simulador de replicar cenários operacionais. Além disso, a consistência interna das respostas será verificada por meio do coeficiente *Alpha de Cronbach*, que garantirá a confiabilidade das questões, assegurando que todas avaliam de forma coesa a eficácia do simulador.

Todas as estatísticas serão geradas automaticamente pela execução de um script em *Python* (ANEXO B), sendo realizado uma discussão dos resultados obtidos ao final, sendo que essa análise ajudará a identificar padrões complexos e a revelar como as dimensões estudadas se conectam, oferecendo percepções sobre como a experiência geral com o simulador pode ser melhorada. Com isso, será possível fornecer recomendações detalhadas para futuros aprimoramentos no desenvolvimento e aplicação do simulador, garantindo que ele atenda de forma eficiente às necessidades dos operadores aerotáticos.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram detalhados os métodos utilizados para o desenvolvimento, modelagem e teste do simulador de realidade virtual, culminando na realização do estudo de caso. A descrição do design, das mecânicas de jogo e da integração de hardware permitiu evidenciar como o simulador foi concebido para replicar as condições reais do treinamento de tiro embarcado. Além disso, a aplicação prática do simulador com os Operadores Aerotáticos validou sua funcionalidade, demonstrando o potencial de uso em cenários operacionais reais. Dessa forma, o capítulo consolidou os esforços metodológicos que sustentam a proposta deste trabalho.

Com a metodologia bem estabelecida, o próximo capítulo apresentará os resultados e discussões relacionados às análises de usabilidade, imersão e eficácia do treinamento, destacando as contribuições práticas e científicas do simulador.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo serão apresentados os resultados da avaliação do simulador de realidade virtual para treinamento de tiro embarcado, conforme a metodologia proposta no Capítulo 4. Seguindo a terceira fase da DSR, o foco estará na validação da solução desenvolvida através de uma pesquisa experimental com operadores aerotáticos. Esta etapa é fundamental para testar a eficácia do simulador em um contexto realista, onde os participantes, com experiência prática em operações de helicópteros, fornecerão dados quantitativos e qualitativos. A análise dos resultados será baseada na usabilidade, imersão e eficácia do treinamento, utilizando métricas como precisão de disparos e a percepção de melhorias nas habilidades operacionais.

A avaliação experimental proporcionará *feedback* valioso sobre a qualidade técnica do simulador, além de identificar áreas de melhoria para futuras iterações. Este capítulo visa não apenas confirmar a hipótese de que o simulador de realidade virtual pode replicar eficazmente as condições de treinamento de tiro embarcado, mas também discutir como ele pode superar algumas das limitações do treinamento tradicional, como altos custos e riscos operacionais. Com base nos dados coletados e nas percepções dos operadores, será possível discutir a viabilidade do simulador para integração em programas de treinamento regulares, contribuindo significativamente para o avanço das tecnologias de simulação no contexto militar e policial.

5.1 USABILIDADE

A avaliação da usabilidade do simulador foi realizada com base nas respostas dos OATs às questões 1 a 4 do questionário, que abordam a facilidade de uso, a intuitividade da interface, a clareza das instruções fornecidas e a ocorrência de falhas. As três primeiras perguntas seguem uma escala Likert de 1 a 5, enquanto a questão 4 avalia a presença de falhas com as opções “sim, frequentemente”, “sim, ocasionalmente” e “não”. O objetivo dessas perguntas foi entender como os OATs percebem a interação com o simulador em termos de usabilidade.

Na Tabela 1, são apresentados os dados quantitativos relacionados à usabilidade com as respostas em uma escala Likert de 1 a 5 (1 - Discordo totalmente; 5 - Concordo totalmente), exceto a questão 4, que investigou diretamente a presença de falhas ou erros.

Tabela 3 – Respostas das questões sobre Usabilidade.

Questão	1 (Discordo totalmente)	2 (Discordo parcialmente)	3 (Neutro)	4 (Concordo parcialmente)	5 (Concordo totalmente)	Média	Desvio Padrão
1. O simulador foi fácil de aprender e utilizar?	0(0%)	0(0%)	1(12,5%)	0(0%)	7(87,5%)	4,75	0,707
2. A interface do simulador é intuitiva e fácil de navegar?	0(0%)	0(0%)	2 (25%)	0(0%)	6(75%)	4,5	0,925
3. As instruções e informações fornecidas pelo simulador são claras e suficientes?	0(0%)	0(0%)	1(12,5%)	2(25%)	5(62,5%)	4,5	0,755
4. O simulador apresentou falhas ou erros durante o uso?	Sim, frequentemente (0%)	Sim, ocasionalmente 3(37,5%)	Não 5(62,5%)	-	-	-	-

Fonte: Produzida pelo Autor.

A análise dos resultados revela informações importantes sobre a usabilidade do simulador de realidade virtual, com foco nas questões que avaliam a facilidade de uso, intuitividade e clareza das instruções. Essas questões foram analisadas utilizando estatísticas descritivas e uma análise de consistência interna através do coeficiente *Alpha de Cronbach*, permitindo uma compreensão aprofundada da percepção dos OATs.

A primeira questão, que avaliava a facilidade de uso do simulador, revelou uma alta aceitação entre os participantes, com 87,5% concordando totalmente que o simulador foi fácil de aprender e utilizar, enquanto 12,5% mantiveram uma postura neutra. A média de 4,75 com um desvio padrão de 0,707 indica que, em geral, os OATs tiveram experiências bastante consistentes, e a dispersão limitada nas respostas sugere que o simulador atende às expectativas de facilidade de uso de forma eficiente. Essa alta aceitação inicial é crucial, já que uma interface intuitiva e fácil de aprender é fundamental para que o treinamento seja eficaz e envolvente desde o começo.

A intuitividade da interface foi avaliada na segunda questão, apresentando uma média de 4,5. Embora um pequeno grupo tenha respondido com "neutro", 2 (25%), a maioria dos OATs concordou que a interface era intuitiva e de fácil navegação, 6 (75%). O desvio padrão de 0,925 mostra uma leve dispersão nas respostas, indicando que alguns usuários podem ter tido mais dificuldade do que outros. Apesar disso, a baixa variação global nas respostas sugere que o simulador cumpre com o objetivo de oferecer uma experiência de navegação simplificada e acessível.

A terceira questão avaliou a clareza das instruções fornecidas no simulador. Com uma média de 4,5 e um desvio padrão de 0,755, essa questão revelou uma variação maior nas respostas, comparada com as demais questões. Dos participantes, 1 (12,5%) mantiveram-se neutros, 2 (25%) concordaram parcialmente, e 5 (62,5%) concordaram totalmente que as instruções eram claras. Embora a maioria tenha considerado as instruções adequadas, a presença de respostas "neutro" e "concordo parcialmente" sugere que ainda há oportunidades de melhoria. Essa variação nas respostas aponta que, para alguns usuários, as instruções poderiam ser mais detalhadas ou apresentadas de maneira mais acessível.

Para avaliar a consistência interna das questões relacionadas à usabilidade, foi utilizado o coeficiente *Alpha de Cronbach*, que resultou em um valor de 0,81. Este valor indica uma boa correlação interna entre as questões, o que significa que as três perguntas sobre usabilidade estão avaliando de forma consistente a mesma dimensão de experiência do usuário. De acordo com a literatura (HORA; MONTEIRO; ARICA, 2010), um valor de Alpha acima de 0,7 é considerado satisfatório em termos de confiabilidade de questionários (MATTHIENSEN, 2011). Portanto, este coeficiente reforça a confiança na validade do instrumento de avaliação utilizado.

O uso do *Alpha de Cronbach* como ferramenta de avaliação de consistência interna é amplamente aceito, conforme discutido por (BLAND; ALTMAN, 1997), que sugerem que valores entre 0,7 e 0,8 são satisfatórios para comparações entre grupos, como é o caso deste estudo. No entanto, é importante ressaltar que, embora o coeficiente seja útil para avaliar a confiabilidade de um questionário, ele não substitui o julgamento do pesquisador quanto à pertinência de cada item incluído na avaliação (HORA; MONTEIRO; ARICA, 2010). Em nosso caso, o *Alpha* obtido demonstra que os itens estão bem alinhados, mas uma revisão cuidadosa dos itens que apresentaram maior variação (como a clareza das instruções) pode resultar em um aprimoramento ainda maior da confiabilidade geral.

Por fim, a questão sobre a presença de falhas ou erros durante o uso apresentou uma distribuição diferente, uma vez que não utilizou a escala Likert. Dos 8 OATs, 5 (62,5%) indicaram que não encontraram falhas, enquanto 3 (37,5%) relataram erros ocasionais. No entanto, com base na observação direta realizada durante os testes, foi possível verificar que os erros relatados não eram propriamente falhas do simulador, mas decorriam do modo como os participantes manuseavam o fuzil virtual. O fuzil possui uma

malha de colisão projetada para identificar interações físicas, e ao cruzar os controles manuais, como ao pegar o carregador, os operadores acabavam esbarrando no fuzil, o que ocasionava, por exemplo, a sensação de que a arma "desaparecia" ou caía das mãos. Embora esses incidentes influenciassem a percepção dos participantes, não refletiam problemas no funcionamento do simulador em si, mas, sim, uma questão de adequação no uso.

Diante disso, mesmo que tenha havido um índice de erros relatado, a análise indica que esses erros estão mais relacionados à manipulação inadequada do equipamento do que a falhas do sistema. As avaliações gerais mostram que a usabilidade do simulador foi bem vista, especialmente no que tange à facilidade de uso, à intuitividade da interface e à clareza das instruções. Todavia, as observações realizadas durante os testes apontam que ajustes no treinamento dos operadores ou aprimoramentos nas interações físicas poderiam mitigar essas dificuldades e melhorar a experiência dos usuários.

Uma solução para aprimorar a experiência no simulador seria a integração de um armamento físico que simule o fuzil virtual utilizado pelos operadores. Um exemplo dessa tecnologia é o uso de controladores personalizados que incorporam tecnologias como o HTC VIVE *tracker*. Esses controladores podem ser projetados com a forma e o peso de um armamento real, oferecendo uma experiência mais autêntica. Além disso, o recarregamento é feito com carregadores destacáveis, e o gatilho pode ser configurado para oferecer mais resistência, aumentando a sensação de realismo. Esses dispositivos também incluem botões adicionais para acessar menus e, muitas vezes, *joysticks* para permitir o movimento dentro do ambiente simulado (KANKAANPÄÄ, 2023). A adição de um dispositivo como esse poderia melhorar significativamente a usabilidade do simulador, oferecendo um *feedback* tátil mais preciso e uma experiência de treinamento mais imersiva e realista.

A Figura 5.1 demonstra o fuzil descrito do estudo.

Figura 5.1 – Fuzil Equipado com Sensores e feedback Tátil.



Fonte: (PPGUN, 2024)

Os dados coletados a respeito da usabilidade do simulador revelam uma percepção positiva entre os OATs. A interface do simulador foi considerada fácil de usar e intuitiva, enquanto as instruções foram avaliadas como claras, embora haja espaço para aprimoramentos. Essa avaliação é corroborada pela análise de consistência interna, que demonstra a confiabilidade do questionário utilizado, assegurando que as questões estão bem alinhadas para capturar a experiência de usabilidade dos operadores.

Além disso, a análise sugere que pequenas melhorias no design das instruções podem otimizar ainda mais a experiência do usuário. Tais ajustes não apenas facilitariam a navegação e a compreensão das operações do simulador, mas também garantiriam que os OATs se sintam mais confiantes e preparados durante o treinamento. Assim, a continuidade desse processo de aprimoramento é essencial para que o simulador se mantenha como uma ferramenta eficaz e eficiente no desenvolvimento das habilidades dos operadores, maximizando sua capacidade de resposta em situações operacionais reais.

5.2 IMERSÃO

A imersão é um aspecto crucial na avaliação de simuladores de realidade virtual, pois influencia diretamente a eficácia do treinamento e a experiência do usuário. Neste estudo, foram coletados dados referentes a três questões que abordam diferentes dimensões da imersão no ambiente virtual do simulador: a sensação de imersão (questão 5), o nível de realismo apresentado pelo simulador (questão 6) e o conforto dos usuários ao utilizar os dispositivos de controle (questão 7).

Na Tabela 2, são apresentados os dados quantitativos relacionados à imersão com as respostas em uma escala Likert de 1 a 5 (1 - Discordo totalmente; 5 - Concordo totalmente).

Tabela 4 – Resposta das questões sobre Imersão

Questão	1 (Discordo totalmente)	2 (Discordo parcialmente)	3 (Neutro)	4 (Concordo parcialmente)	5 (Concordo totalmente)	Média	Desvio Padrão
5. Você se sentiu imerso(a) no ambiente virtual do simulador?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	8(100%)	5	0
6. O nível de realismo do simulador (gráficos, sons, movimentos) foi adequado?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(12,5%)	7(87,5%)	4,875	0,353
7. Você se sentiu confortável utilizando os dispositivos de controle do simulador?	0(0%)	1(12,5%)	0(0%)	1(12,5%)	6(75%)	4,5	1,069

Fonte: Produzido pelo Autor.

A análise inicial dos dados referentes à imersão indicou que todos os OATs (100%) concordaram totalmente que se sentiram imersos no ambiente virtual do simulador, resultando em uma média de 5,0 e um desvio padrão de 0,0. Esses resultados apontam para uma unanimidade entre os participantes quanto à eficácia do simulador em proporcionar uma experiência de imersão total. Essa percepção positiva é fundamental, pois a imersão é um dos principais objetivos de qualquer simulador, especialmente em contextos de treinamento, onde a capacidade de simular cenários realistas pode impactar significativamente o desempenho dos operadores em situações reais.

Na segunda questão, que abordou o nível de realismo do simulador, os dados mostraram uma média de 4,875 e um desvio padrão de 0,354. A maioria dos participantes (87,5%) concordou totalmente que os gráficos, sons e movimentos do simulador eram adequados. No entanto, a leve variação nas respostas, evidenciada pelo desvio padrão, sugere que, embora a experiência de realismo tenha sido apreciada, alguns usuários podem ter expectativas ou experiências ligeiramente diferentes. A busca por um realismo maior pode levar a aprimoramentos no simulador, como a inclusão de elementos adicionais que simulem o ambiente operacional real.

A terceira questão explorou o conforto dos OATs ao utilizar os dispositivos de controle do simulador. Com uma média de 4,5 e um desvio padrão de 1,069, os resultados mostraram uma resposta um pouco mais variada. Enquanto a maioria dos participantes (62,5%) concordou totalmente com a afirmação de que se sentiu confortável utilizando os controles, 1 (12,5%) manteve-se neutro e 2 (25%) concordaram parcialmente. Essa variação sugere que, embora a maioria tenha tido uma experiência positiva, ainda há espaço para melhorias, especialmente para garantir que todos os usuários se sintam à vontade durante a interação com o simulador.

Para avaliar a consistência interna das questões relacionadas à imersão, foi utilizado o coeficiente *Alpha de Cronbach*. A primeira iteração resultou em um valor de 0,54, o que indicou uma correlação moderada entre as questões, mas também sugeriu que a consistência interna não era tão forte quanto o desejado. Após a purificação do conjunto de itens, especificamente com a remoção da questão 5, o coeficiente Alpha melhorou para 0,72. Este novo valor é mais próximo do limite desejável de 0,7, conforme discutido na literatura (HORA; MONTEIRO; ARICA, 2010), reforçando a eficácia das questões restantes em avaliar a mesma dimensão de experiência de imersão.

Os dados sobre imersão mostram que os operadores aerotáticos tiveram uma experiência majoritariamente positiva com o simulador. A percepção de imersão total é

um resultado encorajador, refletindo a eficácia do ambiente virtual em envolver os usuários. A melhoria no coeficiente *Alpha de Cronbach*, de 0,54 para 0,72, após a purificação, destaca a importância de revisar e refinar os itens do questionário para garantir que todos os aspectos da imersão sejam avaliados de maneira robusta e confiável. A continuidade desse processo de melhoria é essencial para maximizar a eficácia do simulador como ferramenta de treinamento e garantir uma experiência de usuário satisfatória.

5.3 CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE USABILIDADE E IMERSÃO

A análise da correlação entre usabilidade e imersão foi realizada com o objetivo de explorar como essas duas dimensões se relacionam no contexto do simulador de realidade virtual. A usabilidade foi avaliada por meio de três questões, que abordam a facilidade de uso, a intuitividade e a clareza das instruções. Por outro lado, a imersão foi analisada com base nas percepções dos operadores aerotáticos (OATs) sobre o realismo do simulador e o conforto ao utilizar os dispositivos de controle.

Para calcular a correlação de *Pearson*, os dados foram organizados em dois conjuntos: um representando a usabilidade total e outro a imersão total. Os valores foram obtidos a partir da soma das respostas das respectivas questões. Foi utilizado um código em *python* para realização dos cálculos.

Os resultados da análise mostraram uma correlação de *Pearson* de aproximadamente 0,68, acompanhada de um valor *p* de 0,064. Essa correlação é considerada moderada, sugerindo que há uma relação positiva entre a usabilidade do simulador e a percepção de imersão dos OATs. Em termos práticos, isso significa que um simulador mais fácil de usar tende a proporcionar uma maior sensação de imersão.

O valor *p*, embora próximo do nível de significância comum de 0,05, indica que não alcançamos um nível de significância estatística típico. Isso sugere que, embora haja uma tendência positiva, os dados não são suficientemente robustos para afirmar com certeza que um aumento na usabilidade leva diretamente a um aumento na imersão. Essa observação enfatiza a necessidade de uma análise adicional e possivelmente de um aumento no tamanho da amostra para validar essas conclusões.

Portanto, a análise de correlação de *Pearson* entre usabilidade e imersão revela uma relação moderada que pode ser explorada em futuras pesquisas. Essa relação é um indicativo valioso para o desenvolvimento de simuladores de realidade virtual, uma vez

que a usabilidade é um componente crítico na criação de experiências imersivas para os usuários.

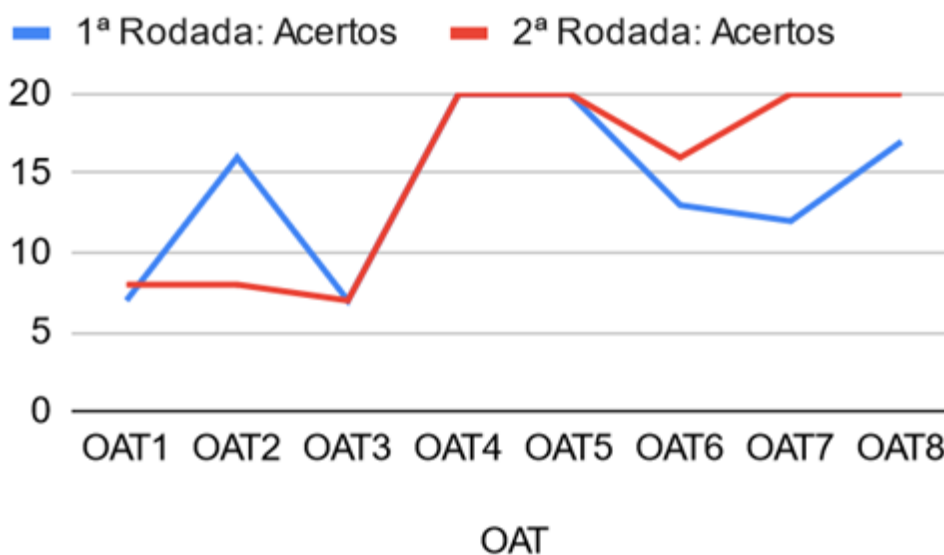
5.4 EFICÁCIA DO TREINAMENTO

A análise da eficácia do treinamento focou na transferência de habilidades para o mundo real, especialmente em relação à precisão dos disparos e ao tempo de execução durante o treinamento simulado. A precisão dos disparos é um indicativo direto da habilidade dos operadores em replicar cenários de tiro embarcado, enquanto o tempo de execução reflete sua capacidade de realizar operações com rapidez e eficiência. Esses dois fatores são críticos para medir a eficácia do simulador na preparação para situações reais.

Os dados coletados mostram variação no desempenho dos OATs em termos de precisão e tempo. A precisão dos disparos variou entre 7 e 20 acertos, e o tempo de execução variou entre 01:15 e 05:36, dependendo da rodada e do OAT.

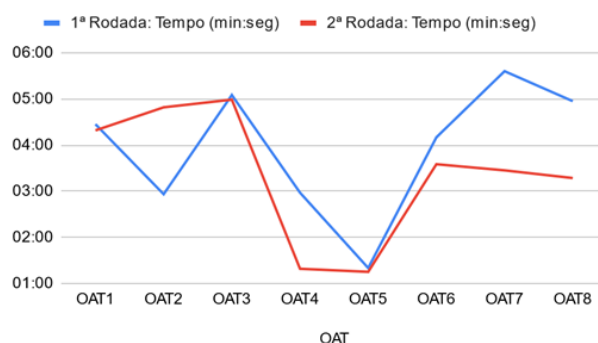
As Figura 5.2 e 5.3 demonstram os dados coletados de acertos e tempo (min:seg) graficamente na 1ª e 2ª rodadas de treinamento de cada OAT.

Figura 5.2 – Número de Acertos por OAT.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Figura 5.3 – Tempo em Cada Rodada por OAT.



Fonte: Produzido pelo Autor.

Ainda sobre a eficácia do treinamento com o simulador de tiro embarcado, quatro perguntas principais foram feitas, avaliando a percepção dos OATs sobre a contribuição do simulador para o desenvolvimento de suas habilidades de tiro, a relevância do aprendizado, a preparação para operações reais e a identificação de pontos de melhoria. As respostas foram coletadas utilizando uma escala Likert, variando de “Discordo totalmente” a “Concordo totalmente”.

Na tabela 3, são apresentados os dados quantitativos relacionados à eficácia do treinamento com as respostas em uma escala Likert de 1 a 5.

Tabela 5 – Respostas das Questões Sobre Eficácia do Treinamento

Questão	1 (Discordo totalmente)	2 (Discordo parcialmente)	3 (Neutro)	4 (Concordo parcialmente)	5 (Concordo totalmente)	Média	Desvio Padrão
1. O simulador contribuiu para o desenvolvimento das suas habilidades de tiro embarcado?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(12,5%)	7(87,5%)	4,875	0,353
2. O simulador proporcionou uma experiência de aprendizado relevante para as suas atividades como Operador Aerotático?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	8(100%)	5,0	0,0
3. Você se sente mais preparado(a) para realizar operações de tiro embarcado após utilizar o simulador?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(12,5%)	7(87,5%)	4,875	0,353
4. O simulador o(a) ajudou a identificar pontos de melhoria nas suas habilidades de tiro embarcado?	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	8(100%)	5,0	0,0

Fonte: Produzido pelo Autor.

A análise das estatísticas descritivas sobre a eficácia do treinamento revelou resultados bastante positivos entre os operadores aerotáticos (OATs). A primeira questão, que avaliou a eficácia do treinamento, obteve uma média de 4,875, com um desvio padrão de 0,353, o que indica que a maioria dos participantes concordou que o simulador contribuiu para o desenvolvimento de suas habilidades de tiro embarcado. Da mesma forma, a terceira questão, que investigou se o simulador preparou os OATs para operações reais, apresentou uma média de 4,875, com o mesmo desvio padrão, sugerindo que os participantes se sentiram mais preparados após o treinamento.

As questões que abordaram a experiência de aprendizado (questão 2) e a identificação de melhorias (questão 4) apresentaram unanimidade entre os participantes, com médias de 5,0 e desvio padrão de 0,0, demonstrando que todos os OATs concordaram totalmente sobre a relevância do aprendizado proporcionado pelo simulador e sua capacidade de identificar pontos de melhoria nas habilidades.

O coeficiente *Alpha de Cronbach*, que mede a consistência interna das respostas, resultou em 0,67 e encontra-se ligeiramente abaixo do limite geralmente considerado ideal para estudos aplicados, que é 0,7. Contudo, é importante contextualizar esse resultado dentro do escopo da pesquisa e da literatura disponível. Segundo (MATTHIENSEN, 2011), em pesquisas exploratórias, é aceitável que o *Alfa de Cronbach* se situe em torno de 0,6, o que justifica a validade dos resultados neste estudo, considerando o caráter inicial da investigação. Além disso, (HORA; MONTEIRO; ARICA, 2010) destacam que, embora o valor de 0,7 seja utilizado como referência, não há um consenso absoluto entre os pesquisadores sobre um valor mínimo fixo para a interpretação da confiabilidade de questionários. (BLAND; ALTMAN, 1997) sugerem que, para comparações entre grupos, valores entre 0,7 e 0,8 são satisfatórios, enquanto valores mais elevados são recomendados para aplicações mais rigorosas, como na área médica. Dessa forma, o valor de 0,67 obtido neste estudo pode ser considerado aceitável dentro do contexto exploratório, sugerindo uma consistência interna moderada nas respostas dos participantes. Para futuras iterações do estudo, ajustes nas questões podem ser considerados para aprimorar a confiabilidade.

5.5 DISCUSSÃO

Os resultados da avaliação do simulador de realidade virtual para treinamento de tiro embarcado mostraram-se promissores, especialmente em relação às dimensões de usabilidade, imersão e eficácia do treinamento. A análise quantitativa evidenciou uma

percepção positiva dos OATs quanto à interface intuitiva, facilidade de uso e clareza das instruções, reforçada por um coeficiente *Alpha de Cronbach* de 0,81, que atesta a consistência interna das questões de usabilidade. A imersão foi outro aspecto bem avaliado, refletindo-se na experiência envolvente relatada pelos operadores, com realismo e conforto nos controles recebendo médias altas e um coeficiente Alpha ajustado de 0,72, após uma etapa de purificação.

A análise correlacional entre usabilidade e imersão revelou uma correlação moderada, indicando uma relação positiva entre a facilidade de uso e a sensação de imersão proporcionada pelo simulador. Esse resultado sugere que melhorias na interface e nos controles podem potencializar a imersão, um ponto fundamental para aumentar a eficácia de treinamento em simuladores.

Para a eficácia do treinamento, a análise descritiva mostrou que o simulador foi bem avaliado quanto à capacidade de desenvolver habilidades de tiro e replicar o ambiente operacional, com médias superiores a 4,8 nas questões sobre preparo e aprendizado. O coeficiente *Alpha de Cronbach*, de 0,67, embora ligeiramente abaixo do ideal para pesquisas aplicadas, é aceitável no contexto exploratório deste estudo. Esse resultado sugere consistência moderada nas avaliações, que podem ser aprimoradas em futuras iterações do estudo com ajustes nas questões.

As sugestões e comentários fornecidos pelos OATs na seção "Sugestões e Comentários" complementam essas percepções quantitativas, oferecendo recomendações específicas para futuras melhorias do simulador. Na primeira questão, "Você tem alguma sugestão para melhorar o simulador?", a maioria dos operadores não teve observações adicionais, indicando uma satisfação geral com o simulador. No entanto, algumas sugestões de aprimoramento foram valiosas. O OAT3, por exemplo, mencionou a necessidade de incluir uma mira *red dot* ou reduzir a vibração da aeronave para melhorar o enquadramento e o alinhamento da mira, além de sugerir uma sinalização para erros nos disparos. Essas observações destacam a importância de elementos que favoreçam a precisão no tiro embarcado e que poderiam enriquecer a experiência do usuário.

Outros OATs reforçaram aspectos positivos da experiência de imersão. O OAT1, que teve seu primeiro contato com simuladores, mencionou a qualidade realista da experiência, enquanto o OAT4 destacou a forte sensação de imersão proporcionada pelo ambiente simulado, similar à vivência real em operações embarcadas. O OAT8 destacou o simulador como uma alternativa eficiente para contornar dificuldades logísticas do

treinamento presencial, indicando o potencial do simulador para complementar ou substituir treinamentos presenciais em alguns contextos.

Essas observações qualitativas reforçam a relevância dos resultados e indicam direções específicas para aprimoramentos no simulador. No capítulo 6, as conclusões serão discutidas com base nos achados e nas recomendações, consolidando as contribuições deste estudo para o desenvolvimento de tecnologias de simulação voltadas ao treinamento operacional de alto risco.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste capítulo confirmam a relevância do simulador como ferramenta de apoio ao treinamento de tiro embarcado, destacando sua eficácia, usabilidade e imersão. As análises realizadas demonstraram que o sistema atende às expectativas dos operadores, proporcionando uma experiência de treinamento segura e prática, com resultados estatisticamente significativos em termos de eficácia. A discussão dos achados reforça a contribuição deste estudo para a aplicação de tecnologias imersivas no contexto policial e militar, ampliando as possibilidades de treinamento em ambientes controlados e altamente realistas.

Com base nesses resultados, o próximo capítulo apresentará as conclusões finais da pesquisa, refletindo sobre o cumprimento dos objetivos estabelecidos e sugerindo direções futuras para aprimoramentos e estudos complementares.

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a avaliação de um simulador de realidade virtual, baseado em jogos sérios, para o treinamento de tiro embarcado em helicópteros da PMMG, atenderam ao objetivo geral de realizar um estudo de caso alinhado com o treinamento anual de tiro do COMAVE. O simulador foi projetado para proporcionar um ambiente virtual imersivo e interativo, promovendo o aprimoramento das habilidades de tiro, como manejo de armas, tiro de precisão e tomada de decisão em cenários realistas. Com base nos dados coletados e nas análises realizadas, conclui-se que o simulador cumpriu satisfatoriamente o propósito de oferecer um ambiente seguro e eficaz para a prática, permitindo o desenvolvimento das técnicas necessárias ao tiro embarcado, com um nível significativo de realismo e alinhado às demandas operacionais da PMMG.

O primeiro objetivo específico, de projetar e desenvolver um simulador de RV que reproduza fielmente o ambiente operacional de tiro em helicópteros, foi cumprido ao incluir no simulador modelos detalhados das aeronaves, armamentos e demais equipamentos relevantes para a PMMG. A modelagem dos cenários urbanos e do interior das aeronaves possibilitou uma experiência de treinamento que reflete as condições reais, o que foi percebido de forma positiva pelos OATs. A avaliação dos detalhes de modelagem e dos elementos de simulação sugere que o simulador se mostrou adequado para o desenvolvimento de habilidades práticas, como o manuseio de armas e a resposta a cenários críticos, além de reproduzir o ambiente operacional com fidelidade.

O segundo objetivo, que tratou da implementação de mecânicas de jogo realistas para simular condições de voo e disparo, também foi atendido. As simulações dos alvos e das diferentes missões de treinamento permitiram criar uma experiência desafiadora e imersiva, com condições próximas das operações reais. O *feedback* dos OATs apontou aspectos específicos para aprimoramento, como a adição de uma mira *red dot* e ajustes na estabilidade do armamento, mas, no geral, as mecânicas de jogo implementadas cumpriram seu papel ao proporcionar um treinamento envolvente e eficaz.

O terceiro objetivo, que visava o desenvolvimento de funcionalidades detalhadas para operações de tiro de fuzil e o posicionamento no interior da aeronave, também foi atendido. A simulação precisa das etapas de operação e a configuração do helicóptero modelo AS350, ajustadas conforme os parâmetros do COMAVE, foram aspectos destacados positivamente pelos participantes. Essas funcionalidades permitiram aos

operadores praticarem técnicas de tiro e movimentação dentro da aeronave, o que contribuiu para o treinamento de forma prática e realista.

O quarto objetivo, que envolveu a avaliação da usabilidade e da percepção dos OATs sobre o simulador, foi atendido. A coleta de dados sobre a facilidade de uso, a intuitividade da interface e a satisfação dos operadores revelou uma aceitação positiva. O coeficiente *Alpha de Cronbach* demonstrou a consistência interna das respostas, reforçando a confiabilidade do instrumento de avaliação. Além disso, a análise revelou sugestões relevantes dos OATs, que apontaram para ajustes e possíveis melhorias, como um tempo maior para o treinamento e adaptações para aumentar a estabilidade do armamento. Esses *feedbacks* permitiram identificar áreas de aprimoramento para o simulador, oferecendo um direcionamento para futuras atualizações.

Por fim, o objetivo de iniciar o desenvolvimento de uma aplicação virtual adaptável e modular, que servisse como referência para diretrizes futuras do COMAVE, foi atendido ao criar um protótipo funcional que poderá ser expandido. A utilização de recursos como o *Silantro Helicopter Simulator Toolkit* e dispositivos de *hardware* avançados, como o Pico 4 e o *Gunstock MK1*, foram elementos fundamentais para garantir a imersão e o *feedback* tátil, permitindo que o simulador atenda às necessidades iniciais da PMMG e abra caminho para o desenvolvimento de funcionalidades adicionais.

Para trabalhos futuros, o simulador pode ser ampliado com funcionalidades adicionais, como a simulação de disparos contra veículos em movimento, cenários com pessoas em fuga e a incorporação do recuo das armas durante os disparos. Essas expansões permitiriam cobrir uma gama mais ampla de cenários operacionais, atendendo às necessidades de treinamento de forma mais abrangente. A implementação dessas funcionalidades trará um nível de realismo ainda maior ao simulador e poderá oferecer uma plataforma completa e adaptável para o treinamento de tiro embarcado.

Em conclusão, o simulador de realidade virtual desenvolvido neste estudo provou ser uma ferramenta eficaz e promissora para o treinamento de tiro embarcado. Ao cumprir os objetivos propostos, a pesquisa reforça a viabilidade do uso da realidade virtual em treinamentos complexos, como o de operações aéreas, e fornece uma base sólida para o aprimoramento contínuo da tecnologia no contexto da PMMG.

REFERÊNCIAS

- AALTOLA, K. Empirical Study on Cyber Range Capabilities, Interactions and Learning Features. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65722-2_26
- ABNT, A. B. d. N. T.-. **NBR 9241-11 - Requisitos Ergonômicos para Trabalho de Escritórios com Computadores: Parte 11 – Orientações sobre Usabilidade**. 2002. Disponível em: https://www.inf.ufsc.br/~edla.ramos/ine5624/_Walter/Normas/Parte%2011/iso9241-11F2.pdf. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.
- ALOTAIBI, S. J. UTAUT model for the use of Augmented Reality in education and training. **Revista Română de Informatică și Automatică**, 33, n. 1, p. 21-32, 2023. <https://doi.org/10.33436/v33i1y202302>
- ALSAEED, D. A. **Artificial Intelligence Impact on Soldiers in Virtual Reality Training Simulators**. 2020. - King Abdullah I School of Graduate Studies and Scientific Research, Princess Sumaya University for Technology.
- ANAC, A. N. d. A. C. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil (Rbac) Nº 90: Requisitos para Operações Especiais de Aviação Pública. 2022.
- ARMAS DE ARMAS, C. d. Método de avaliação automatizada para simulador de realidade virtual em treinamento de agentes de segurança. 2020.
- ASSIS, C. T. D. **TREINAMENTO DE TIRO VIRTUAL: Comparativo de custos com o treinamento utilizando munição real e das técnicas de tiro possíveis de serem realizadas nos simuladores**. 2019. - CENTRO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR.
- BASOGLU, Y.; SERBETCIOGLU, M. B.; CELIK, I.; DEMIRHAN, H. Effectiveness of virtual reality-based vestibular rehabilitation in patients with peripheral vestibular hypofunction. **Turk J Med Sci**, 52, n. 6, p. 1970-1983, Dec 2022. <https://doi.org/10.55730/1300-0144.5545>
- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Cronbach's alpha. 1997.
- BROWN, C.; HICKS, J.; RINAUDO, C. H.; BURCH, R. The Use of Augmented Reality and Virtual Reality in Ergonomic Applications for Education, Aviation, and Maintenance. **Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications**, 31, n. 4, p. 23-31, 2021. <https://doi.org/10.1177/10648046211003469>
- BULANOV, V.; ZAKHAROV, A.; SERGIO, L.; LEBEDEV, M. VISUOMOTOR TRANSFORMATION WITH A P300 BRAIN-COMPUTER INTERFACE COMBINED WITH ROBOTICS AND VIRTUAL REALITY: A DEVICE FOR POST-STROKE REHABILITATION. 2021. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3811232>
- CARDOSO, A.; JÚNIOR, E. L.; KIRNER, C.; KELNER, J. **Tecnologia para o Desenvolvimento de Sistemas de Realidade Virtual e Aumentada**. 2007.

CARNEIRO, J. A. S. **UM JOGO SÉRIO DE BOCHA EM AMBIENTE DE REALIDADE VIRTUAL PARA TRATAMENTO NÃO FARMACOLÓGICO DE PACIENTES COM DOENÇA DE PARKINSON**. 2023. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

CENIPA, C. d. I. e. P. d. A. A. Relatório Final A-065/Cenipa/2019. 2019.

COELHO, C. F. B. **EMPREGO DO APOIO AÉREO DA POLÍCIA MILITAR DE MINAS GERAIS EM FACE DA INTERIORIZAÇÃO DA CRIMINALIDADE VIOLENTA: ênfase aos ataques às agências bancárias no estado de Minas Gerais**. 2018. - Centro de Pesquisa e Pós Graduação, Academia de Polícia Militar de Minas Gerais.

DAHLEN-LERVAG, E. **Bruk av VR-teknologi til operativ trening i politiet**. 2023.

DE ARMAS, C.; TORI, R.; NETTO, A. V. Use of virtual reality simulators for training programs in the areas of security and defense: a systematic review. **Multimedia Tools and Applications**, 79, n. 5-6, p. 3495-3515, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08141-8>

DIAS, R. d. R. **DESENVOLVIMENTO DE UM JOGO SÉRIO PARA A APRENDIZAGEM DE MANUTENÇÃO DE COMPUTADORES**. 2014. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

EGOROV, S. F. Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Implementation Levels and Free Software Structure. **Devices and Methods of Measurements**, 14, n. 4, p. 251-267, 2023. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267>

EYBERS, S.; GERBER, A. A Preliminary Investigation into the Role of Virtual Sport Training Technology as Emotional Coping Mechanism During a National Pandemic Lockdown. p. pp. 186–194, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66093-2_18

FELIZARDO, K. R.; NAKAGAWA, E. Y.; FABBRI, S. C. P. F.; FERRARI, F. C. Revisão sistemática da literatura em engenharia de software : teoria e prática. 1. ed., 2017.

FERREIRA, M. V. S. **ANÁLISE DA DESCONCENTRAÇÃO DO SERVIÇO DE RADIOPATRULHAMENTO AÉREO POLICIAL DE ASAS ROTATIVAS, APÓS A CRIAÇÃO DO COMANDO DE AVIAÇÃO DO ESTADO**. 2022. - Centro de Pesquisa e Pós-graduação, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR DE MINAS GERAIS.

FERREIRA, W. E. M. **O IMPACTO DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES NO USO DA FORÇA: uma análise na Polícia Militar de Minas Gerais**. 2024. - Centro de Pesquisa e Pós-graduação, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR DE MINAS GERAIS.

FILHO, A. P.; SCARPELINI, S. Simulação: Definição. **Medicina (Ribeirão Preto)**, 40(2), p. 162-166, 2007. <https://doi.org/10.11606/issn.2176-7262.v40i2p162-166>

FONSECA, D.; HEIM, I.; HOUSER, R.; COOK, R. *et al.* Assessment of the Neurological Activation in Law Enforcement under High Threat Situations: A Fuzzy Logic Approach. **World Journal of Neuroscience**, 13, n. 01, p. 67-89, 2023. <https://doi.org/10.4236/wjns.2023.131005>

GAO, Q.; ZHANG, L. Brief mindfulness meditation intervention improves attentional control of athletes in virtual reality shooting competition: Evidence from fNIRS and eye tracking. **Psychol Sport Exerc**, 69, p. 102477, Nov 2023. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2023.102477>

GARCIA, R. **Da indústria ao Exército: realidade virtual vira trunfo em treinamento**. 2024. Disponível em: <https://www.metropoles.com/negocios/industria/da-industria-ao-exercito-realidade-virtual-e-usada-em-treinamentos>. Acesso em: 19 de dezembro de 2024.

GERAIS, P. M. d. M. Plano Estratégico da Polícia Militar de Minas Gerais para o quadriênio 2024-2027. 2023a.

GERAIS, P. M. d. M. Treinamento Teórico de Tiro Embarcado. 2023b.

GIRARDI, R.; PEREIRA FILHO, A. A.; TEODORO, G. P.; DE OLIVEIRA, J. C. TAT VR: a Virtual Reality Simulator for Military Shooting Training. *In: Proceedings of the 24th Symposium on Virtual and Augmented Reality*, 2022, p. 21-28. DOI: 10.1145/3604479.3604504. <https://doi.org/10.1145/3604479.3604504>

GRABOWSKI, A.; BERESKA, D.; PROBIERZ, E.; GALUSZKA, A. The influence of human-computer interface on usability and technology acceptance of VR-based shooting training with a comparison with typical shooting range. **Displays**, 81, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102621>

GRECH, M. C.; SACCO, O. Analysing Mobile VR Games for Learning a Sport: A Pistol Target Shooting VR Game Use Case. *In: International Conference on the Foundations of Digital Games*, 2020, p. 1-4. DOI: 10.1145/3402942.3409791. <https://doi.org/10.1145/3402942.3409791>

HARDSTORE. **Anúncio Genius Joystick MaxFighter F17**. 2024. Disponível em: <https://www.hardstore.com.br/shop/products/genius-joystick-maxfighter-f17-31600034100>. Acesso em: 22 de Setembro de 2024.

HIWAT, T. F. **From Virtual Bullets to Real Brilliance: The effect of debriefing after VR firearm training**. 2023. -, UTRECHT UNIVERSITY.

HORA, H. R. M. d.; MONTEIRO, G. T. R.; ARICA, J. Confiabilidade em Questionários para Qualidade: Um Estudo com o Coeficiente Alfa de Cronbach. 2010.

HSU, W.-K. K.; SHU, M.-H.; LIU, Y.-C.; WANG, T.-C. Risk Management of Safety for Flight Training in Air Forces. **Aerospace**, 9, n. 10, 2022. <https://doi.org/10.3390/aerospace9100558>

IMBEL, I. D. M. B. D. B. **MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO CARABINA 7,62 IA2**. 2019. Disponível em: <https://www.imbel.gov.br/phocadownload/produtos/manuais/fz-ca/manual-carabina-imbel-762-IA2.pdf>. Acesso em: 21 de Setembro de 2024.

ISO, I. S. **ISO 20282-1: Ease of operation of everyday products — Part 1: Design requirements for context of use and user characteristics**. 2006. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/34122/f92a3d9e1d9d48a69481a48542ebe349/ISO-20282-1-2006.pdf>. Acesso em: 25 de setembro de 2024.

JOESSEL, F. **Development of a Video Game to Investigate the AVG Features Promoting Attentional Control**. 2022. - Faculté de Psychologie, de l'Université de Genève.

JUNIOR, M. L. d. S. **O USO DA TECNOLOGIA REALIDADE AUMENTADA NO TREINAMENTO POLICIAL- MILITAR EM MINAS GERAIS: uma abordagem estratégica**. 2024. - Centro de Pesquisa e Pós-Graduação, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR DE MINAS GERAIS.

JURÁNEK, V. **Virtual reality toolkit for the Unity game engine**. 2021. - Faculty of Informatics, Masaryk University.

KANKAANPÄÄ, J. **Comparing the Finnish Defence Forces indoor shooting range simulator to a virtual reality solution**. 2023. -, Turku University of Applied Sciences.

KENT, J. **Using Simulation For Law Enforcement De-escalation Training**. 2020. -, University of Central Florida.

KINBERG, A. L. K. **Key Factors Considered When Purchasing a VR Hobby Skill Training Simulator: A Consume Perspective**. 2022. - Industriell ekonomi och organisation, KTH Industriell teknik och management.

KLEYGREWE, L. **IMMERSED IN TRAINING: ADVANCING POLICE PRACTICE WITH VIRTUAL REALITY**. 2023. -, Vrije Universiteit Amsterdam.

KU, X.; HYUN, S.; LEE, B. The role of death anxiety on marksmanship performance: a virtual reality simulator study. **Ergonomics**, 65, n. 2, p. 219-232, Feb 2022. <https://doi.org/10.1080/00140139.2021.1965222>

KVALNES, H. H. **Immersive Interface in Virtual Reality**. 2021. - Department of Design, Norwegian University of Science and Technology.

LOGITECH. **Flight Rudder Pedals**. 2024. Disponível em: <https://www.logitechg.com/en-us/products/flight/flight-simulator-rudder-pedals.945-000024.html?srsId=AfmBOoopWkg3mKRWZPbPLdoqb4tm7uH0Dv9b0-YaPswzg2fJG9ddvxV>. Acesso em: 22 de Setembro de 2024.

MARIA DOS SANTOS GALVÃO, N.; MADUREIRA, J. S.; SCHNEIDER, H. N. **DESIGN SCIENCE RESEARCH PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARTEFATOS**

EDUCACIONAIS **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, n.54, 18, p. 194-220, 2024.

MARQUES, I. A. **Jogo sério e realidade virtual na reabilitação do AVC crônico: protocolo individualizado**. 2019. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

MARTIN, V. B. S. **Simulador de como apagar um incêndio de pequeno porte com os principais tipos de extintores existentes**. 2019. - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.

MARTIN, V. B. S. **Hospital Escape VR: Desenvolvimento de um Jogo Sério para Treinamento de Evacuação Hospitalar Diante de um Incêndio**. 2022. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

MARTONO, K. T.; NURHAYATIL, O. D.; WULWIDA, C. G. AUGMENTED REALITY — BASED SHOOTING SIMULATOR SYSTEM TO ANALYSIS OF VIRTUAL DISTANCE TO REAL DISTANCE USING UNITY 3D. 2023.

MASTERPIXEL3D. **Fantastic City Generator**. 2024. Disponível em: <https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/urban/fantastic-city-generator-157625>.

MATTHIENSEN, A. **Uso do Coeficiente Alfa de Cronbach em Avaliações por Questionários**. 2011.

MATTILA, N. **Alternative control methods in virtual reality applications: Assessing usability of keyboard and mouse, and traditional game controllers in virtual reality**. 2021. 72 f. - Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT.

MELO, A. H. S. D. **JOGOS SÉRIOS EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL E/OU AUMENTADA NA REABILITAÇÃO DE PACIENTES ACOMETIDOS COM ACIDENTE VASCULAR CEREBRAL: UMA REVISÃO NARRATIVA**. 2021. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

MEMETOV, R. U. **TECHNOLOGY FOR DEVELOPING THE EFFECTIVENESS OF SHOOTING AMONG UNIVERSITY STUDENTS INVOLVED IN BIATHLON**. 2023.

MENG, E. L. C.; ALBERT, Q. **MovErArm: Virtual Reality Game for Physical Rehabilitation**. In: **Proceedings of the International Conference on Computer, Information Technology and Intelligent Computing (CITIC 2022)**, 2022. cap. Chapter 27, p. 342-356. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-094-7_27

MUNOZ, J. E.; QUINTERO, L.; STEPHENS, C. L.; POPE, A. T. **A Psychophysiological Model of Firearms Training in Police Officers: A Virtual Reality Experiment for Biocybernetic Adaptation**. **Front Psychol**, 11, p. 683, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00683>

NI, T.; ZHANG, P.; ZHAO, Y.; CHEN, S. *et al.* Multi-screen dynamic viewpoint system for helicopter simulator. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, 16, n. 3, p. 955-968, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00814-9>

NISSAN, S.; LEANDER, H. **Exploring the possibilities of using augmented reality for military training**. 2023. - School of Engineering, Jönköping University.

NITKIEWICZ, S.; ZAREMBA, A.; TYTUŁA, J. The analysis of the possibilities of using a virtual reality system in fitness training. **Technical Sciences**, n. 2023, 2023. <https://doi.org/10.31648/ts.9274>

NOGUEIRA, K. L. **UM FRAMEWORK DE REALIDADE VIRTUAL E AUMENTADA PARA O APOIO A SISTEMAS DE REABILITAÇÃO**. 2015. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

NUCCI PORSANI, R.; CONSTÂNCIO TRINDADE, A. B.; DEMAISON, A.; MONT'ALVÃO, C. R. *et al.* Evaluations of Design and User Experience in Virtual Reality: A Systematized Bibliographic Review. **Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 40, p. 38-49, 2023. <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2023.40.005>

OLIVEIRA, D. F. **UTILIZAÇÃO DE HELICÓPTEROS DE MENOR CUSTO OPERACIONAL NA AVIAÇÃO DE SEGURANÇA PÚBLICA: uma avaliação da economicidade ante a eficácia**. 2020. - CENTRO DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR.

OLIVEIRA, T. V. d. **GESTÃO DE CUSTOS NO COMANDO DE AVIAÇÃO DO ESTADO: uma proposta de metodologia de custeio por atividades**. 2020. - Centro de Pesquisa e Pós-Graduação, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR.

OYEDOYIN. **Silantro Helicopter Simulator Toolkit**. 2024. Disponível em: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/silantro-helicopter-simulator-toolkit-142612>. Acesso em: 21 de setembro.

P. GRAY-MASON, R.; J. COULTAS, A.; TECE BAYRAK, A. Observing the Stroop Effect within a First Person Shooter Concept. *In*: 2021 Australasian Computer Science Week Multiconference, 2021, p. 1-9. DOI: 10.1145/3437378.3442689.

PICO. **Especificações do produto**. 2024a. Disponível em: <https://www.picoxr.com/global/products/pico4/specs>. Acesso em: 22 de Setembro de 2024.

PICO. **User Guide: For PICO 4 Serie**. 2024b. Disponível em: <https://pico-web-tob.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/20230825/document/1695015503416348672.pdf>. Acesso em: 22 de Setembro de 2024.

PORTAL, I. **ISO/IEC 25010**. 2024. Disponível em: <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010>. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.

PPGUN. **What's PPGUN?**, 2024. Disponível em: <http://www.ppgun.com/ppgun/2109140-2109140.html>. Acesso em: 07 de Outubro de 2024.

PRATIHER, S.; SAHOO, K. P.; ACHARYA, M.; RADHAKRISHNAN, A. *et al.* Affective Physiological State Analysis and Interpretable Predictive Modeling of Marksmanship in Go/NoGo VR Shooting Difficulty Task. 2022. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21669248>

ROBOT, E. **Auto Hand - VR Interaction**. 2024. Disponível em: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/game-toolkits/auto-hand-vr-interaction-165323>. Acesso em: 21 de setembro de 2024.

ROCHA, R. V. d.; BITTENCOURT, I. I.; ISOTANI, S. Análise, Projeto, Desenvolvimento e Avaliação de Jogos Sérios e Afins: uma revisão de desafios e oportunidades. *In: Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE 2015)*, 2015, DOI: 10.5753/cbie.sbie.2015.692.

RODRIGUES, L. C.; MEZZAROBIA, O.; PEIXOTO, F. H. DSR COMO PROTOCOLO DE PESQUISA PARA TESES E DISSERTAÇÕES PROFISSIONAIS EM DIREITO. **Administração de Empresas em revista unicuritiba**, V. 1, n. 34, p. 161-188, 2024.

SAMPAIO, D. R. **O EMPREGO DO FUZIL PARAFAL CALIBRE 7,62 MM A BORDO DOS HELICÓPTEROS DA POLÍCIA MILITAR DE MINAS GERAIS: AVALIAÇÃO DO TREINAMENTO DOS TRIPULANTES OPERACIONAIS**. 2008. - CENTRO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR.

SANTOS, S.; PARRACA, J. A.; FERNANDES, O.; VILLAFAINA, S. *et al.* The Effect of Expertise during Simulated Flight Emergencies on the Autonomic Response and Operative Performance in Military Pilots. **Int J Environ Res Public Health**, 19, n. 15, Jul 27 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159141>

SHIN, K.; CHOI, H.-J.; PARK, S. Developing a Digital Twin and Extended Reality based Future Integrated Combat Training Platform under 5G. **Journal of Digital Contents Society**, 22, n. 4, p. 727-735, 2021. <https://doi.org/10.9728/dcs.2021.22.4.727>

SHIN, K.; LEE, H.; OH, J. Introduction to the Extended Reality-based LVCG Military Training System for Small Units at Korea Military Academy. 2021.

SILVA, A. C. **Uma Proposta de Camadas de Objetos de Interface para Realidade Virtual**. 2014. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

SILVA, A. C. **Uma Solução para Integração de Sistemas de Realidade Virtual e Tradicionais de Operação de Subestações de Energia Elétrica**. 2020. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

SILVA, R. C. **VIRTUAL SUBSTATION: Um sistema de Realidade Virtual para treinamento de operadores de subestações elétricas**. 2012. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

SOUZA, J. T. D. **JOGO SÉRIO BASEADO EM REALIDADE VIRTUAL PARA REABILITAÇÃO DE INDIVÍDUOS COM PARESIA DE MEMBRO SUPERIOR DECORRENTE DE ACIDENTE VASCULAR ENCEFÁLICO (AVE)**. 2019. - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia.

SPANGLER, D. P.; ALAM, S.; RAHMAN, S.; CRONE, J. *et al.* Multilevel Longitudinal Analysis of Shooting Performance as a Function of Stress and Cardiovascular Responses. **IEEE Transactions on Affective Computing**, 12, n. 3, p. 648-665, 2021. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2995769>

STRUNIAWSKI, J. Functional Assumptions for the “Helicopter Simulator for Police Aviation”. **Zeszyty Naukowe SGSP**, 82, p. 141-152, 2022. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8885>

SUDIARNO, A.; DEWI, R. S.; WIDYANINGRUM, R.; AKBAR, R. A. *et al.* Analysis of Human Performance and Potential Application of Virtual Reality (VR) Shooting Games as a Shooting Training Simulator for Military Personnel. **International Journal of Technology**, 15, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i1.5303>

TEODORO, P. N. B. **REALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE TREINAMENTO DE OPERADORES DE SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O FRAMEWORK 70-20-10, APOIADO POR REALIDADE VIRTUAL E KIRKPATRICK MODEL**. 2023. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

TORI, R. K., Claudio; Siscoutto, Robson. **Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada**. 2006. 85-7669-068-3.

TRINDADE, N. V.; FERREIRA, A.; PEREIRA, J. M. Beyond the Screen: Reshaping the Workplace with Virtual and Augmented Reality. 2023.

VASCONCELOS, D. F. P. D. **APRENDENDO COM TAREFAS: JOGO SÉRIO PARA AUXÍLIO NA ALFABETIZAÇÃO DE CRIANÇAS COM DEFICIÊNCIA INTELECTUAL**. 2018. - FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

VIDAKOVIC, J.; LAZAREVIC, M.; KVRGIC, V.; VASOVIC MAKSIMOVIC, I. *et al.* Flight Simulation Training Devices: Application, Classification, and Research. **International Journal of Aeronautical and Space Sciences**, 22, n. 4, p. 874-885, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42405-021-00358-y>

VILELA, H. F. G. G. **CRITÉRIOS DE UTILIZAÇÃO DA AERONAVE AS365 N2 EM EMERGÊNCIAS E OCORRÊNCIAS DE ALTA COMPLEXIDADE NO ESTADO DE MINAS GERAIS: Proposta de Emprego Operacional**. 2019. - CENTRO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO, ACADEMIA DE POLÍCIA MILITAR.

VREVOLVER. **Gunstock VREvolver MK1 V3**. 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=a38nQo0Vhnw>. Acesso em: 21 de setembro de 2024.

WIKIPÉDIA. **Serious game**. 2024. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Serious_game. Acesso em: 25 de Setembro de 2024.

XU, L.; LI, B.; XIE, W.; ZHANG, L. The Design and Implementation of Arrow Game Projection Interactive System Based on Deep Learning. *In: 2020 International Symposium on Autonomous Systems (ISAS)*, 2020, p. 163-167. DOI: 10.1109/isas49493.2020.9378835. <https://doi.org/10.1109/ISAS49493.2020.9378835>

ZOTOV, V.; KRAMKOWSKI, E. Moving-Target Intelligent Tutoring System for Marksmanship Training. **International Journal of Artificial Intelligence in Education**, 33, n. 4, p. 817-842, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40593-022-00308-z>

ANEXO A - QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO SIMULADOR DE REALIDADE VIRTUAL PARA TREINAMENTO DE TIRO EMBARCADO

Prezado Operador Aerotático,

Este questionário tem como objetivo coletar sua opinião e percepção sobre o simulador de realidade virtual para treinamento de tiro embarcado. Suas respostas são de extrema importância para aprimorar o desenvolvimento e a utilização da ferramenta. Agradecemos sua participação!

Informações Gerais:

1. **Tempo de experiência como Operador Aerotático:**
 - ☐ Menos de 1 ano
 - ☐ 1 a 3 anos
 - ☐ 3 a 5 anos
 - ☐ Mais de 5 anos
2. **Experiência prévia com simuladores de realidade virtual:**
 - ☐ Nenhuma
 - ☐ Pouca (1-5 vezes)
 - ☐ Moderada (6-10 vezes)
 - ☐ Extensa (mais de 10 vezes)
3. **Sexo:**
 - ☐ Masculino
 - ☐ Feminino
 - ☐ Não Declarar
4. **Idade:**

Usabilidade e Imersão do Usuário (ISO 9241-11 e ISO/IEC 25010):

1. **O simulador foi fácil de aprender e utilizar?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente
2. **A interface do simulador é intuitiva e fácil de navegar?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente

3. **As instruções e informações fornecidas pelo simulador são claras e suficientes?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente
4. **O simulador apresentou falhas ou erros durante o uso?**
 - ☐ Sim, frequentemente
 - ☐ Sim, ocasionalmente
 - ☐ Não
5. **Você se sentiu imerso(a) no ambiente virtual do simulador?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente
6. **O nível de realismo do simulador (gráficos, sons, movimentos) foi adequado?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente
7. **Você se sentiu confortável utilizando os dispositivos de controle do simulador?**
 - ☐ Discordo totalmente
 - ☐ Discordo parcialmente
 - ☐ Neutro
 - ☐ Concordo parcialmente
 - ☐ Concordo totalmente

Eficácia do Treinamento (ISO 20282-1):

1. **O simulador contribuiu para o desenvolvimento das suas habilidades de tiro embarcado?**
 - Discordo totalmente
 - Discordo parcialmente
 - Neutro
 - Concordo parcialmente
 - Concordo totalmente
2. **O simulador proporcionou uma experiência de aprendizado relevante para as suas atividades como Operador Aerotático?**
 - Discordo totalmente
 - Discordo parcialmente
 - Neutro
 - Concordo parcialmente
 - Concordo totalmente
3. **Você se sente mais preparado(a) para realizar operações de tiro embarcado após utilizar o simulador?**
 - Discordo totalmente
 - Discordo parcialmente
 - Neutro
 - Concordo parcialmente
 - Concordo totalmente
4. **O simulador o(a) ajudou a identificar pontos de melhoria nas suas habilidades de tiro embarcado?**
 - Discordo totalmente
 - Discordo parcialmente
 - Neutro
 - Concordo parcialmente
 - Concordo totalmente

Sugestões e Comentários:

1. **Você tem alguma sugestão para melhorar o simulador?**

[illegible]

2. Gostaria de acrescentar algum comentário sobre a sua experiência com o simulador?

[illegible]

**Agradecemos a sua
colaboração!**

ANEXO B – CÓDIGOS EM PYTHON PARA ANÁLISE ESTATÍSTICA

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Dados das 3 primeiras perguntas (usabilidade)
data = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'questao1': [3, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Facilidade de uso
    'questao2': [3, 5, 5, 5, 5, 3, 5, 5], # Intuitividade
    'questao3': [4, 4, 5, 5, 5, 3, 5, 5], # Clareza das instruções
}

df = pd.DataFrame(data)

# Cálculo da média e desvio padrão
mean_q1 = df['questao1'].mean()
std_q1 = df['questao1'].std()

mean_q2 = df['questao2'].mean()
std_q2 = df['questao2'].std()

mean_q3 = df['questao3'].mean()
std_q3 = df['questao3'].std()

print(f"Média da questão 1 (Facilidade de Uso): {mean_q1}, Desvio Padrão: {std_q1}")
print(f"Média da questão 2 (Intuitividade): {mean_q2}, Desvio Padrão: {std_q2}")
print(f"Média da questão 3 (Clareza das Instruções): {mean_q3}, Desvio Padrão: {std_q3}")

# Função para calcular o Alpha de Cronbach
def cronbach_alpha(df):
    item_vars = df.var(axis=0, ddof=1)
    total_var = df.sum(axis=1).var(ddof=1)
    n_items = df.shape[1]
    alpha = (n_items / (n_items - 1)) * (1 - item_vars.sum() / total_var)
    return alpha

# Calcular o Alpha de Cronbach para as 3 questões
alpha = cronbach_alpha(df[['questao1', 'questao2', 'questao3']])
print(f"Alpha de Cronbach (usabilidade): {alpha}")

# Plotagem dos gráficos
fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(15, 5))

# Gráficos para as questões
sns.barplot(x='OAT', y='questao1', data=df, ax=axes[0], color='blue')
```

```

axes[0].set_title('Facilidade de Uso')
axes[0].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao2', data=df, ax=axes[1], color='blue')
axes[1].set_title('Intuitividade')
axes[1].set_ylim(0, 5)

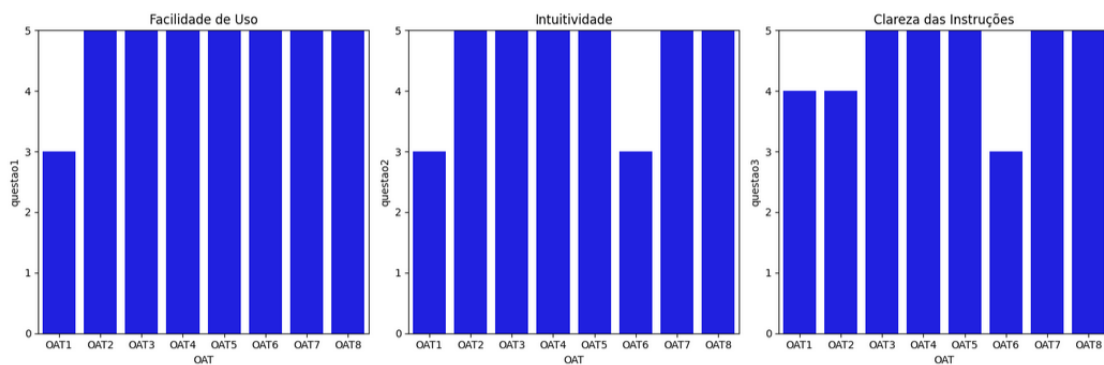
sns.barplot(x='OAT', y='questao3', data=df, ax=axes[2], color='blue')
axes[2].set_title('Clareza das Instruções')
axes[2].set_ylim(0, 5)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

Saída:

Média da questão 1 (Facilidade de Uso): 4.75, Desvio Padrão: 0.7071067811865476
 Média da questão 2 (Intuitividade): 4.5, Desvio Padrão: 0.9258200997725514
 Média da questão 3 (Clareza das Instruções): 4.5, Desvio Padrão: 0.7559289460184544
 Alpha de Cronbach (usabilidade): 0.8135593220338984



```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Dados das questões sobre imersão (questões 5, 6 e 7)
data_imersao = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'questao5': [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Imersão no ambiente
    'questao6': [4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Realismo do simulador
    'questao7': [2, 5, 4, 5, 5, 5, 5, 5], # Conforto com os controles
}

df_imersao = pd.DataFrame(data_imersao)

# Cálculo da média e desvio padrão
mean_q5 = df_imersao['questao5'].mean()
std_q5 = df_imersao['questao5'].std()

mean_q6 = df_imersao['questao6'].mean()
std_q6 = df_imersao['questao6'].std()

mean_q7 = df_imersao['questao7'].mean()
std_q7 = df_imersao['questao7'].std()

print(f"Média da questão 5 (Imersão): {mean_q5}, Desvio Padrão: {std_q5}")
print(f"Média da questão 6 (Realismo): {mean_q6}, Desvio Padrão: {std_q6}")
print(f"Média da questão 7 (Conforto com os controles): {mean_q7}, Desvio Padrão: {std_q7}")

# Função para calcular o Alpha de Cronbach
def cronbach_alpha(df):
    item_vars = df.var(axis=0, ddof=1)
    total_var = df.sum(axis=1).var(ddof=1)
    n_items = df.shape[1]
    alpha = (n_items / (n_items - 1)) * (1 - item_vars.sum() / total_var)
    return alpha

# Calcular o Alpha de Cronbach para as 3 questões sobre imersão
alpha_imersao = cronbach_alpha(df_imersao[['questao5', 'questao6', 'questao7']])
print(f"Alpha de Cronbach (imersão): {alpha_imersao}")

# Plotagem dos gráficos
fig, axes = plt.subplots(1, 3, figsize=(15, 5))

# Gráficos para as questões de imersão
sns.barplot(x='OAT', y='questao5', data=df_imersao, ax=axes[0], color='blue')
axes[0].set_title('Imersão no Ambiente Virtual')
axes[0].set_ylim(0, 5)

```

```

sns.barplot(x='OAT', y='questao6', data=df_imersao, ax=axes[1], color='blue')
axes[1].set_title('Realismo do Simulador')
axes[1].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao7', data=df_imersao, ax=axes[2], color='blue')
axes[2].set_title('Conforto com os Controles')
axes[2].set_ylim(0, 5)

plt.tight_layout()
plt.show()

```

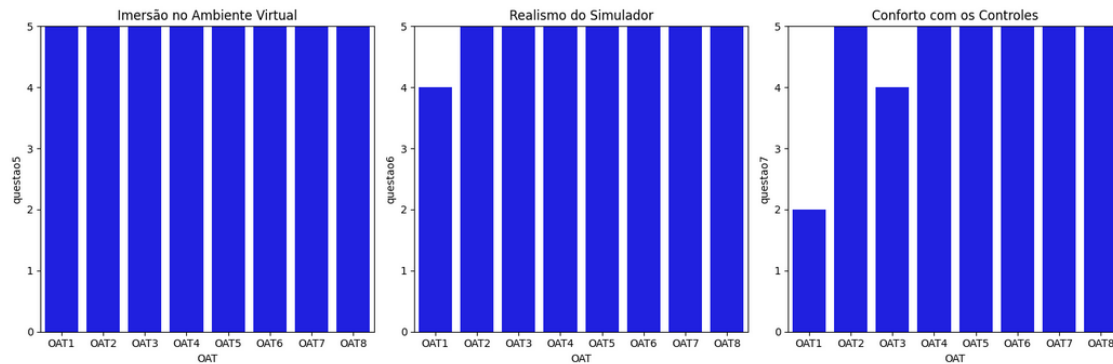
Saída:

Média da questão 5 (Imersão): 5.0, Desvio Padrão: 0.0

Média da questão 6 (Realismo): 4.875, Desvio Padrão: 0.3535533905932738

Média da questão 7 (Conforto com os controles): 4.5, Desvio Padrão:
1.0690449676496976

Alpha de Cronbach (imersão): 0.5405405405405407



```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Dados das questões sobre imersão (questões 6 e 7)
data_imersao = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    # 'questao5' removida
    'questao6': [4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Realismo do simulador
    'questao7': [2, 5, 4, 5, 5, 5, 5, 5], # Conforto com os controles
}

df_imersao = pd.DataFrame(data_imersao)

# Cálculo da média e desvio padrão
# mean_q5 removido
mean_q6 = df_imersao['questao6'].mean()
std_q6 = df_imersao['questao6'].std()

mean_q7 = df_imersao['questao7'].mean()
std_q7 = df_imersao['questao7'].std()

# Impressão das médias e desvios padrão
# print da questão 5 removido
print(f'Média da questão 6 (Realismo): {mean_q6}, Desvio Padrão: {std_q6}')
print(f'Média da questão 7 (Conforto com os controles): {mean_q7}, Desvio Padrão: {std_q7}')

# Função para calcular o Alpha de Cronbach
def cronbach_alpha(df):
    item_vars = df.var(axis=0, ddof=1)
    total_var = df.sum(axis=1).var(ddof=1)
    n_items = df.shape[1]
    alpha = (n_items / (n_items - 1)) * (1 - item_vars.sum() / total_var)
    return alpha

# Calcular o Alpha de Cronbach para as 2 questões sobre imersão
alpha_imersao = cronbach_alpha(df_imersao[['questao6', 'questao7']])
print(f'Alpha de Cronbach (imersão): {alpha_imersao}')

# Plotagem dos gráficos
fig, axes = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 5))

# Gráficos para as questões de imersão
sns.barplot(x='OAT', y='questao6', data=df_imersao, ax=axes[0], color='blue')
axes[0].set_title('Realismo do Simulador')
axes[0].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao7', data=df_imersao, ax=axes[1], color='blue')

```

```
axes[1].set_title('Conforto com os Controles')
axes[1].set_ylim(0, 5)

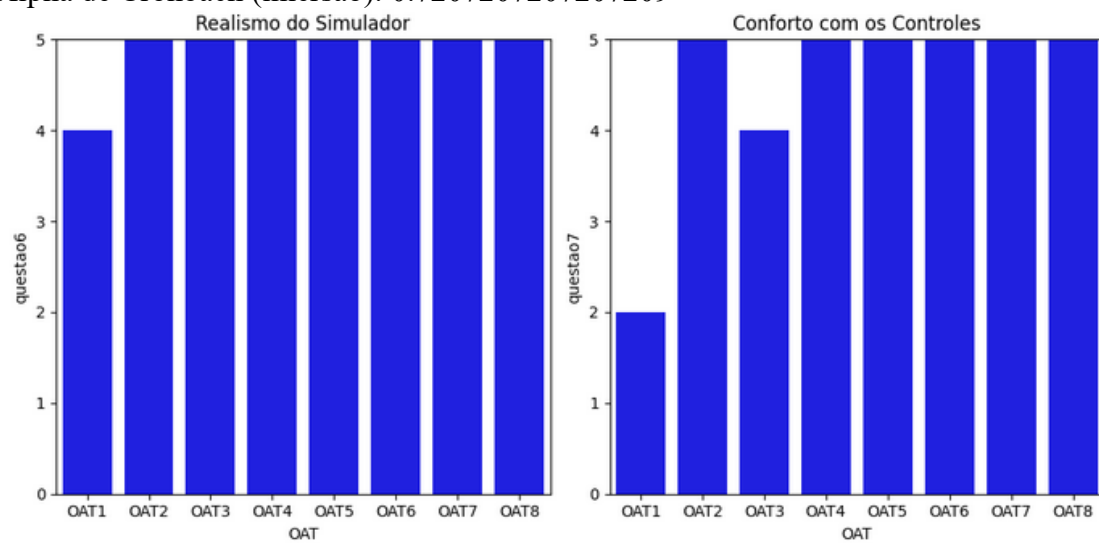
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Saída após purificação:

Média da questão 6 (Realismo): 4.875, Desvio Padrão: 0.3535533905932738

Média da questão 7 (Conforto com os controles): 4.5, Desvio Padrão: 1.0690449676496976

Alpha de Cronbach (imersão): 0.7207207207207209



```

import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.stats import pearsonr

# Dados de usabilidade (questões 1, 2 e 3)
data_usabilidade = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'questao1': [3, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Facilidade de uso
    'questao2': [3, 5, 5, 5, 5, 3, 5, 5], # Intuitividade
    'questao3': [4, 4, 5, 5, 5, 3, 5, 5], # Clareza das instruções
}

# Dados de imersão (questões 5, 6 e 7)
data_imersao = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'questao5': [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Imersão no ambiente
    'questao6': [4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Realismo do simulador
    'questao7': [2, 5, 4, 5, 5, 5, 5, 5], # Conforto com os controles
}

# Criar DataFrames
df_usabilidade = pd.DataFrame(data_usabilidade)
df_imersao = pd.DataFrame(data_imersao)

# Somar os valores de cada conjunto para obter um valor geral para usabilidade e imersão por OAT
df_usabilidade['usabilidade_total'] = df_usabilidade[['questao1', 'questao2', 'questao3']].sum(axis=1)
df_imersao['imersao_total'] = df_imersao[['questao5', 'questao6', 'questao7']].sum(axis=1)

# Calcular a correlação de Pearson entre usabilidade_total e imersao_total
correlacao, p_valor = pearsonr(df_usabilidade['usabilidade_total'], df_imersao['imersao_total'])

print(f"Correlação de Pearson entre Usabilidade e Imersão: {correlacao}")
print(f"Valor-p: {p_valor}")

# Interpretação do valor de correlação
if correlacao > 0.7:
    print("Correlação forte e positiva entre usabilidade e imersão.")
elif 0.3 < correlacao <= 0.7:
    print("Correlação moderada entre usabilidade e imersão.")
elif 0 < correlacao <= 0.3:
    print("Correlação fraca entre usabilidade e imersão.")
else:
    print("Não há correlação positiva entre usabilidade e imersão.")

```

Saída:

Correlação de Pearson entre Usabilidade e Imersão: 0.679634151986676

Valor-p: 0.06371592803989254

Correlação moderada entre usabilidade e imersão.


```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Dados de eficácia do treinamento
data_treinamento = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'questao1': [5, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Eficácia do treinamento
    'questao2': [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Experiência de aprendizado
    'questao3': [5, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5], # Preparação para operações
    'questao4': [5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5] # Identificação de melhorias
}

df = pd.DataFrame(data_treinamento)

# Cálculo da média e desvio padrão para cada questão
mean_q1 = df['questao1'].mean()
std_q1 = df['questao1'].std()

mean_q2 = df['questao2'].mean()
std_q2 = df['questao2'].std()

mean_q3 = df['questao3'].mean()
std_q3 = df['questao3'].std()

mean_q4 = df['questao4'].mean()
std_q4 = df['questao4'].std()

print(f'Média da questão 1 (Eficácia do Treinamento): {mean_q1}, Desvio Padrão: {std_q1}')
print(f'Média da questão 2 (Experiência de Aprendizado): {mean_q2}, Desvio Padrão: {std_q2}')
print(f'Média da questão 3 (Preparação para Operações): {mean_q3}, Desvio Padrão: {std_q3}')
print(f'Média da questão 4 (Identificação de Melhorias): {mean_q4}, Desvio Padrão: {std_q4}')

# Função para calcular o Alpha de Cronbach
def cronbach_alpha(df):
    item_vars = df.var(axis=0, ddof=1)
    total_var = df.sum(axis=1).var(ddof=1)
    n_items = df.shape[1]
    alpha = (n_items / (n_items - 1)) * (1 - item_vars.sum() / total_var)
    return alpha

# Calcular o Alpha de Cronbach para as questões de eficácia do treinamento
alpha = cronbach_alpha(df[['questao1', 'questao2', 'questao3', 'questao4']])
print(f'Alpha de Cronbach (Eficácia do Treinamento): {alpha}')

# Plotagem dos gráficos
fig, axes = plt.subplots(1, 4, figsize=(20, 5))

```

```
# Gráficos para as questões de eficácia do treinamento
sns.barplot(x='OAT', y='questao1', data=df, ax=axes[0], color='blue')
axes[0].set_title('Eficácia do Treinamento')
axes[0].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao2', data=df, ax=axes[1], color='blue')
axes[1].set_title('Experiência de Aprendizado')
axes[1].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao3', data=df, ax=axes[2], color='blue')
axes[2].set_title('Preparação para Operações')
axes[2].set_ylim(0, 5)

sns.barplot(x='OAT', y='questao4', data=df, ax=axes[3], color='blue')
axes[3].set_title('Identificação de Melhorias')
axes[3].set_ylim(0, 5)

plt.tight_layout()
plt.show()
```

Saída:

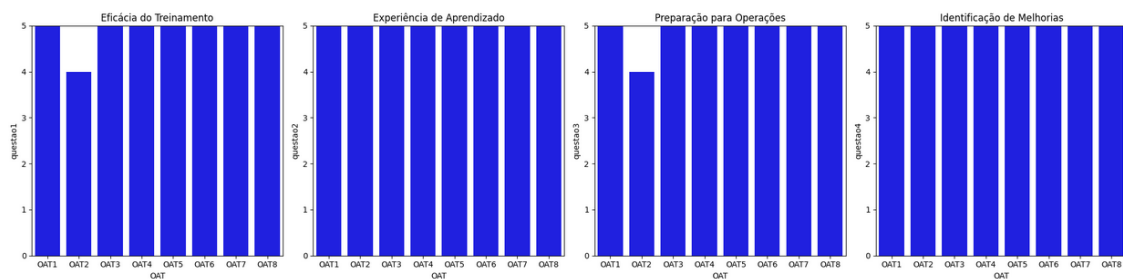
Média da questão 1 (Eficácia do Treinamento): 4.875, Desvio Padrão: 0.3535533905932738

Média da questão 2 (Experiência de Aprendizado): 5.0, Desvio Padrão: 0.0

Média da questão 3 (Preparação para Operações): 4.875, Desvio Padrão: 0.3535533905932738

Média da questão 4 (Identificação de Melhorias): 5.0, Desvio Padrão: 0.0

Alpha de Cronbach (Eficácia do Treinamento): 0.6666666666666666



```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Dados de acertos e tempos das duas rodadas
data = {
    'OAT': ['OAT1', 'OAT2', 'OAT3', 'OAT4', 'OAT5', 'OAT6', 'OAT7', 'OAT8'],
    'acertos_rodada_1': [7, 16, 7, 20, 20, 13, 12, 17],
    'tempo_rodada_1': ['04:27', '02:56', '05:05', '02:58', '01:20', '04:10', '05:36', '04:57'],
    'acertos_rodada_2': [8, 8, 7, 20, 20, 16, 20, 20],
    'tempo_rodada_2': ['04:19', '04:49', '04:59', '01:19', '01:15', '03:35', '03:27', '03:17']
}

df = pd.DataFrame(data)

# Adicionar "00:" antes dos tempos para ter o formato "hh:mm:ss"
df['tempo_rodada_1'] = "00:" + df['tempo_rodada_1']
df['tempo_rodada_2'] = "00:" + df['tempo_rodada_2']

# Converter tempos para segundos
df['tempo_rodada_1_seg'] = pd.to_timedelta(df['tempo_rodada_1']).dt.total_seconds()
df['tempo_rodada_2_seg'] = pd.to_timedelta(df['tempo_rodada_2']).dt.total_seconds()

# Cálculo da média e desvio padrão dos acertos nas duas rodadas
mean_acertos_rodada_1 = df['acertos_rodada_1'].mean()
std_acertos_rodada_1 = df['acertos_rodada_1'].std()

mean_acertos_rodada_2 = df['acertos_rodada_2'].mean()
std_acertos_rodada_2 = df['acertos_rodada_2'].std()

# Cálculo da média e desvio padrão do tempo nas duas rodadas
mean_tempo_rodada_1 = df['tempo_rodada_1_seg'].mean()
std_tempo_rodada_1 = df['tempo_rodada_1_seg'].std()

mean_tempo_rodada_2 = df['tempo_rodada_2_seg'].mean()
std_tempo_rodada_2 = df['tempo_rodada_2_seg'].std()

# Exibir resultados das médias e desvios padrões
print(f"Média dos acertos na rodada 1: {mean_acertos_rodada_1}, Desvio Padrão: {std_acertos_rodada_1}")
print(f"Média dos acertos na rodada 2: {mean_acertos_rodada_2}, Desvio Padrão: {std_acertos_rodada_2}")
print(f"Média do tempo na rodada 1 (segundos): {mean_tempo_rodada_1}, Desvio Padrão: {std_tempo_rodada_1}")
print(f"Média do tempo na rodada 2 (segundos): {mean_tempo_rodada_2}, Desvio Padrão: {std_tempo_rodada_2}")

# Plotando o gráfico de acertos nas duas rodadas

```

```
fig, ax = plt.subplots(1, 2, figsize=(15, 5))
```

```
# Gráfico de acertos
```

```
sns.barplot(x='OAT', y='acertos_rodada_1', data=df, ax=ax[0], color='blue', label="Rodada 1")
sns.barplot(x='OAT', y='acertos_rodada_2', data=df, ax=ax[0], color='green', label="Rodada 2",
alpha=0.7)
ax[0].set_title('Acertos nas Duas Rodadas')
ax[0].set_ylabel('Número de Acertos')
ax[0].legend()
```

```
# Gráfico de tempo de execução em segundos
```

```
sns.barplot(x='OAT', y='tempo_rodada_1_seg', data=df, ax=ax[1], color='blue', label="Rodada 1")
sns.barplot(x='OAT', y='tempo_rodada_2_seg', data=df, ax=ax[1], color='green', label="Rodada 2",
alpha=0.7)
ax[1].set_title('Tempo de Execução (Segundos)')
ax[1].set_ylabel('Tempo (segundos)')
ax[1].legend()
```

```
plt.tight_layout()
```

```
plt.show()
```

```
# Exibir a tabela de dados com a média e o desvio padrão
```

```
df[['OAT', 'acertos_rodada_1', 'tempo_rodada_1', 'acertos_rodada_2', 'tempo_rodada_2']]
```

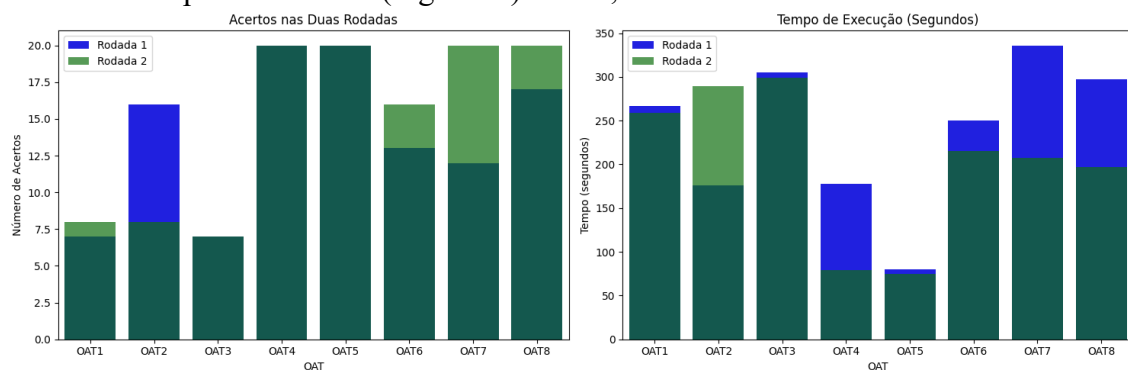
Saída:

Média dos acertos na rodada 1: 14.0, Desvio Padrão: 5.18238775634773

Média dos acertos na rodada 2: 14.875, Desvio Padrão: 6.128096884724607

Média do tempo na rodada 1 (segundos): 236.125, Desvio Padrão: 85.30522928201496

Média do tempo na rodada 2 (segundos): 202.5, Desvio Padrão: 85.94184079946159



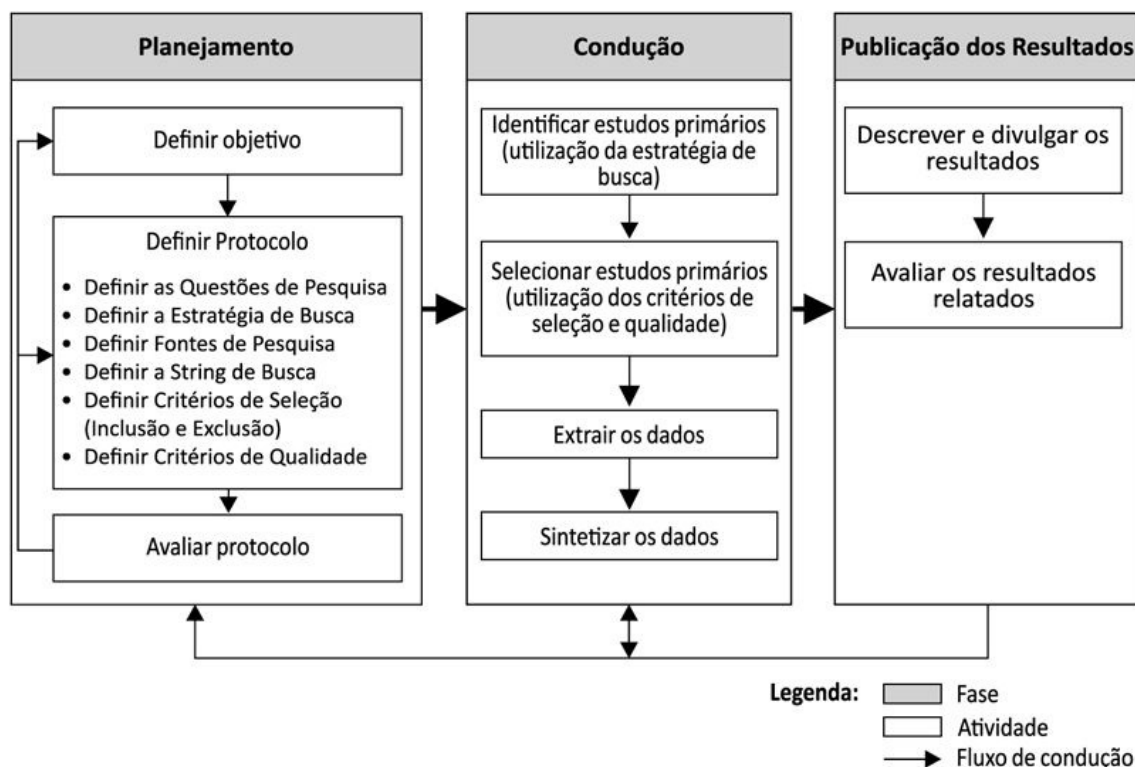
	OAT	acertos_rodada_1	tempo_rodada_1	acertos_rodada_2	tempo_rodada_2
0	OAT1	7	00:04:27	8	00:04:19
1	OAT2	16	00:02:56	8	00:04:49
2	OAT3	7	00:05:05	7	00:04:59
3	OAT4	20	00:02:58	20	00:01:19
4	OAT5	20	00:01:20	20	00:01:15
5	OAT6	13	00:04:10	16	00:03:35
6	OAT7	12	00:05:36	20	00:03:27
7	OAT8	17	00:04:57	20	00:03:17

ANEXO C – DIRETRIZES E CONDUÇÃO DA RS

DIRETRIZES DA RS

Os autores (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017) instruem que o processo de condução de uma Revisão Sistemática (RS) envolve três fases principais: planejamento, condução e publicação dos resultados. O planejamento inclui a definição do protocolo da revisão, que detalha as questões de pesquisa, estratégia de busca, critérios de seleção e avaliação dos estudos. A fase de condução abrange a identificação, seleção e avaliação dos estudos, além da extração e síntese dos dados. Por fim, a fase de publicação consiste na divulgação dos resultados da RS por meio de diferentes formatos, como artigos, relatórios ou capítulos de livros. A Figura A demonstra as fases e atividades do processo de uma RS.

Figura A – Fases e atividades da RS.



Fonte: (FELIZARDO; NAKAGAWA; FABBRI; FERRARI, 2017)

CONDUÇÃO

Após a execução da busca sistemática nas bases de dados selecionadas, seguindo as estratégias detalhadas no protocolo, um total de 1859 estudos potencialmente

relevantes foram identificados. Após uma triagem inicial baseada em títulos e resumos, 68 estudos foram selecionados para leitura completa. Aplicando rigorosamente os critérios de inclusão e exclusão, e considerando a avaliação da qualidade metodológica de cada estudo, chegamos à seleção final de 49 estudos primários que compõem o corpus desta Revisão Sistemática. Estes estudos, detalhadamente resumidos na Tabela A, fornecem as evidências que sustentarão a análise e discussão dos resultados desta pesquisa.

Tabela A – Tabela resumo de seleção estudos primários.

String de busca	Motor busca	Critérios	Quantidade inicial	Leitura completa	Seleção final
((("virtual reality" OR "simulation" OR "training") AND ("police" OR "military" OR "shot" OR "shooting range") AND ("helicopter" OR "aircraft"))	Capes café https://www-periodicos-capes.gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php?	Revisado por pares; 2019-2024; Artigos; Exclui repetidos	625	6	5
("virtual reality") AND ("shooting range")	Google scholar https://scholar.google.com/	Desde 2020 disponível para download Exclui repetidos	281	40	35
("virtual reality") AND ("serious game")	Repositório institucional da Universidade Federal de Uberlândia https://repositorio.ufu.br/?locale=pt_BR	Produzido pela faculdade de Engenharia Elétrica FEELT	792	13	5
("simulador") AND ("tiro") AND ("Realidade virtual") AND ("Realidade aumentada") AND ("Helicóptero")	biblioteca virtual Capitão Geraldo Walter da Cunha da PMMG https://philos.sophia.com.br/terminal/9383/	Após 2019	161	9	4
TOTAL			1859	68	49

Fonte: produzido pelo autor

Para a fase de extração de dados e seleção final dos estudos, utilizamos a Tabela B estruturada para sintetizar os resultados obtidos. Nesta tabela, registramos as seguintes informações para cada estudo: referência do estudo, ano de publicação, motor de busca utilizado para sua localização, se o estudo envolvia alguma tecnologia de realidade estendida (XR), como simuladores, realidade virtual ou aumentada, e se abordava algum tipo de treinamento e, finalmente, a decisão de inclusão ou exclusão do estudo na revisão sistemática.

Tabela B – Resumo de estudos para seleção final para extração de dados

Referência	Motor busca	XR	Treinamento	Incluído
(VIDAKOVIC; LAZAREVIC; KVRGIC; VASOVIC MAKSIMOVIC <i>et al.</i> , 2021)	Capes	✓	✓	✓
(STRUNIAWSKI, 2022)	Capes	✓	✓	✓
(NI; ZHANG; ZHAO; CHEN <i>et al.</i> , 2022)	Capes	✓	✓	✓
(HSU; SHU; LIU; WANG, 2022)	Capes	✗	✗	✗
(SANTOS; PARRACA; FERNANDES; VILLAFAINA <i>et al.</i> , 2022)	Capes	✓	✓	✓
(BROWN; HICKS; RINAUDO; BURCH, 2021)	Capes	✓	✗	✓
(EYBERS; GERBER, 2021)	Scholar	✓	✓	✗
(MUNOZ; QUINTERO; STEPHENS; POPE, 2020)	Scholar	✓	✓	✓
(PRATIHER; SAHOO; ACHARYA; RADHAKRISHNAN <i>et al.</i> , 2022)	Scholar	✓	✓	✓
(MATTILA, 2021)	Scholar	✓	✗	✓
(GRECH; SACCO, 2020)	Scholar	✓	✓	✓
(SUDIARNO; DEWI; WIDYANINGRUM; AKBAR <i>et al.</i> , 2024)	Scholar	✓	✓	✓
(ALSAEED, 2020)	Scholar	✓	✓	✓
(FONSECA; HEIM; HOUSER; COOK <i>et al.</i> , 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(MARTONO; NURHAYATIL; WULWIDA, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(TRINDADE; FERREIRA; PEREIRA, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(GAO; ZHANG, 2023)	Scholar	✓	✗	✓
(DAHLEN-LERVAG, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(KANKAANPÄÄ, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(SHIN; CHOI; PARK, 2021)	Scholar	✓	✓	✓
(JOESSEL, 2022)	Scholar	✓	✗	✓
(BASOGLU; SERBETCIOGLU; CELIK; DEMIRHAN, 2022)	Scholar	✓	✗	✓
(EGOROV, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(AALTOLA, 2021)	Scholar	✓	✓	✗
(NISSAN; LEANDER, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(HIWAT, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(KLEYGREWE, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(KVALNES, 2021)	Scholar	✓	✗	✓
(SHIN; LEE; OH, 2021)	Scholar	✓	✓	✓
(KINBERG, 2022)	Scholar	✓	✓	✓
(ARMAS DE ARMAS, 2020)	Scholar	✓	✓	✓
(MENG; ALBERT, 2022)	Scholar	✓	✗	✓
(ZOTOV; KRAMKOWSKI, 2022)	Scholar	✓	✓	✓
(SPANGLER; ALAM; RAHMAN; CRONE <i>et al.</i> , 2021)	Scholar	✓	✗	✓
(P. GRAY-MASON; J. COULTAS; TECE BAYRAK, 2021)	Scholar	✓	✗	✓
(GIRARDI; PEREIRA FILHO; TEODORO; DE OLIVEIRA, 2022)	Scholar	✓	✓	✓
(MEMETOV, 2023)	Scholar	✓	✓	✗

(NITKIEWICZ; ZAREMBA; TYTUŁA, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(XU; LI; XIE; ZHANG, 2020)	Scholar	✓	✗	✗
(GRABOWSKI; BERESKA; PROBIERZ; GAŁUSZKA, 2024)	Scholar	✓	✓	✓
(KU; HYUN; LEE, 2022)	Scholar	✓	✗	✓
(DE ARMAS; TORI; NETTO, 2019)	Scholar	✓	✓	✓
(KENT, 2020)	Scholar	✓	✓	✓
(ALOTAIBI, 2023)	Scholar	✓	✓	✓
(JURÁNEK, 2021)	Scholar	✓	✗	✗
(BULANOV; ZAKHAROV; SERGIO; LEBEDEV, 2021)	Scholar	✓	✓	✓
(VASCONCELOS, 2018)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(DIAS, 2014)	Repositório UFU	✓	✓	✓
(MARTIN, 2022)	Repositório UFU	✓	✓	✓
(SOUZA, 2019)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(MARQUES, 2019)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(MELO, 2021)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(TEODORO, 2023)	Repositório UFU	✓	✓	✓
(MARTIN, 2019)	Repositório UFU	✓	✓	✓
(NOGUEIRA, 2015)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(CARNEIRO, 2023)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(SILVA, 2014)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(SILVA, 2020)	Repositório UFU	✓	✗	✗
(SILVA, 2012)	Repositório UFU	✓	✓	✓
(FERREIRA, 2022)	Biblioteca PMMG	✗	✗	✗
(VILELA, 2019)	Biblioteca PMMG	✗	✗	✗
(COELHO, 2018)	Biblioteca PMMG	✗	✗	✗
(SAMPAIO, 2008)	Biblioteca PMMG	✗	✓	✓
(OLIVEIRA, T. V. D., 2020)	Biblioteca PMMG	✗	✗	✗
(FERREIRA, 2024)	Biblioteca PMMG	✗	✓	✓
(JUNIOR, 2024)	Biblioteca PMMG	✓	✗	✓
(ASSIS, 2019)	Biblioteca PMMG	✓	✓	✓
(OLIVEIRA, D. F., 2020)	Biblioteca PMMG	✗	✗	✗

Fonte: Produzido pelo autor

Para a exclusão de artigos na etapa de seleção de estudos para início da extração de dados, foram aplicados critérios específicos da avaliação da qualidade dos estudos definidos no protocolo. O artigo da CAPES, de autoria de (HSU; SHU; LIU; WANG, 2022) foi excluído por sua abordagem voltada ao gerenciamento de riscos. Este trabalho se mostrou mais teórico em relação à segurança de voo e simuladores, distanciando-se das funcionalidades específicas que eram o foco da pesquisa. No que concerne à busca realizada no *Google Scholar*, o artigo de (EYBERS; GERBER, 2021) foi excluído por não se enquadrar nos critérios da pesquisa. Embora relevante, o estudo investigava mecanismos de enfrentamento emocional durante a pandemia da COVID-19, com foco no treinamento esportivo virtual, e não nas simulações propriamente ditas, que constituíam o objeto central de nossa investigação.

No motor de busca Scholar, outros artigos também foram excluídos por não se alinharem ao escopo da pesquisa. O trabalho de (AALTOLA, 2021), por exemplo, concentra-se em *Cyber Range*, desviando-se do foco principal. Já o estudo de (MEMETOV, 2023) realiza uma análise biomecânica voltada para a área da saúde, enquanto (XU; LI; XIE; ZHANG, 2020) exploram o reconhecimento de padrões com Inteligência Artificial (IA), sem focar na VR em si. Por fim, o artigo de (JURÁNEK, 2021) embora aborde o desenvolvimento em VR, detalha o conjunto de ferramentas utilizadas, com ênfase no *XR interaction toolkit* (XRIT) disponível no *Unity*, distanciando-se do tema central da pesquisa.

Apesar do reconhecido valor dos estudos realizados pelos pesquisadores da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU no campo da realidade estendida, treinamento e jogos sérios, alguns deles não foram selecionados para a presente pesquisa. A principal razão reside na natureza específica de suas investigações, como as de (VASCONCELOS, 2018), (SOUZA, 2019), (MARQUES, 2019), (MELO, 2021), (NOGUEIRA, 2015), (CARNEIRO, 2023), que se concentram na intersecção entre saúde e RV, abordando temas como reabilitação, tratamento e educação. Da mesma forma, os estudos de (SILVA, 2014), (SILVA, 2020), embora relevantes, se dedicam primordialmente às teorias da RV. Nosso estudo atual, contudo, exige uma abordagem mais direcionada à aplicação prática da RV em contextos específicos, com ênfase na implementação e avaliação de soluções. Embora valorizemos o embasamento teórico proporcionado por esses estudos, nossa busca se concentra em trabalhos que explorem a utilização concreta da RV em treinamentos práticos, seus desafios e resultados tangíveis.

Embora os estudos dos autores (FERREIRA, 2022), (VILELA, 2019), (COELHO, 2018), (OLIVEIRA, T. V. D., 2020) e (OLIVEIRA, D. F., 2020), pesquisadores da Polícia Militar de Minas Gerais, não tenham sido selecionados para esta pesquisa específica, devido ao seu foco na área administrativa do COMAVE, em vez da utilização de realidade virtual e treinamento com helicópteros, que é o cerne de nossa investigação, reconhecemos a importância de suas contribuições. Suas pesquisas na área administrativa e doutrinária do COMAVE fornecem um contexto valioso para entender os desafios e oportunidades na implementação de novas tecnologias, como a realidade virtual, no treinamento de pilotos de helicóptero. A compreensão dos aspectos administrativos e doutrinários, em conjunto com a pesquisa sobre realidade virtual, pode levar a um programa de treinamento mais eficaz e abrangente, que atenda às necessidades operacionais da Polícia Militar de Minas Gerais e garanta a segurança e a eficiência de suas operações aéreas.

Portanto, apesar de não estarem diretamente alinhados com o foco desta pesquisa, os estudos são valiosos para o desenvolvimento de um programa de treinamento completo e bem-sucedido, que integre tanto os aspectos tecnológicos quanto os administrativos e doutrinários do COMAVE.