

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Gabriel Firme Rodrigues

**COMPARAÇÃO DE INTERFACES DE SIMULAÇÃO
APLICÁVEIS AO SIMULADOR DE ESTABILIDADE
VARIÁVEL DO IPEV**

Trabalho de Graduação
2025

Curso de Engenharia Aeronáutica

Gabriel Firme Rodrigues

**COMPARAÇÃO DE INTERFACES DE SIMULAÇÃO
APLICÁVEIS AO SIMULADOR DE ESTABILIDADE
VARIÁVEL DO IPEV**

Orientador

Prof. Lucas Oliveira Barbacovi (ITA)

Coorientador

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

ENGENHERIA AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

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

Rodrigues, Gabriel Firme
Comparação de interfaces de simulação aplicáveis ao Simulador de Estabilidade Variável do IPEV / Gabriel Firme Rodrigues.
São José dos Campos, 2025.
59f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2025. Orientador: Prof. Lucas Oliveira Barbacovi. Coorientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira.

1. Simulador de Voo. 2. IPEV. 3. Campo Visual. 4. Realidade Virtual. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, Gabriel Firme. **Comparação de interfaces de simulação aplicáveis ao Simulador de Estabilidade Variável do IPEV** . 2025. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Firme Rodrigues

TÍTULO DO TRABALHO: Comparação de interfaces de simulação aplicáveis ao Simulador de Estabilidade Variável do IPEV .

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2025

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Gabriel Firme Rodrigues
Rua H8B, Ap. 235
12.228-462 – São José dos Campos–SP

COMPARAÇÃO DE INTERFACES DE SIMULAÇÃO APLICÁVEIS AO SIMULADOR DE ESTABILIDADE VARIÁVEL DO IPEV

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Gabriel Firme Rodrigues

Autor

Lucas Oliveira Barbacovi (ITA)

Orientador

Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Coorientador

São José dos Campos, 07 de novembro de 2025.

A Deus, pela orientação constante e pelas bênçãos concedidas ao longo desta jornada. À minha família, pelo apoio inabalável, pelo carinho e pela dedicação durante toda a minha formação acadêmica. E à minha namorada, Carina, cujo apoio e companheirismo foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar cada passo do meu caminho, estar presente nos momentos de incerteza e ser o alicerce que sustenta os valores mais profundos da minha vida.

À minha família, por todo o amor e apoio que me deram desde os primeiros sonhos, passando pelo cursinho e por cada desafio enfrentado ao longo da graduação.

À minha namorada, Carina, pelo carinho constante, pela paciência nos momentos difíceis e por estar ao meu lado durante toda essa caminhada.

E ao professor Christopher, por sua confiança, leveza e compreensão, que tornaram possível a construção deste trabalho com liberdade e tranquilidade, em um momento decisivo da minha trajetória.

*“Confia no Senhor de todo o teu coração, e não te estribes no teu próprio entendimento.
Reconhece-o em todos os teus caminhos, e ele endireitará as tuas veredas.”*

— PROVÉRBIOS 3:5-6

Resumo

Simuladores de voo desempenham um papel fundamental no treinamento de pilotos da Força Aérea Brasileira, permitindo a realização de missões complexas em ambiente controlado, com alta segurança, menor custo operacional e significativa flexibilidade. Dentro desse contexto, o aprimoramento dos sistemas visuais é essencial para aumentar a representatividade das condições reais de voo. Com os avanços recentes em tecnologias de realidade virtual e realidade mista, surgem novas possibilidades para ampliar o campo de visão e a imersão dos pilotos, aspectos que são especialmente relevantes em simulações sem plataforma de movimento físico.

Este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar diferentes interfaces de simulação aplicáveis ao simulador de estabilidade variável do Instituto de Pesquisa e Ensaios em Voo (IPEV), considerando o potencial de cada tecnologia para aprimorar a percepção visual do piloto e aumentar a fidelidade da experiência simulada. A metodologia adotada inclui uma revisão técnico-bibliográfica sobre soluções imersivas como head-mounted displays (VR e MR), domos de projeção e sistemas visuais alternativos, com a definição de critérios qualitativos e quantitativos para análise comparativa.

Abstract

Flight simulators play a key role in the training of pilots of the Brazilian Air Force, enabling the execution of complex missions in a controlled environment, with high safety, lower operational costs, and significant flexibility. In this context, enhancing visual systems is essential to increase the representativeness of real flight conditions. With recent advances in virtual and mixed reality technologies, new possibilities have emerged for expanding the pilot's field of view and level of immersion — aspects that are especially relevant in simulations that lack physical motion platforms.

This work aims to evaluate and compare different simulation interfaces applicable to the Variable Stability Simulator at the Institute for Flight Test Research (IPEV), considering the potential of each technology to improve visual perception and the overall fidelity of the simulated experience. The adopted methodology includes a technical literature review on immersive solutions such as head-mounted displays (VR and MR), dome projection systems, and alternative visual interfaces, followed by the definition of qualitative and quantitative criteria for comparative analysis.

Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Disposição vertical dos monitores do SEV.(MORO, 2022)	17
FIGURA 1.2 – Disposição horizontal dos monitores do SEV.(MORO, 2022)	17
FIGURA 1.3 – Campo visual resultante do SEV.(MORO, 2022)	18
FIGURA 1.4 – Sistema visual e cabine.(MORO, 2022)	18
FIGURA 1.5 – Sala do simulador.(MORO, 2022)	19
FIGURA 1.6 – Requisito campo de visão externo do piloto.(MORO, 2022)	20
FIGURA 1.7 – Ampliação de campo visual.(MORO, 2022)	20
FIGURA 2.1 – Simulador em domo do CIAvEx, Taubaté-SP.(WILTGEN, 2021) . . .	24
FIGURA 2.2 – Tela inicial do X-Plane 11.(TechTudo, 2017)	26
FIGURA 2.3 – Tela de configuração de novo voo no X-Plane 12.(X-PLANE12, 2025b)	27
FIGURA 2.4 – McDonnell Douglas F-4C Phantom II at the National Museum of the United States Air Force.(FORCE, 2025)	28
FIGURA 2.5 – Helicóptero Sikorsky S-76.(LOCKHEED, 2025)	29
FIGURA 2.6 – Diagrama do campo de visão do helicóptero H-34.(SOUZA; SCAR- PARI, 2012)	31
FIGURA 2.7 – Graus CH atribuídos na realização de tarefas de pilotagem sem e com restrição de campo visual do piloto. (GOLD; DRYFOOS, 1993) .	33
FIGURA 4.1 – FSTD H125 da Loft Dynamics na Heli Expo Air Show 2022. (HELI- COPTERS, 2025)	39
FIGURA 4.2 – Óculos VR XTAL 8K da VRgineers	43
FIGURA 4.3 – Realização das Análises no XTAL 8K do IPEV	43
FIGURA 4.4 – Visualização do Sistema de Telas (Atual).	44
FIGURA 4.5 – Comparação Esquemática das Interfaces de Telas e VR.	45

FIGURA 4.6 – Visualização do Sistema de Telas (Atual).	46
FIGURA 4.7 – Comparação Esquemática das Interfaces de Telas e VR.	47
FIGURA 4.8 – Óculos VR XTAL 3 da VRgineers	48
FIGURA 4.9 – Óculos MR XTAL 3 NEO da VRgineers	49
FIGURA A.1 –Visão Central no F-4 Phantom II	54
FIGURA A.2 –Visão Central do lado esquerdo do <i>cockpit</i> no Sikorsky S-76C	54
FIGURA A.3 –Visão Central do lado direito do <i>cockpit</i> no Sikorsky S-76C	55
FIGURA A.4 –Vista 1	55
FIGURA A.5 –Vista 2	56
FIGURA A.6 –Vista 3	56
FIGURA A.7 –Vista 4	57
FIGURA A.8 –Vista 5	57
FIGURA A.9 –Vista 1	58
FIGURA A.10 –Vista 2	58
FIGURA A.11 –Vista 3	59
FIGURA A.12 –Vista 4	59

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Especificações técnicas do F-4C (dados do National Museum of the USAF)(FORCE, 2025)	28
TABELA 2.2 – Especificações resumidas do S-76 (dados Lockheed Martin)(LOCKHEED, 2025)	29
TABELA 4.1 – Comparativo de alternativas de sistema visual (MORO, 2022)	41
TABELA 4.2 – Resumo Comparativo	47
TABELA 4.3 – Comparativo de headsets VR/MR	49

Lista de Abreviaturas e Siglas

FAB	Força Aérea Brasileira
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
IPEV	Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo
VR	Realidade Virtual
MS	Realidade Mista
FoV	Campo de Visão (Field of View)
FoR	Quadro de Observação (Frame of Regard)
FAA	Administração Federal de Aviação dos EUA (Federal Aviation Administration)
EASA	European Union Aviation Safety Agency
ICAO	International Civil Aviation Organization
FSTD	Flight Simulation Training Device
HMD	Head Mounted Display
IPD	Interpupillary Distance
FFS	Full Flight Simulator
GNSS	Global Navigation Satellite System

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	15
1.2	Motivação do Trabalho	16
1.2.1	Importância da Representatividade Visual em Simuladores	16
1.2.2	Sistema Visual Atual do Simulador do IPEV	16
1.2.3	Limitações e Oportunidades de Aprimoramento	19
1.3	Organização do trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Conceitos	22
2.1.1	Realidade Virtual	22
2.1.2	Realidade Mista	22
2.1.3	Interface Visual por Projeção em Domo	23
2.1.4	FNPT II (Flight and Navigation Procedures Trainer II)	24
2.1.5	FTD 3 (Flight Training Device — Nível 3)	25
2.1.6	X-Plane 11	25
2.1.7	X-Plane 12	26
2.1.8	F-4 Phantom II	27
2.1.9	McDonnell Douglas F-4 Phantom II	27
2.1.10	Sikorsky S-76C	28
2.2	Requisitos de Campos de Visão na Cabine	29
2.3	Impacto de Restrição de Campo de Visão no Desempenho de Pilotagem	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34

3.1	Materiais e Ferramentas Utilizadas	34
3.2	Metodologia	35
4	RESULTADOS	37
4.1	Levantamento Teórico e Proposição de Critérios	37
4.1.1	EASA (Europa)	37
4.1.2	FAA/FAR (Estados Unidos)	38
4.1.3	ICAO (Referência Global)	38
4.1.4	Consolidação recente de requisitos para VR/MR em FSTDs	38
4.1.5	Requisitos Técnicos do IPEV	40
4.2	Aplicação Prática e Análise Comparativa com o XTAL 8K	42
4.2.1	Campo Visual no F-4 Phantom II	44
4.2.2	Campo Visual no Sikorsky S-76C	45
4.2.3	Discussões	47
4.3	Consolidação da Análise e Proposições	48
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A – OUTPUT DAS INTERFACES VISUAIS	54
A.1	Sistema de Telas com X-Plane 11	54
A.2	Óculos VR XTAL 8K com X-Plane 12	55
A.2.1	Vistas no F-4 Phantom II	55
A.2.2	Vistas no Sikorsky S-76C	58

1 Introdução

1.1 Objetivo

Objetivo Geral

Avaliar e comparar diferentes interfaces de simulação, incluindo tecnologias de realidade virtual e realidade mista, aplicáveis ao simulador de estabilidade variável do IPEV, com o propósito de ampliar o campo visual e aprimorar a representatividade do voo tanto para aeronaves de asas rotativas quanto de asa fixa.

Objetivos Específicos

- Descrever as características e limitações do sistema visual atualmente utilizado no simulador.
- Identificar as exigências operacionais específicas de simulações com aeronaves de asas rotativas, especialmente em manobras próximas ao solo.
- Selecionar e caracterizar tecnologias alternativas de interface visual, como head-mounted displays, domos de projeção e sistemas imersivos.
- Propor critérios quantitativos e qualitativos para a comparação entre as diferentes interfaces.
- Analisar os benefícios e restrições de cada alternativa em relação à aplicação no contexto do IPEV.

1.2 Motivação do Trabalho

1.2.1 Importância da Representatividade Visual em Simuladores

Simuladores de voo exercem um papel essencial na formação e capacitação de pilotos da Força Aérea Brasileira. Eles permitem a execução de missões complexas em um ambiente seguro e controlado, além de reduzirem significativamente os custos e riscos associados ao treinamento em aeronaves reais. Um dos aspectos mais relevantes para a fidelidade da simulação é o sistema visual, responsável por fornecer ao piloto as referências externas que orientam sua percepção espacial, navegação e controle da aeronave.

Com os avanços recentes em tecnologias imersivas, como realidade virtual e realidade mista, surgem novas possibilidades para expandir o campo de visão e a sensação de imersão dentro do ambiente simulado. Essas inovações têm potencial para tornar a experiência mais próxima do voo real, especialmente em simuladores que não contam com plataformas de movimento físico — situação na qual o sistema visual se torna a principal fonte de percepção sensorial do piloto.

1.2.2 Sistema Visual Atual do Simulador do IPEV

O presente trabalho toma como base o simulador de estabilidade variável do Instituto de Pesquisa e Ensaios em Voo, utilizado tanto em atividades de pesquisa quanto em apoio ao treinamento de pilotos. O sistema visual atual desse simulador é composto por cinco monitores de 80 polegadas, posicionados verticalmente e justapostos com uma abertura total de 151° . Essa configuração resulta em um campo de visão de 147° na horizontal e 45° na vertical, considerando as limitações impostas pela estrutura da cabine de pilotagem. As Figuras 1.1, 1.2 e 1.3 representam, respectivamente, esquematicamente, a disposição no plano vertical, a disposição horizontal dos monitores que integram o sistema, e o campo visual resultante com as obstruções advindas da cabine de pilotagem.

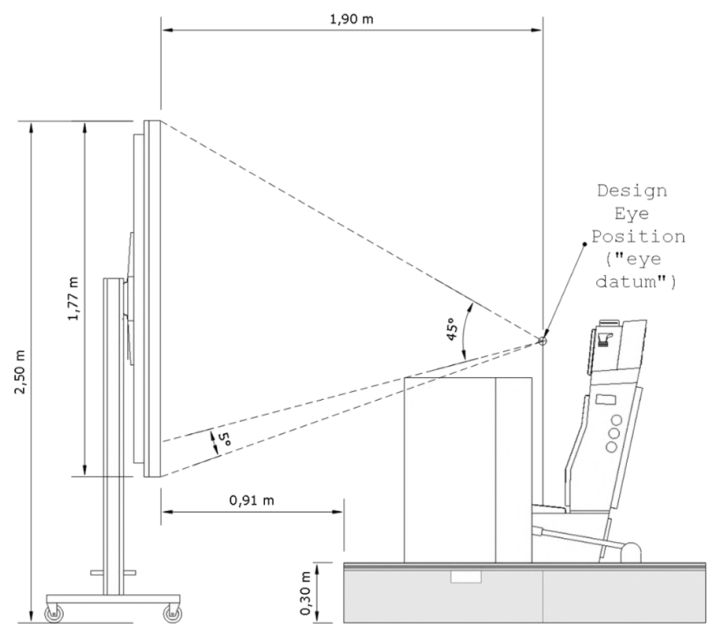


FIGURA 1.1 – Disposição vertical dos monitores do SEV.(MORO, 2022)

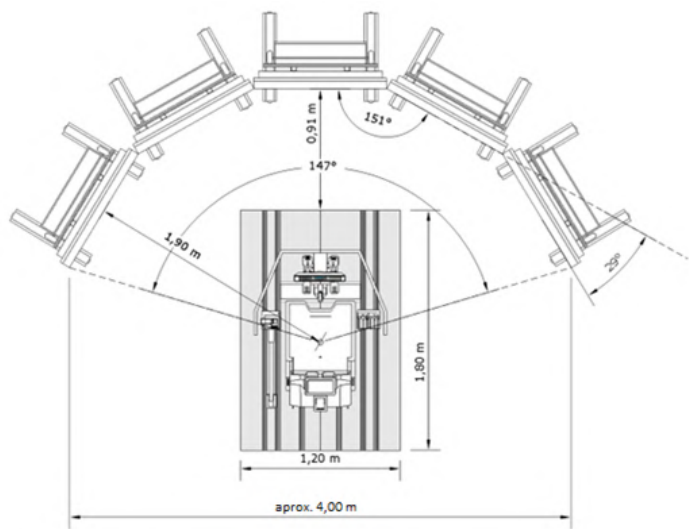


FIGURA 1.2 – Disposição horizontal dos monitores do SEV.(MORO, 2022)

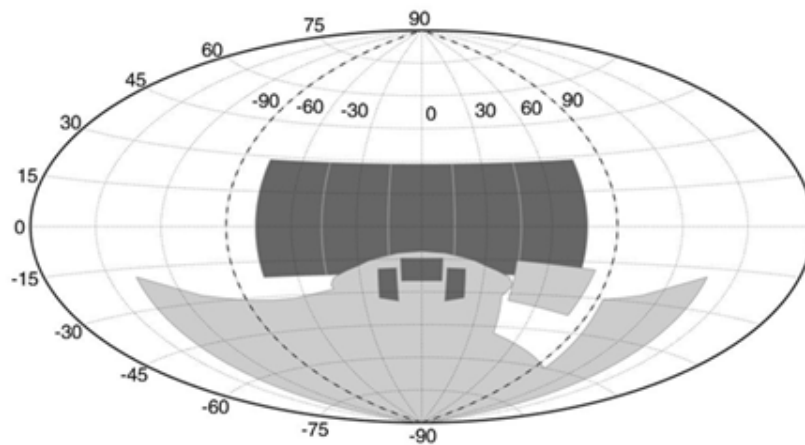


FIGURA 1.3 – Campo visual resultante do SEV.(MORO, 2022)

As imagens apresentadas no sistema visual são geradas por um computador dedicado, que utiliza o software X-Plane 11 para renderizar os cenários externos, aeronaves e ambientes de simulação. A disposição dos monitores visa fornecer uma visão frontal ampla ao piloto, sendo adequada para a maioria das simulações com aeronaves de asa fixa. As figuras 1.4 e 1.5 representam, respectivamente, uma imagem renderizada do simulador com seu sistema visual ativo, e um desenho esquemático em planta da sala do simulador.



FIGURA 1.4 – Sistema visual e cabine.(MORO, 2022)

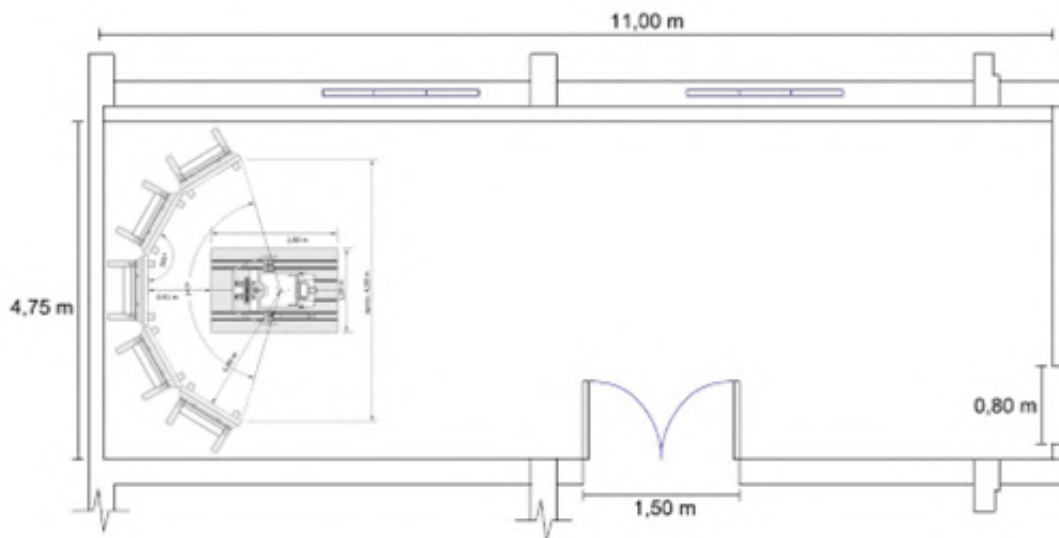


FIGURA 1.5 – Sala do simulador.(MORO, 2022)

1.2.3 Limitações e Oportunidades de Aprimoramento

Apesar da configuração atual oferecer um campo visual considerável, ela apresenta limitações importantes, especialmente em manobras que exigem alta percepção espacial próxima ao solo. Isso é particularmente evidente no caso de aeronaves de asas rotativas, como helicópteros, cujos perfis de voo envolvem deslocamentos laterais, aproximações verticais e operações pairadas. Nesses cenários, os pilotos frequentemente utilizam janelas laterais e inferiores (como a chamada “bolha”) para obter referências visuais essenciais, como percepção de velocidade de deslocamento, obstáculos próximos e altura em relação ao solo.

Em voos reais, os pilotos contam também com estímulos sensoriais de movimento que auxiliam no controle da aeronave. Em simuladores estáticos, essa ausência de sensação física torna o sistema visual ainda mais crítico: qualquer restrição adicional no campo de visão pode comprometer seriamente a precisão e a representatividade da experiência simulada. Dados obtidos em contextos similares demonstram que limitações visuais resultam em maior dispersão nos desempenhos dos pilotos e aumentam significativamente a dificuldade de pilotagem.

Nesse contexto, este trabalho busca investigar alternativas tecnológicas que permitam ampliar o campo de visão disponível no simulador. Estima-se que a abertura horizontal ideal para uma simulação mais realista seja de, no mínimo, 180° . Em termos verticais, é desejável que o campo de visão atinja, na região central ($\pm 30^\circ$ horizontal), um ângulo de $+30^\circ$ para cima e -15° para baixo, enquanto nas regiões laterais o campo vertical ideal deve se estender de $+30^\circ$ a -45° . As figuras 1.6 e 1.7 representam a disposição esquemática em planta do campo estimadamente desejado, e seu respectivo campo visual resultante.

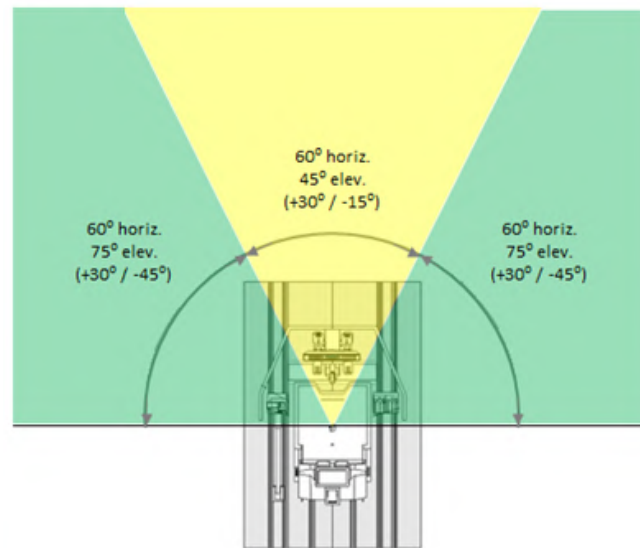


FIGURA 1.6 – Requisito campo de visão externo do piloto.(MORO, 2022)

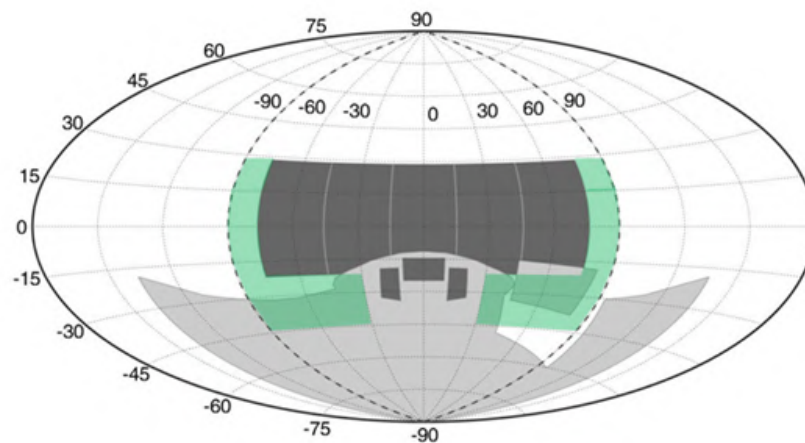


FIGURA 1.7 – Ampliação de campo visual.(MORO, 2022)

A adoção de tecnologias como head-mounted displays (VR e MR) e sistemas de projeção em domo surge como uma oportunidade para alcançar esses parâmetros, ampliando significativamente a representatividade visual e a qualidade do treinamento proporcionado pelo simulador.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta a motivação e o contexto do estudo, destacando a importância dos simuladores de voo no treinamento de pilotos e os desafios rela-

cionados à representatividade visual. Também são estabelecidos os objetivos geral e específicos do trabalho.

- **Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:** reúne o referencial teórico sobre os diferentes tipos de interfaces visuais utilizadas em simuladores, com ênfase em tecnologias como realidade virtual, realidade mista, domos de projeção e demais soluções imersivas aplicáveis ao contexto do simulador de estabilidade variável.
- **Capítulo 3 – Materiais e Métodos:** descreve os recursos materiais utilizados no estudo, incluindo hardware e software, bem como a metodologia adotada para a análise comparativa entre as interfaces, dividida em duas etapas principais: levantamento técnico e aplicação prática.
- **Capítulo 4 – Resultados:** apresenta os dados obtidos com base na aplicação dos critérios definidos, além da comparação entre as diferentes soluções analisadas, discutindo os principais achados do estudo.
- **Capítulo 5 – Conclusão:** sintetiza as principais contribuições do trabalho, discute suas limitações e apresenta sugestões para trabalhos futuros relacionados à evolução de ambientes imersivos em simulação de voo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Conceitos

2.1.1 Realidade Virtual

A realidade virtual (VR) situa-se no extremo do reality-virtuality continuum de Milgram e Kishino (1994), no qual todos os estímulos provenientes do ambiente físico são substituídos por informações geradas computacionalmente, criando um espaço inteiramente sintético que envolve o usuário em 360 graus . Burdea e Coiffet (2003) complementam essa visão ao definir VR como um sistema interativo em tempo real que combina displays tridimensionais de alta taxa de atualização, rastreamento preciso de movimentos e feedback multissensorial (visual, auditivo e tátil), de modo a alinhar continuamente o ponto de vista virtual às ações do usuário, sustentando a sensação de presença .

Slater (2009) aprofunda o conceito ao destacar que o valor da VR reside em produzir duas ilusões fundamentais: *place illusion* (estar fisicamente presente em outro local) e *plausibility* (acreditar que os eventos virtuais são reais). Quando ambas são atendidas, o comportamento do usuário dentro do ambiente digital tende a replicar reações do mundo real, requisito essencial para aplicações de treinamento de voo que exigem respostas motoras e cognitivas autênticas . Esses três marcos conceituais fornecem a base para avaliar o grau de imersão, interação e realismo das interfaces visuais analisadas ao longo desta revisão.

2.1.2 Realidade Mista

Milgram e Kishino (1994) introduziram o termo *mixed reality* (MR) ao descrever o reality-virtuality continuum, no qual MR corresponde às regiões intermediárias em que objetos virtuais e físicos coexistem e são visualizados em tempo real dentro do mesmo espaço perceptivo . No extremo “*augmentado*” desse contínuo, Azuma (1997) define a experiência como “qualquer sistema que combine, em registro correto, elementos sintéticos tridimensionais com o ambiente real, funcionando interativamente e em tempo real” .

Dois requisitos destacam-se nessas definições: (i) registro espacial preciso — virtual e real devem manter alinhamento geográfico e temporal — e (ii) interação bidirecional — o usuário pode observar, manipular e receber feedback imediato dos elementos híbridos.

Avanços recentes detalhados por Billinghamurst *et al.* (2015) mostram que a eficácia de MR depende da convergência de quatro pilares: exibição óptica de alta transparência, rastreamento robusto (posicional e de orientação), processamento gráfico de baixa latência e modelos de interação naturais (voz, gesto, controle háptico) . Quando esses fatores se combinam, a MR fornece uma ilusão convincente de “presença expandida”, em que o usuário experiencia o mundo físico enriquecido por sobreposições digitais que respondem de forma coerente às suas ações — característica que a torna particularmente atrativa para aplicações de treinamento de voo, inspeção ou manutenção, onde é crucial manter a percepção do cockpit real enquanto se visualizam instruções ou cenários sintéticos.

2.1.3 Interface Visual por Projeção em Domo

A projeção em domo tornou-se o padrão de referência para simuladores que exigem campo de visão (FoV) extremamente amplo e continuidade visual sem molduras. Estudos conduzidos pela *Working Group 10* da AGARD, compilados no relatório da NASA TM-81278, já destacavam em 1981 que sistemas esféricos multi-canal eram os únicos capazes de oferecer cobertura horizontal superior a 200° e vertical acima de 80° , garantindo que o envelope de movimentos da cabeça do piloto permanecesse sempre dentro da área projetada (STATLER, 1981). O grupo também estabeleceu métricas de fidelidade — luminância, contraste e distorção geométrica — que ainda hoje balizam a qualificação de visual systems em simuladores de nível D.

Na indústria atual, fornecedores como a Canadian Aviation Electronics (CAE), reconhecida como a maior fornecedora mundial de tecnologias de simulação, integram domos “mosaic” parciais ou completos, compatíveis com bases fixas ou plataformas de movimento. Esses sistemas atingem *fields-of-view* de até $220^\circ \times 80^\circ$ com resolução 4K por canal, usando seis a doze projetores a laser combinados por *edge-blending* automático. A CAE ressalta que os domos são especialmente indicados para treinamento de helicópteros, missões táticas e reabastecimento em voo, quando a consciência situacional periférica é crítica (INC., 2025). A geometria esférica reduz erros de colimação ocular e mantém a distância aparente da cena praticamente infinita, minimizando fadiga de foco durante sessões prolongadas.

Evoluções recentes focam redução de custo e footprint. O sistema SEER da TREALITY SVS, por exemplo, oferece mini-domos de 1,5 m a 2,5 m de raio com FoV até $360^\circ \times 120^\circ$, projetores laser sólidos, alinhamento automático (*AutoAlign*) e compatibilidade NVG, estando mais de 250 unidades em operação mundialmente (SYSTEMS, 2023). Esses

domos compactos permitem instalação lado a lado para treinamento em rede, diminuindo requisitos de sala e simplificando manutenção. Para o simulador de estabilidade variável do IPEV, domos desse porte poderiam satisfazer o requisito de $FoV \geq 180^\circ$ horizontal e $\geq 75^\circ$ vertical, oferecendo continuidade visual nas regiões laterais e inferior (“bolha”) sem obrigar o uso de HMDs — fator relevante quando se deseja interação com o cockpit físico real.

A figura 2.1 mostra o simulador de voo do Centro de Instrução de Aviação do Exército (CIAvEx) em Taubaté-SP. Tal simulador utiliza da projeção em domo para constituir sua interface visual.



FIGURA 2.1 – Simulador em domo do CIAvEx, Taubaté-SP.(WILTGEN, 2021)

2.1.4 FNPT II (Flight and Navigation Procedures Trainer II)

O FNPT II é um dispositivo de treinamento de voo voltado ao ensino e à prática de navegação e procedimentos, com maior fidelidade e escopo operacional do que o FNPT I. Na regulamentação europeia, enquadra-se como um FSTD de nível intermediário, destinado a treinar procedimentos IFR e VFR, gerenciamento de cabine, emprego de radioajudas e execução de perfis de voo padronizados em um ambiente sintético controlado. Em geral, apresenta cockpit representativo, instrumentação funcional coerente com o tipo de aeronave simulada, base visual compatível com as tarefas previstas e lógica de sistemas

suficiente para suportar o treinamento de navegação, comunicações e procedimentos normais e anormais.

Do ponto de vista pedagógico e regulatório, o FNPT II permite ganho de proficiência em tarefas que não exigem a fidelidade completa de dinâmica, *motion* e colimação de um FFS, mas demandam consistência procedimental, integração de sistemas e realismo suficiente para avaliação de desempenho. É comum seu emprego em escolas e centros de instrução para horas creditáveis de instrumentos, prática de aproximações por instrumentos, uso de GNSS e rádio navegação, bem como treinamento de procedimentos anormais. Em programas recentes com HMD/VR, a autoridade pode impor condições especiais adicionais de integração visual, alinhamento com o cockpit físico e métricas de desempenho temporal quando a interface escolhida for um visor montado na cabeça.

2.1.5 FTD 3 (Flight Training Device — Nível 3)

O FTD 3 é um dispositivo de treinamento de voo com fidelidade técnica superior à de treinadores de procedimentos, voltado à reprodução detalhada de sistemas de aeronave, respostas de controles, ambiente de voo e cenários operacionais, embora sem atingir a completude de um FFS. No enquadramento europeu, o nível 3 requer uma representação ampla e coerente dos sistemas, modelagem adequada de desempenho e handling em regimes de operação relevantes ao treinamento, além de um sistema visual com campo de visão, resolução e desempenho temporal compatíveis com as tarefas de instrução e avaliação previstas para o nível.

Operacionalmente, o FTD 3 é empregado para qualificação e manutenção de proficiência em procedimentos normais, anormais e de emergência, execução de checklists, gerenciamento de falhas e treinamento orientado a tarefas específicas do tipo de aeronave. Em helicópteros, por exemplo, pode abranger perfis de aproximação, decolagem e manobras em baixa altura que exigem percepção espacial e referências visuais consistentes. Quando equipado com HMD/VR, a aceitação pela autoridade pode incluir requisitos objetivos adicionais (como verificação de latência de rastreamento da cabeça, resolução angular efetiva e estabilidade de alinhamento entre o mundo virtual e o cockpit físico), preservando a equivalência de segurança e eficácia de treinamento esperadas para o nível 3.

2.1.6 X-Plane 11

X-Plane 11 é um simulador de voo multiplataforma desenvolvido pela Laminar Research. O programa utiliza a *blade-element theory*, método que decompõe cada superfície aerodinâmica em múltiplos elementos e calcula, em tempo real, as forças e momentos

gerados, permitindo que novos modelos concebidos no *Plane-Maker* sejam simulados sem ajustes empíricos. A plataforma fornece cenário global padrão, motor gráfico HDR compatível com Vulkan/Metal, suporte a plug-ins em C/C++ ou Python e ferramentas de customização de aeronaves e aeroportos, características que a tornam valiosa para pesquisa, instrução IFR/VFR e ensaios de procedimentos (X-PLANE, 2025a).

Para uso profissional, a licença *X-Plane 11 Professional* habilita recursos exigidos em processos de qualificação FAA 14 CFR §60, como verificação automática de taxa de quadros, projeção multi-canal e suporte a hardware certificado, possibilitando a montagem de FTDs e BATDs de baixo custo (X-PLANE, 2025b). A partir da atualização 11.20, o simulador passou a oferecer suporte nativo à realidade virtual, compatível com dispositivos HTC Vive, Oculus Rift, Windows MR e Valve Index, com rastreamento posicional completo e painéis 3-D manipuláveis por controladores hápticos.



FIGURA 2.2 – Tela inicial do X-Plane 11.(TechTudo, 2017)

2.1.7 X-Plane 12

Lançado em 2022, o X-Plane 12 representa uma atualização profunda em relação à versão 11, com foco especial em realismo atmosférico e qualidade gráfica. O novo motor meteorológico introduz nuvens volumétricas em 3-D, microburst, turbulência de esteira, acúmulo dinâmico de neve / gelo e variação sazonal de vegetação e solo, oferecendo um ambiente visual muito mais próximo do observado em voo real (X-PLANE12, 2025a). Para sustentar essa riqueza de efeitos, o simulador adota um *photometric renderer* em HDR de 16 bits, no qual todas as fontes de luz são calibradas em unidades físicas de luminância; essa mudança elimina artefatos de iluminação da geração anterior e garante consistência entre céu, aeronaves e iluminação aeroportuária (SUPNIK, 2021). Complementam essas

melhorias um conjunto de aeronaves padrão redesenhadas, novo motor de som e efeitos, jetways móveis, interface de usuário remodelada e cenários globais recortados com dados de terreno atualizados (X-PLANE12, 2022).

Do ponto de vista de treinamento, o X-Plane 12 traz um modelo aerodinâmico refinado (revisão de forças viscosas e transônicas, novos coeficientes de Reynolds), física de trem de pouso com inércia de roda e frenagem ABS, e um sistema ATC inteiramente reescrito, capaz de operações IFR e VFR controladas por voz. A edição *Professional* mantém compatibilidade com protocolos de qualificação FAA §60, oferecendo funções de warping / blending para projeção esférica e verificação automática de taxa de quadros (X-PLANE12, 2022). Esses avanços tornam a plataforma especialmente adequada para estudos acadêmicos de dinâmica de voo, desenvolvimento de procedimentos e integração a ambientes de realidade virtual de alta fidelidade, suprimindo demandas de simuladores que necessitam de cenários meteorológicos realistas e iluminação física coerente em domos ou HMDs.

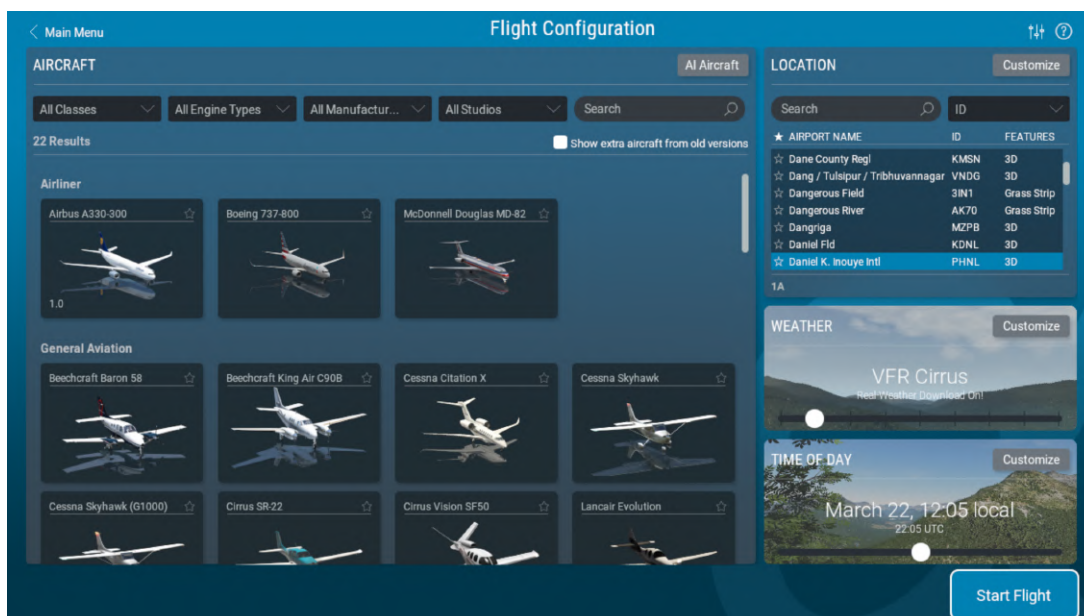


FIGURA 2.3 – Tela de configuração de novo voo no X-Plane 12.(X-PLANE12, 2025b)

2.1.8 F-4 Phantom II

2.1.9 McDonnell Douglas F-4 Phantom II

O *McDonnell Douglas F-4 Phantom II* é um caça-bombardeiro bimotor, biposto e todo-tempo que entrou em serviço operacional em 1960, servindo extensivamente nas forças navais e aéreas dos EUA e de mais de dez nações aliadas. Projetado originalmente como interceptador embarcado de longo alcance, o F-4 demonstrou versatilidade ao estabelecer recordes mundiais de velocidade, altitude e razão de subida e ao assumir funções de superioridade aérea, ataque ao solo e reconhecimento ao longo da Guerra do Vietnã

e da Guerra Fria. Entre 1958 e 1979 foram produzidos 5 195 exemplares. O quadro abaixo resume as principais características da variante F-4C, conforme dados do National Museum of the United States Air Force(FORCE, 2025).

TABELA 2.1 – Especificações técnicas do F-4C (dados do National Museum of the USAF)(FORCE, 2025)

Motores	2 × GE J79-GE-15, 17 000 lbf (pós-comb.) cada
Velocidade máxima	1 400 mph (2 253 km/h)
Velocidade de cruzeiro	590 mph (950 km/h)
Alcance	1 750 mi (2 816 km)
Teto operacional	59 600 ft (18 170 m)
Envergadura	38 ft 5 in (11,70 m)
Comprimento	58 ft 2 in (17,73 m)
Altura	16 ft 6 in (5,03 m)
Peso carregado	58 000 lb (26 308 kg)
Armamento externo	Até 16 000 lb (7 257 kg)



FIGURA 2.4 – McDonnell Douglas F-4C Phantom II at the National Museum of the United States Air Force.(FORCE, 2025)

2.1.10 Sikorsky S-76C

O *Sikorsky S-76* é um helicóptero biturbina médio, amplamente empregado em transporte executivo, offshore e missões de busca e salvamento. Desde sua certificação, em 1978, a família S-76 acumula mais de 7,5 milhões de horas de voo, atendendo operadores em mais de 40 países. A Lockheed Martin, atual controladora da Sikorsky, destaca

a versatilidade da aeronave, capaz de acomodar até 12 passageiros em cabine pressurizada e dotada de sistemas avançados de aviônicos, rotor de quatro pás e trem de pouso retrátil, assegurando desempenho robusto e conforto em missões civis e governamentais (LOCKHEED, 2025).

TABELA 2.2 – Especificações resumidas do S-76 (dados Lockheed Martin)(LOCKHEED, 2025)

Capacidade	12 passageiros + 2 pilotos
Peso máximo de decolagem	11 700 lb (5 307 kg)
Velocidade de cruzeiro	155 kt (287 km/h)
Alcance máximo	411 nmi (761 km)
Teto de serviço	15 000 ft (4 572 m)



FIGURA 2.5 – Helicóptero Sikorsky S-76.(LOCKHEED, 2025)

2.2 Requisitos de Campos de Visão na Cabine

O campo de visão exterior constitui um elemento de informação decisivo para a integração piloto–aeronave em todas as fases do voo. Segundo a apostila *Avaliação de Cabine* (BH-18 TEV) do Curso de Ensaios em Voo do IPEV, essa avaliação deve ser iniciada ainda na fase de maquete, quando há margem para alterar a geometria estrutural — alargar arcos, reduzir montantes, abaixar o painel de instrumentos ou acrescentar vigias inferiores (“bolhas”) — de modo a preservar referências visuais críticas (SOUZA; SCARPARI, 2012). A presença antecipada de equipamentos operacionais (HUD, escopo radar, visor de tiro) na maquete é imprescindível, pois tais sistemas frequentemente degradam o campo de visão

quando instalados tardiamente. O manual recomenda, ainda, posicionar a maquete nas atitudes de pouso e decolagem para projetar no solo o diagrama de visibilidade e verificar obstáculos de visão frontal, inferior e lateral.

As exigências variam conforme a missão: caças diurnos e todo-tempo devem manter campos equivalentes; plataformas de ataque necessitam cobertura extremamente ampla; helicópteros requerem visão frontal, lateral e inferior para compensar ângulos de aproximação muito variáveis; aviões de transporte precisam de janelas laterais adequadas a taxi e curvas no solo; e aeronaves de instrução devem garantir ao instrutor, no assento traseiro, rápida visualização para correções em pouso e formatura. O documento salienta que reflexos em canopis e para-brisas — originados pela iluminação interna ou por faróis externos, especialmente em operações noturnas sobre áreas urbanas — podem comprometer a percepção visual, devendo ser verificados em voo real ou simulado. Esses pontos reforçam a necessidade, no simulador de estabilidade variável do IPEV, de um sistema visual que ofereça campo horizontal superior a 180° e vertical capaz de cobrir a região inferior (“bolha”), assegurando que pilotos de asas rotativas disponham das mesmas cues ópticas críticas observadas em operação real. A figura 2.6 representa a influência da cabine nas restrições de campo visual do piloto. Nesse exemplo é um caso do helicóptero H-34.

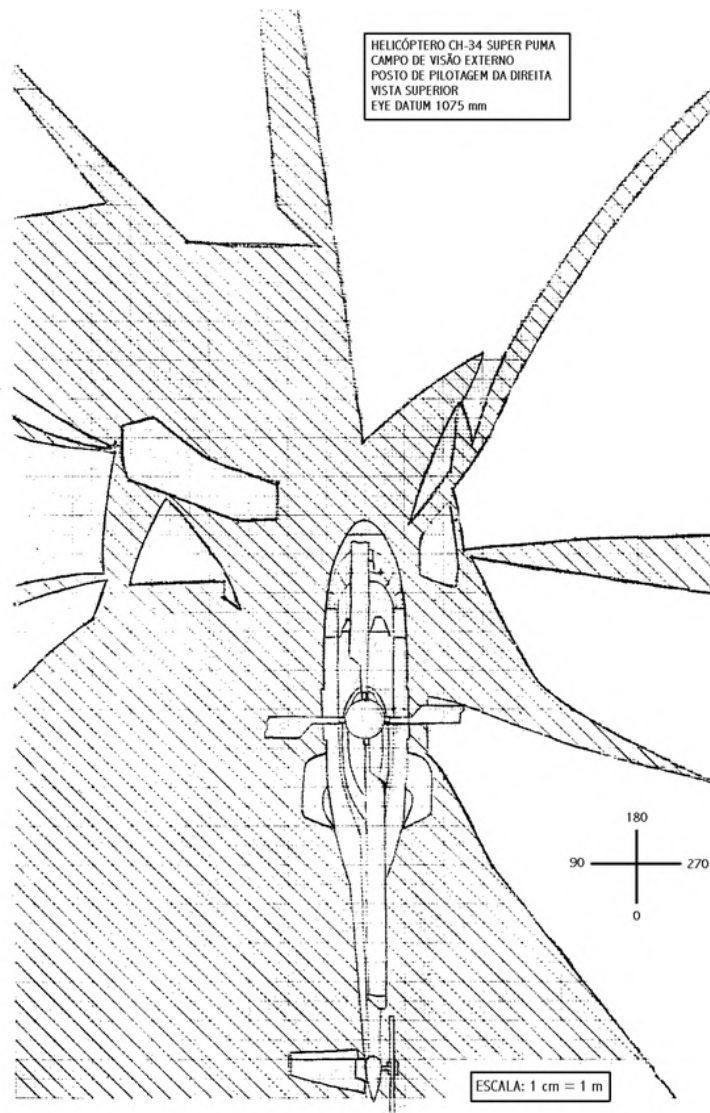


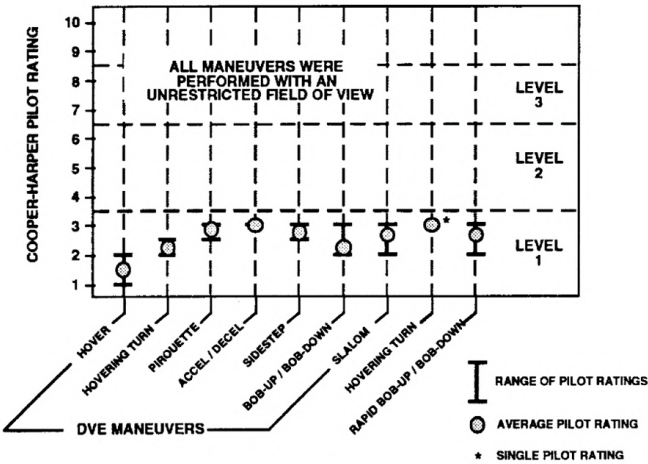
FIGURA 2.6 – Diagrama do campo de visão do helicóptero H-34.(SOUZA; SCARPARI, 2012)

2.3 Impacto de Restrição de Campo de Visão no Desempenho de Pilotagem

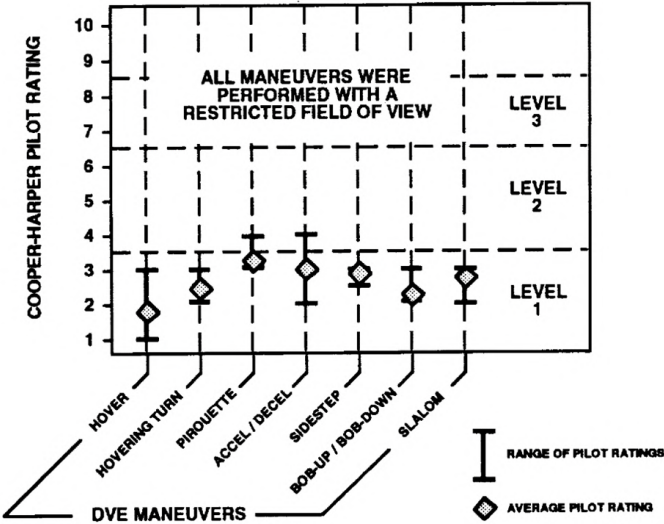
O estudo de Gold e Dryfoos (1993) examinou o controle do helicóptero RAH-66 Comanche em ambiente simulado, avaliando 7 tarefas do padrão ADS-33C sob duas condições visuais: *field-of-view* irrestrito (RFOV-OFF) e restrito (*restricted FOV* – RFOV-ON), que reproduz a máscara de um *helmet-mounted display*. As Figuras 2.7a e 2.7b mostram a dispersão das *Handling Qualities Ratings* (HQR) de Cooper–Harper obtidas para cada tarefa. Embora as médias tenham permanecido em **Level 1** em ambas as condições, a dispersão aumentou sensivelmente com RFOV-ON: tarefas como *sidestep* e *pirouette* apresentaram HQR 6–7 (limite de Level 2) em alguns voos, enquanto no cenário aberto as mesmas manobras ficavam tipicamente entre 2 e 4. A análise de *Usable Cue Environment*

(UCE) confirmou essa degradação: UCE passou de 1 (boa riqueza de pista visual) para valores entre 2 e 3, indicando necessidade de maior estabilização da aeronave para manter desempenho equivalente.

Os autores atribuem o aumento de variabilidade a (i) eliminação da visão periférica, que força o piloto a movimentar a cabeça e faz perder referências durante manobras laterais, e (ii) dependência maior de simbologia HMD para compensar falta de textura externa. Na prática, a restrição visual elevou a carga de trabalho – sobretudo em tarefas de deslocamento lateral, hover de precisão e pirueta – e demandou modos de controle suplementares (Velocity Stabilization, Altitude Hold) para retornar ao patamar de *Level 1*. Esses resultados sustentam a motivação do presente trabalho: ampliar o campo de visão no simulador de estabilidade variável do IPEV para reduzir variabilidade de trajetória e carga de trabalho em operações de baixa altura, especialmente para helicópteros que dependem fortemente de cues laterais e inferiores.



(a) Avaliação com irrestrrição de campo visual.(GOLD; DRYFOOS, 1993)



(b) Avaliação com restrição de campo visual. (GOLD; DRYFOOS, 1993)

FIGURA 2.7 – Graus CH atribuídos na realização de tarefas de pilotagem sem e com restrição de campo visual do piloto. (GOLD; DRYFOOS, 1993)

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais e Ferramentas Utilizadas

A seguir, são descritos os principais materiais e ferramentas que serão empregados na condução deste trabalho, com foco na avaliação de interfaces de simulação integradas ao simulador de estabilidade variável do IPEV.

- **Óculos de Realidade Virtual XTAL 8K:** dispositivo head-mounted display de alta performance recém-adquirido pelo IPEV, ainda em fase de integração ao simulador. Possui resolução de 3840×2160 pixels por olho, campo de visão horizontal de até 180° , rastreamento ocular de alta frequência (até 210 Hz), e compatibilidade com plataformas profissionais de simulação e rastreamento de movimento. Seu uso viabiliza a análise de interfaces imersivas aplicáveis a simulações com elevado realismo visual.
- **Plataforma computacional do simulador:** conjunto de computadores de alto desempenho pertencente ao simulador de estabilidade variável, responsável pelo processamento da simulação e pela interface com os dispositivos visuais. Esta plataforma será utilizada para rodar os softwares de simulação e controlar a integração com o óculos de realidade virtual.
- **Software de simulação X-Plane 11:** versão utilizada atualmente no simulador do IPEV para a geração de imagens nas telas que compõem o sistema visual tradicional. O X-Plane 11 é um software de simulação de voo amplamente empregado em ambientes acadêmicos e de treinamento, com suporte a múltiplas visualizações e cenários customizáveis para diferentes tipos de aeronaves.
- **Software de simulação X-Plane 12:** versão mais recente da plataforma de simulação, que será utilizada em conjunto com o óculos XTAL 8K. O X-Plane 12 apresenta melhorias significativas em relação à versão anterior, incluindo modelo atmosférico aprimorado, simulação física mais precisa e suporte nativo a realidade virtual com maior fidelidade visual. Essa versão será essencial para a condução dos testes com a nova interface imersiva.

- **SteamVR:** ferramenta intermediária utilizada para permitir a comunicação entre o X-Plane 12 e o XTAL 8K. A plataforma SteamVR atua como camada de compatibilidade entre o software de simulação e o dispositivo de realidade virtual, viabilizando o uso em ambiente imersivo.

3.2 Metodologia

A metodologia deste trabalho será dividida em duas etapas complementares: uma fase inicial de levantamento teórico e definição de critérios de comparação, seguida de uma fase prática de aplicação e análise com base no ambiente de simulação do SEV.

Etapa 1 – Levantamento Teórico e Proposição de Critérios

Nesta etapa, será realizada uma revisão técnico-bibliográfica sobre diferentes interfaces visuais aplicáveis a simuladores de voo. O foco será na análise de tecnologias como realidade virtual (VR), realidade mista (MR), sistemas imersivos de forma geral utilizados em ambientes de simulação de voo avançados.

Com base nesse levantamento, serão identificadas as principais características técnicas, operacionais e perceptuais de cada alternativa, bem como suas aplicações práticas no contexto de simulações com aeronaves. A partir dessa análise, serão propostos critérios de avaliação quantitativos (como campo de visão, resolução angular, latência, entre outros) e qualitativos (como conforto, realismo percebido, integração com o cockpit, etc.), com o objetivo de estabelecer uma base comparativa consistente entre as diferentes interfaces estudadas.

Etapa 2 – Aplicação Prática e Análise Comparativa com o XTAL 8K

A segunda etapa consiste na aplicação prática da metodologia desenvolvida, por meio da comparação direta entre duas interfaces: o sistema atual de telas do simulador de estabilidade variável do IPEV e a nova interface com o óculos de realidade virtual XTAL 8K.

Essa comparação será realizada utilizando o modelo da aeronave Sikorsky-S-76C, e F-4 Phantom II, considerando as aeronaves em repouso no solo. Serão efetuadas capturas de tela das duas interfaces, nas mesmas condições de simulação, com o objetivo de avaliar visualmente as diferenças de campo de visão, tanto na dimensão horizontal quanto na vertical. Tal etapa será feita no software X-Plane 11 para o ambiente de telas do simulador, e no software X-Plane 12 para o ambiente de realidade virtual.

Além dessa análise visual, os mesmos critérios quantitativos e qualitativos propostos na Etapa 1 serão aplicados à comparação prática, de forma a fornecer uma avaliação sistemática das duas abordagens. A coleta e organização dos dados serão feitas com base nos registros de tela, observações diretas e análise técnica do ambiente simulado.

Etapa 3 – Consolidação da Análise

Por fim, os dados obtidos nas duas etapas serão consolidados e comparados de forma estruturada, com base nos critérios previamente definidos. Essa abordagem permitirá não apenas avaliar as capacidades técnicas de cada interface, mas também sua adequação às necessidades específicas do simulador de estabilidade variável, considerando aspectos como representatividade do voo, imersão do piloto, conforto operacional e aplicabilidade prática no contexto do IPEV. A análise resultante fornecerá subsídios para futuras decisões sobre o aprimoramento do sistema visual do simulador, especialmente quanto à adoção de tecnologias de realidade virtual e imersiva.

4 Resultados

4.1 Levantamento Teórico e Proposição de Critérios

Esta etapa apresenta o levantamento das normas que tratam dos sistemas visuais em dispositivos de treinamento de voo (FSTD). De forma geral, os requisitos que impactam o projeto e a avaliação de interfaces visuais (projeção colimada, telas, domos, e mais recentemente HMD/VR/MR) estão consolidados em três “famílias” normativas: **EASA** (Europa), **FAA/FAR** (Estados Unidos) e **ICAO** (referência global). Essas referências estabelecem *parâmetros técnicos e métodos de ensaio* para o sistema visual que são relevantes para comparar diferentes interfaces no contexto de simulação de voo.

Os parâmetros técnicos extraídos dessas normas cobrem, em termos gerais: (i) campo de visão (FoV) e campo de varredura (FoR) mínimos por nível de qualificação; (ii) requisitos de colimação e continuidade da cena (críticos em FFS de níveis mais altos); (iii) geometria e alinamento do sistema (erros angulares, paralaxe e correspondência entre cena e referências físicas de cockpit); (iv) qualidade de imagem (resolução angular efetiva, contraste, reprodução de cor, luminância, visibilidade de *lightpoints*); (v) desempenho temporal do pipeline visual (atraso/“transport delay”, taxa de atualização e estabilidade); (vi) fidelidade de conteúdo visual e base de dados (detalhamento de terreno/aeródromo, luzes de pista/táxi, marcações, objetos ecléticos) sob diferentes condições (dia/crepúsculo/noite); e (vii) procedimentos de teste objetivos e subjetivos para verificação, incluindo grades de calibração, tarefas de aproximação/pouso e avaliações de tripulantes.

A seguir, descrevem-se, de forma sintética, os documentos-chave de cada família normativa e como eles tratam o sistema visual.

4.1.1 EASA (Europa)

- **CS-FSTD(A)**: Código de normas para FSTDs de aeronaves de asa fixa. Estabelece mínimos de FOV por nível (com ênfase em FFS níveis C/D), requisitos de colimação/continuidade “*cross-cockpit*”, verificações de geometria (padrões angula-

res) e procedimentos de ensaio do sistema visual (incluindo avaliações sob diferentes condições de luminosidade e tarefas operacionais). ((EASA), 2018)

- **CS-FSTD(H)**: Versão dedicada a helicópteros. Define FOV mínimos por nível (FFS/FTD/FNPT), requisitos de qualidade da base visual para tarefas específicas de helicópteros (hover, *low-level flight*), ensaios de ocultamento, geometria e desempenho temporal do visual. ((EASA), 2020)

4.1.2 FAA/FAR (Estados Unidos)

- **14 CFR Part 60 – Qualification Performance Standards (QPS)**: Conjunto de requisitos e procedimentos para qualificação de FSTDs. O Appendix A (FFS) apresenta as bases para avaliação do sistema visual, incluindo: (i) ensaios de atraso de transporte (do comando do piloto até a resposta no visual, motion e instrumentos) e critérios de desempenho temporal; (ii) verificações de qualidade de cena (luzes, alinhamento com auxílios, *visual ground segment*, marcadores de pista); (iii) métodos de teste objetivos/subjetivos por nível de qualificação. Embora a FAA não tenha um capítulo dedicado a HMD/VR/MR, casos recentes têm sido aceitos mediante demonstração de conformidade com o Part 60. ((FAA), 2018)

4.1.3 ICAO (Referência Global)

- **Doc 9625 – Manual of Criteria for the Qualification of FSTDs**: Manual internacional que consolida critérios de qualificação e métodos de avaliação de FSTDs, incluindo o sistema visual (níveis de fidelidade, tarefas de ensaio e requisitos de desempenho). Serve como referência para autoridades nacionais/regionais (p.ex., EASA, FAA, ANAC) harmonizarem seus requisitos, favorecendo a consistência internacional. O Doc 9625 não prescreve um capítulo específico para HMD/VR/MR, mas oferece a estrutura para avaliar desempenho visual independentemente da tecnologia de exibição utilizada. ((ICAO), 2015)

4.1.4 Consolidação recente de requisitos para VR/MR em FSTDs

Até 2023, a literatura regulatória tratava o sistema visual de FSTDs por meio de normas gerais (EASA CS-FSTD(A/H), FAA 14 CFR Part 60/QPS e ICAO Doc 9625), definindo parâmetros como campo de visão, colimação, geometria/alinhamento, qualidade de imagem e desempenho temporal do pipeline visual. Contudo, não havia um documento normativo dedicado às especificidades de exibições imersivas por *Head-Mounted Displays* (HMD), realidade virtual (VR) ou mista (MR). A avaliação de projetos com HMD, quando

ocorria, dava-se por analogia aos requisitos existentes e por meios aceitáveis de demonstração (testes objetivos/subjetivos) acordados com a autoridade.

Um marco importante anterior à publicação de uma norma específica foi a primeira aprovação de um FSTD baseado em VR pela EASA (26 abr. 2021). O dispositivo, voltado a treinamento de helicópteros e desenvolvido pela Loft Dynamics (à época VRM Switzerland), foi qualificado como *FNPT II* para o Robinson R22. Segundo a comunicação oficial, a Agência verificou a adequação do conceito por meio de um programa de avaliação com instrutores e pilotos de teste, destacando a utilidade para manobras críticas (autorrotativa, voo pairado e pouso em active) que demandam *wide FoV* e percepção precisa de altura. Como se tratava do primeiro FSTD VR, a EASA aplicou Condições Especiais para cobrir particularidades de cockpit, sistema de exibição e *motion* de dispositivos VR, assegurando nível de segurança equivalente ao das *Certification Specifications* vigentes. A imagem 4.1 mostra o simulador H125 da Loft Dynamics, aprovado pela EASA.



FIGURA 4.1 – FSTD H125 da Loft Dynamics na Heli Expo Air Show 2022. (HELICOPTERS, 2025)

Em 16 mar. 2023, a EASA publicou formalmente as FSTD *Special Conditions* para uso de HMD (VR/MR) aplicáveis, inicialmente, a *FNPT II* e *FTD 3* com cockpits específicos e plataformas de movimento de envelope reduzido. Essas *Special Conditions* introduzem, pela primeira vez, métricas objetivas e métodos de ensaio voltados a HMD, cobrindo desde o alinhamento estável entre o mundo virtual e o cockpit físico até testes de latência de rastreamento de cabeça, resolução angular efetiva e fidelidade de cor, sempre exigindo que as medições considerem o pipeline completo do sistema visual (e não apenas o visor).

EASA Special Conditions (2023) para HMD/VR em FSTDs — síntese técnica ((EASA), 2023)

- **Escopo e base normativa:** aplicáveis a *FNPT II* e *FTD 3* com cockpit físico em escala real e HMD (VR/MR), complementando a CS-FSTD(H) (requisitos como FSTD(H).300 e AMCs associados). *Use case* inicial em helicópteros (R22 e H125).
- **Integração VR-cockpit e interação:** requer cockpit físico em escala real para leitura e operação de controles; sem desalinhamento perceptível entre a sobreposição visual do HMD e o hardware; o *IOS* deve permitir observabilidade dos estados de cockpit.
- **Rastreamento de cabeça (6 DoF) e latência:** atualização correta do ponto de vista, imune a degradações introduzidas pelo *motion*; ensaio objetivo de latência de *tracking* com limite típico $t_{\text{HMD}} \leq 20$ ms.
- **Fidelidade de cor (CIE 1976):** erro de cor medido em UCS atendendo $\sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2} \leq 0,02$, com procedimentos definidos para *FTD 3*.
- **Resolução angular efetiva (*grating resolution*):** ensaio com padrões de linhas em múltiplas orientações cobrindo todo o FOV; requisitos mínimos por zona, p. ex., 2 arcmin em regiões centrais e limites progressivamente mais permissivos em periferia; o teste abrange o *pipeline* completo (renderização + visor).
- **Desempenho temporal do sistema:** quando o atraso de instrumentos gráficos não for medido separadamente, deve-se demonstrar equivalência ao atraso do sistema visual; os testes devem avaliar o *pipeline* completo, não apenas o display.
- **Plataforma de movimento (envelope reduzido):** o *motion* não pode introduzir degradações perceptíveis no *tracking* do HMD nem na estabilidade do ponto de vista; inclui procedimentos de verificação com trajetórias representativas em todos os graus de liberdade dentro de frações do envelope disponível.

Em conjunto, esses itens fornecem uma base mensurável para aceitar HMD/VR/MR em FSTDs, interoperando com os requisitos clássicos de sistema visual (FOV/FOR, geometria, qualidade de cena e atraso de transporte) já consolidados nas especificações EASA/FAA/ICAO, e inauguram um caminho regulatório explícito para a comparação técnica entre interfaces imersivas e sistemas visuais convencionais neste trabalho.

4.1.5 Requisitos Técnicos do IPEV

Dentro do contexto do projeto FAEV, na Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento do IPEV, o subprojeto do SEV passa por constantes discussões, com integrantes do instituto,

de possíveis melhorias a serem implementadas. Em novembro de 2022 foi discutida a melhoria do sistema visual, visto suas limitações de campo visual que restringem, por exemplo, a execução de voos próximos ao solo com aeronaves de asas rotativas.

Nesse contexto, fizeram a comparação de 4 soluções propostas quanto aos seguintes critérios quantitativos/qualitativos: Custo unitário de cada equipamento, quantidade total de equipamentos necessários, espaço físico ocupado, complexidade de implementação, eliminação de restrição de campo visual, manutenção do sistema visual atual e novas capacidades para pesquisa.

As soluções propostas foram: óculos VR, projetores, adição de 2 telas e novo conjunto de telas. A tabela 4.1 exprime o resumo comparativo obtido.

TABELA 4.1 – Comparativo de alternativas de sistema visual (MORO, 2022)

Características	Óculos VR	Projetores	Adição de 2 telas	Novo conjunto de telas
Custo unitário de cada equipamento	US\$ 10 mil	US\$ 5 mil	Sem custo adicional	US\$ 1 mil
Quantidade total necessária	1	5	—	8
Espaço físico	Cabine	Grande	Médio	Médio
Complexidade de implementação	Menor	Alta	Menor	Média
Elimina restrição de campo visual?	Sim	Reduz significativamente	Reduz	Reduz significativamente
Mantém sistema visual atual	Sim	Não	Sim	Não
Novas capacidades para pesquisa	Acrescenta	Não	Não	Não

A partir da análise do comparativo, a solução selecionada foi óculos VR

4.1.5.1 Requisitos Mínimos do Óculos VR

Uma vez que a solução de sistema visual adotada foi o óculos VR, os integrantes do IPEV elencaram os seguintes requisitos mínimos a serem implementados:

1. É mandatório que o equipamento tenha campo de visão instantâneo (field of view) vertical de no mínimo 90°.
2. É mandatório que o equipamento tenha campo de visão instantâneo (field of view) horizontal de no mínimo 100°, sendo desejável maior que 160°.
3. É mandatório que o equipamento tenha campo de visão total (field of regard) de 360° horizontal e vertical.
4. É mandatório que o equipamento tenha resolução da tela por olho de 2160x2160 pixels.
5. É mandatório que o equipamento tenha saídas de áudio, sendo desejável ter alto falantes acoplados de série.
6. É mandatório que o equipamento tenha taxa de atualização maior que 60 quadros por segundo.
7. É mandatório que o equipamento tenha capacidade de rastreamento de direção do olho do usuário.
8. É mandatório a integração do equipamento a um computador que não degrade as características técnicas dos óculos VR a ser adquirido, sendo necessário que o conjunto cumpra os requisitos técnicos listados acima.
9. É desejável que o equipamento tenha outros sensores fisiológicos para monitoramento do usuário.

Fonte: (MORO, 2022, p. 20).

Com o levantamento dos critérios descritos, foi possível realizar as aplicações práticas e análises comparativas de diferentes interfaces visuais do SEV.

4.2 Aplicação Prática e Análise Comparativa com o XTAL 8K

De posse dos critérios levantados na última seção e, com base na metodologia descrita, pode-se comparar os campos visuais fornecidos pelas duas interfaces do SEV. A figura 4.2 ilustra o óculos VR utilizado em comparação frente ao sistema de telas existente.



FIGURA 4.2 – Óculos VR XTAL 8K da VRgineers

Para que a comparação dos campos visuais de ambas as interfaces fosse realizada, foi necessário sobrepor as capturas de telas. Entretanto, um ponto de atenção é que, para o óculos VR, a captura feita não é fidedigna à imagem visualizada na interface, já que utilizamos monitores convencionais para representar o que é visto no óculos. Na prática, a captura de tela é do monitor conectado ao computador em que foi feito o procedimento, representando apenas parte do que é visto no óculos. A imagem 4.3 mostra essa dinâmica.



FIGURA 4.3 – Realização das Análises no XTAL 8K do IPEV

Para contornar esse problema foram adotados os seguintes passos:

- **1.** Com a captura do sistema de telas já realizada, foi feita a visada com o óculos na mesma posição relativa às telas;
- **2.** Com o auxílio de um suporte, retirou-se o óculos mantendo-o na mesma posição e, visualizando a imagem no monitor auxiliar do sistema, tirou-se uma captura de tela central;
- **3.** Acompanhando o monitor auxiliar conectado ao sistema, rotacionou-se o XTAL 8K nos devidos eixos até que a extremidade correspondente a rotação, ilustrada no monitor, corresponderesse ao limite do campo de visão percebido na primeira visada do experimentador;

- **4.** Mantida a posição descrita no 3º passo, realizava-se a captura de tela, de forma que, ao repetir o passo 3, para 4 posições de visada (superior, inferior, lateral esquerda e direita), obtém-se pela composição das 5 imagens, uma proposta de representação da visualização proporcionada pelo XTAL 8K.

Dessa forma, é possível sobrepor as representações, respeitando os limites do campo de visão de cada sistema.

4.2.1 Campo Visual no F-4 Phantom II

Para as capturas de tela, foi previamente configurado, em ambos os *softwares* X-Plane 11, para o sistema de telas, e X-Plane 12, para o XTAL 8K, o mesmo ambiente de simulação:

- **Aeroporto:** São Francisco International;
- **Pista:** 28R;
- **Tempo:** *Clear Weather*;
- **Horário:** 9:56 AM.

A captura de tela do sistema de telas, com as respectivas marcações (em verde) de campo visual feitas com auxílio do *software Microsoft PowerPoint*, está representada na figura 4.4.



FIGURA 4.4 – Visualização do Sistema de Telas (Atual).

Após as capturas do sistema do XTAL 8K, realizadas conforme os passos descritos nessa seção, foram feitas as marcações (em verde) de campo visual com auxílio do *software Microsoft PowerPoint*. Adicionalmente representou-se, em amarelo, qualitativamente através de uma forma elíptica, o campo visual sobreposto do sistema de telas,

utilizando o mesmo referencial angular, e repetindo os limites quantitativos do campo. O resultado é o que se mostra na figura 4.5



FIGURA 4.5 – Comparação Esquemática das Interfaces de Telas e VR.

4.2.2 Campo Visual no Sikorsky S-76C

Para as capturas de tela, foi previamente configurado, em ambos os *softwares* X-Plane 11, para o sistema de telas, e X-Plane 12, para o XTAL 8K, o mesmo ambiente de simulação:

- **Aeroporto:** São Francisco International;
- **Pista:** 28R;
- **Tempo:** *Clear Weather*;
- **Horário:** 9:56 AM.

A captura de tela do sistema de telas, com as respectivas marcações (em verde) de campo visual feitas com auxílio do *software Microsoft PowerPoint*, está representada na figura 4.6.



FIGURA 4.6 – Visualização do Sistema de Telas (Atual).

Após as capturas do sistema do XTAL 8K, realizadas conforme os passos descritos nessa seção, foram feitas as marcações (em verde) de campo visual com auxílio do *software Microsoft PowerPoint*. Adicionalmente representou-se, em amarelo, qualitativamente através de uma forma elíptica, o campo visual sobreposto do sistema de telas, utilizando o mesmo referencial angular, e repetindo os limites quantitativos do campo.

Uma observação nessa representação é que, no modelo simulado pelo X-Plane 12, a visualização superior, quando feita junto ao óculos VR, fica praticamente adjacente à superfície superior do helicóptero, trazendo uma vista que, ao ser capturada no monitor auxiliar, não trás uma representação fidedigna ao que se visualiza com o XTAL 8K. Dessa forma, foi feita uma outra visada que mostrasse o painel superior, mas que não perdesse a visualização. Como essa não corresponde ao ângulo de visada proposto, foi marcada em vermelho. O resultado é o que se mostra na figura 4.5

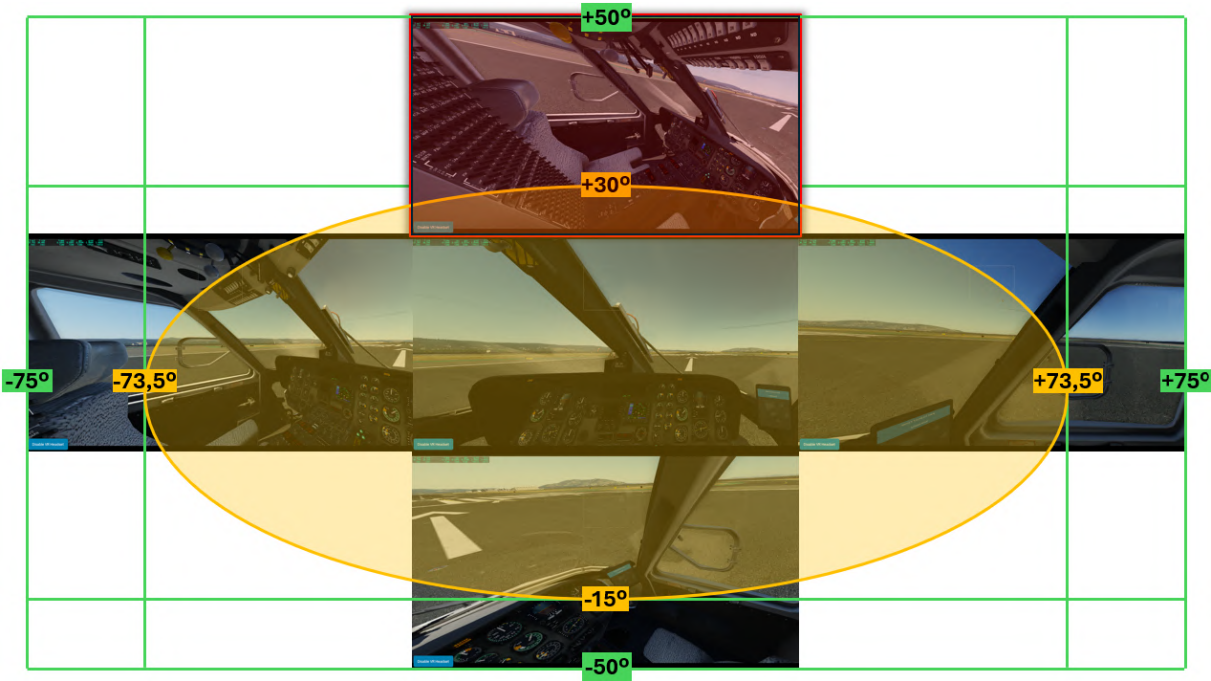


FIGURA 4.7 – Comparação Esquemática das Interfaces de Telas e VR.

4.2.3 Discussões

Utilizando-se os critérios de *Field of View* Vertical, *Field of View* Horizontal, *Field of Regard* Vertical e *Field of Regard* Horizontal, podemos comparar o sistema de telas atual do SEV, o do óculos VR XTAL 8K, com os requisitos mínimos elencados pelo IPEV. A tabela 4.2 resume esse comparativo.

TABELA 4.2 – Resumo Comparativo

Característica	Critérios IPEV	Sistema de Telas	XTAL 8K
Field of View (Vertical)	90º	45º	100º
Field of View (Horizontal)	100º (160º Desejável)	147º	150º
Field of Regard (Vertical)	360º	45º	360º
Field of Regard (Horizontal)	360º	147º	360º

De maneira geral, é possível concluir que ambos os sistemas visuais atendem, de forma geral, os critérios elaborados quanto ao *Field of View* horizontal e vertical. Entretanto,

devido à questões específicas, como limitações de campo visual que restringem a execução de determinados voos, o critério de *Field of View* torna-se desejável com uma abertura mínima de 160°. Nesse ponto de vista, ainda assim, ambos os sistemas apresentam-se como uma solução.

Quanto ao *Field of Regard*, esse é um critério que apenas ganha sentido quando se aplica ao XTAL 8K, já que esse é móvel e possui diferentes campos de visão instantâneos, com a soma desses sendo o *Field of Regard*. Para o sistema de telas, o único campo visual disponível é o próprio *Field of View*.

Por fim, percebe-se a maior discrepância quando se analisa o *Field of View* vertical. Nesse critério, o XTAL 8K se mostra, de fato, como uma solução muito mais eficiente que o sistema de telas. O sistema de telas não supre o critério elaborado, apresentando metade da abertura angular solicitada. Já o XTAL 8K supre com folga o critério, mostrando também, conforme a figura 4.7, a janela inferior direita do helicóptero que, anteriormente, não era visualizada, e causava restrições de execução de voos próximos ao solo. Além disso, é possível perceber pelas figuras 4.5 e 4.7 a diferença de abrangência dos campos visuais, sendo o do XTAL 8K muito mais abrangente do que o do sistema de telas atual.

Dessa forma, o óculos VR XTAL 8K demonstra ser, por diferentes critérios, uma solução mais eficiente para o sistema visual do SEV do que o sistema de telas.

4.3 Consolidação da Análise e Proposições

Essa etapa consiste em aplicar os critérios levantados frente à diferentes soluções de óculos VR/MR, incluindo ao modelo atual XTAL 8K. Para isso, foram escolhidos dois modelos de óculos diferentes, mas do mesmo fabricante do XTAL 8K, VR gineers, para manter as comparações coerentes com o modelo existente. Assim, escolheu-se para essa etapa o óculos VR XTAL 3, ilustrado na figura 4.8, e o óculos MR XTAL 3 NEO, ilustrado na figura 4.9.



FIGURA 4.8 – Óculos VR XTAL 3 da VRgineers



FIGURA 4.9 – Óculos MR XTAL 3 NEO da VRgineers

Para comparação, utilizaram-se os critérios levantados pelo IPEV de *Field of View* vertical e horizontal, *Field of Regard* vertical e horizontal, resolução da tela por olho, taxa de atualização de quadros e capacidade de rastreamento de direção do olho do usuário. Além disso, foram adicionados outros parâmetros como tipo de display, interação funcional com a cabine, massa do equipamento e preço unitário.

TABELA 4.3 – Comparativo de headsets VR/MR

Parâmetro	Critérios IPEV	XTAL 8K	XTAL 3	XTAL 3 NEO
Resolução (por olho)	2160 x 2160	3840 x 2160	3840 x 2160	3840 x 2160
Display	—	OLED	LCD	LCD
Refresh Rate (Hz)	60	75	75	75
Field of View (Horizontal)	160°	150°	180°	180°
Field of View (Vertical)	90°	100°	120°	120°
Field of Regard (Hor./Vert.)	360°	360°	360°	360°
Eye Tracking	Sim	Sim	Sim	Sim
Massa (g)	—	770	600	700
Interação funcional com a cabine	—	Não	Não	Sim
Preço Unitário (US\$)	—	7980	8900	11500

A comparação entre os três HMDs indica paridade nos itens que, do ponto de vista operacional, não diferenciam a decisão: todos entregam resolução por olho de 3840×2160 , possuem *eye tracking* e cobrem 360° de *field of regard* (FoR). Ademais, atendem ao patamar mínimo de taxa de atualização definido no trabalho (com 75 Hz nos XTAL 3/XTAL 3 NEO e 60 Hz no XTAL 8K), de modo que resolução, *refresh rate*, FoR e rastreamento ocular não são fatores de desempate. Diferenças secundárias — como tecnologia de display (OLED

no 8K versus LCD nos XTAL 3/3 NEO) e massa ligeiramente menor no XTAL 3 — não compensam o que de fato muda a experiência de treinamento. O ponto decisivo é o *field of view* (FoV): os XTAL 3 e XTAL 3 NEO oferecem aproximadamente 180° (H) $\times$ 120° (V), contra cerca de 150° (H) $\times$ 100° (V) do XTAL 8K, ampliando a visão periférica e a cobertura vertical inferior essenciais em perfis de helicóptero (hover e transições próximas ao solo), tudo isso dentro de uma faixa de preço próxima entre os modelos comparados.

Dessa síntese, a proposição é objetiva: para o contexto do SEV/IPEV, os XTAL 3 e XTAL 3 NEO configuram soluções superiores ao XTAL 8K. O XTAL 3 maximiza a relação custo–desempenho em *VR* pura, ao entregar o FoV mais amplo com menor massa; já o XTAL 3 NEO agrega a vantagem estratégica da *mixed reality* — *interação funcional com a cabine* — permitindo operar o cockpit físico com sobreposição virtual, o que melhora procedimentos e consciência espacial sem abrir mão do ganho de FoV. Assim, recomenda-se (i) XTAL 3 como opção de referência quando a prioridade for imersão e abrangência de FoV em *VR*; e (ii) XTAL 3 NEO quando a manutenção do contato com o cockpit real for requisito de missão/treinamento, justificando o prêmio de preço e massa.

5 Conclusão

O trabalho alcançou o objetivo de avaliar, com base em critérios técnicos e operacionais, a adequação de diferentes interfaces imersivas ao simulador de estabilidade variável do IPEV. A metodologia foi estruturada em três frentes: (i) consolidação do referencial normativo (FAR, EASA e ICAO) para balizar requisitos mínimos de desempenho visual e operação; (ii) comparação entre o XTAL 8K e o sistema de telas do SEV, evidenciando trade-offs de imersão, integração com a cabine e complexidade/custo; e (iii) *benchmarking* entre três HMDs (XTAL 8K, XTAL 3 e XTAL 3 NEO) à luz de critérios de missão. Dessa forma, a análise integrou normas, arquitetura existente e alternativas tecnológicas, produzindo uma base de decisão coerente com o contexto do IPEV.

Na síntese comparativa, alguns atributos não se mostraram discriminantes, pois os três modelos atendem ao patamar definido no trabalho: resolução por olho, presença de *eye tracking*, *field of regard* (FoR) e taxa de atualização adequada. Diferenças como tecnologia de display e massa existem, mas não alteram o desfecho. O fator decisivo foi o *field of view* (FoV): XTAL 3 e XTAL 3 NEO apresentam FoV horizontal e vertical mais abrangente que o XTAL 8K, mantendo faixa de preço próxima. Esse ganho de FoV se traduz em melhor percepção periférica e cobertura vertical, especialmente relevantes em perfis de helicóptero e operações próximas ao solo. Além disso, o XTAL 3 NEO agrega o benefício da *mixed reality* (MR), possibilitando interação funcional com a cabine.

Conclui-se, portanto, que XTAL 3 e XTAL 3 NEO configuram soluções superiores ao XTAL 8K para o SEV/IPEV. Recomenda-se o XTAL 3 quando a prioridade for maximizar imersão e FoV em *VR* com boa relação desempenho-custo; e o XTAL 3 NEO quando requisitos de interação com o cockpit físico e procedimentos demandarem *MR*. Esse resultado é consistente com as balizas normativas (etapa 1) e com os achados da comparação XTAL 8K vs. sistema de telas (etapa 2), reforçando que, para o perfil de treinamento considerado, HMDs com FoV mais amplo e, quando necessário, capacidades de *MR* tendem a oferecer maior aderência operacional ao simulador do IPEV.

Referências

AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997.

BILLINGHURST, M.; CLARK, A.; LEE, G. A survey of augmented reality. **Foundations and Trends in Human–Computer Interaction**, v. 8, n. 2–3, p. 73–272, 2015.

BURDEA, G. C.; COIFFET, P. **Virtual Reality Technology**. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2003.

(EASA), E. U. A. S. A. **Certification Specifications for Aeroplane Flight Simulation Training Devices (CS-FSTD(A))**. Cologne, 2018. Issue 2; Annex to ED Decision 2018/006/R.

(EASA), E. U. A. S. A. **Certification Specifications for Helicopter Flight Simulation Training Devices (CS-FSTD(H))**. Cologne, 2020. Consolidated publication.

(EASA), E. U. A. S. A. **Special Conditions for Flight Simulation Training Devices using Head-Mounted Displays**. Cologne, 2023. Issued 16 March 2023.

(FAA), F. A. A. **14 CFR Part 60 — Flight Simulation Training Device (FSTD) Qualification. Appendix A to Part 60: Qualification Performance Standards for Airplane Full Flight Simulators**. Washington, DC, 2018. Code of Federal Regulations, Title 14, Part 60, Appendix A.

FORCE, N. M. of the U. S. A. **McDonnell Douglas F-4C Phantom II**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/196051/mcdonnell-douglas-f-4c-phantom-ii/>.

GOLD, P. J.; DRYFOOS, J. B. **Design and pilot evaluation of RAH-66 Comanche selectable control models**. 1993.

HELICOPTERS, A. **H125 virtual reality simulator approved by DGAC for type rating**. Marignane, abr. 2025. Available at: <https://airbusworld.helicopters.airbus.com/web/guest/home/detail/33237818>.

(ICAO), I. C. A. O. **Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices, Volume I: Aeroplanes**. Fourth. Montreal: [s.n.], 2015. (Doc 9625 — AN/938).

- INC., C. **Display Systems – Dome Displays for Immersive Training**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.cae.com/defense-security/what-we-do/training-systems/display-systems/>.
- LOCKHEED, C. M. **Sikorsky S-76 Helicopter**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/sikorsky-s-76.html>.
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *In: IEICE Transactions on Information and Systems. Proceedings [...]*. [S.l.: s.n.], 1994.
- MORO, L. G. **Parecer Técnico: Sistema Visual do Simulador de Estabilidade Variável (SEV)**. [S.l.], 2022.
- SLATER, M. Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 364, p. 3549–3557, 2009.
- SOUZA, E. de M.; SCARPARI, J. R. S. **BH-18 TEV — Avaliação de Cabine**. São José dos Campos, SP, 2012. Revisão da apostila original de 1991.
- STATLER, I. C. **Characteristics of Flight Simulator Visual Systems**. Moffett Field, CA, 1981.
- SUPNIK, B. **Photometric Lighting – What Is It and Why Do We Need It?** 2021. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://developer.x-plane.com/2021/11-/photometric-lighting-what-is-it-and-why-do-we-need-it/>.
- SYSTEMS, T. S. V. **SEER Series Immersive Training and Simulation Domes**. 2023. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: https://trealitysvs.com/wp-content/uploads/TREALITY-SVS-SEER_SERIES.pdf.
- TechTudo. **Como jogar X-Plane 11 no PC**. 2017. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/2017/04/como-jogar-x-plane-11-no-pc-.ghtml>.
- WILTGEN, G. **Esquadrão HU-51 realiza treinamento de procedimentos de emergência em simulador de voo do CIAvEx**. 2021. Available at: <https://www.defesaaereanaval.com.br/aviacao/esquadrao-hu-51-realiza-treinamento-de-procedimentos-de-emergencia-em-simulador-de-voo-do-ciavex>.
- X-PLANE. **How X-Plane Works**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.x-plane.com/desktop/how-x-plane-works/>.
- X-PLANE. **X-Plane for Professional Use**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.x-plane.com/pro/>.
- X-PLANE12. **X-Plane 12.00 Release Notes**. 2022. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.x-plane.com/kb/x-plane-12-00-release-notes/>.
- X-PLANE12. **X-Plane 12 — The World’s Most Advanced Flight Simulator**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.x-plane.com/>.
- X-PLANE12. **X-Plane Desktop Manual**. 2025. Acesso em 9 jun. 2025. Available at: <https://www.x-plane.com/manuals/desktop/>.

Anexo A - Output das Interfaces Visuais

Todas as imagens foram capturadas em ambiente de simulação do *software* X-Plane, configurado para o aeroporto de *San Francisco International* (SFO), pista 28R, *Clear Weather*, às 9:56 AM

A.1 Sistema de Telas com X-Plane 11



FIGURA A.1 – Visão Central no F-4 Phantom II



FIGURA A.2 – Visão Central do lado esquerdo do *cockpit* no Sikorsky S-76C

FIGURA A.3 – Visão Central do lado direito do *cockpit* no Sikorsky S-76C

A.2 Óculos VR XTAL 8K com X-Plane 12

A.2.1 Vistas no F-4 Phantom II



FIGURA A.4 – Vista 1



FIGURA A.5 – Vista 2



FIGURA A.6 – Vista 3



FIGURA A.7 – Vista 4

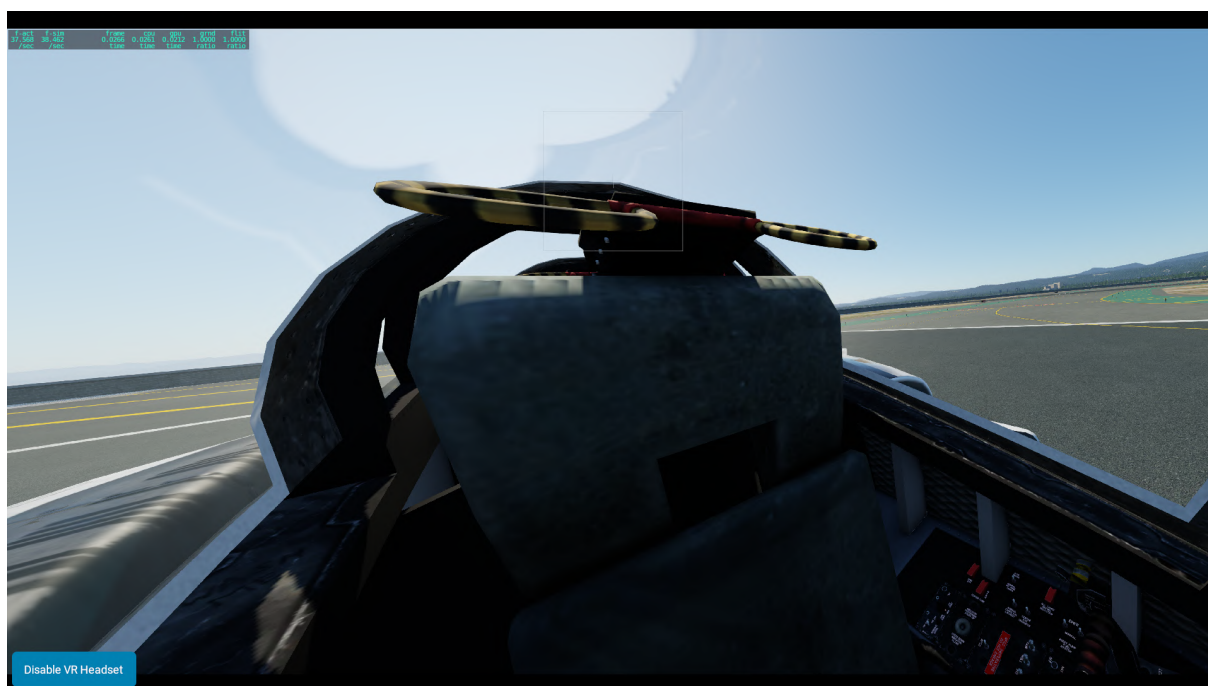


FIGURA A.8 – Vista 5

A.2.2 Vistas no Sikorsky S-76C



FIGURA A.9 – Vista 1

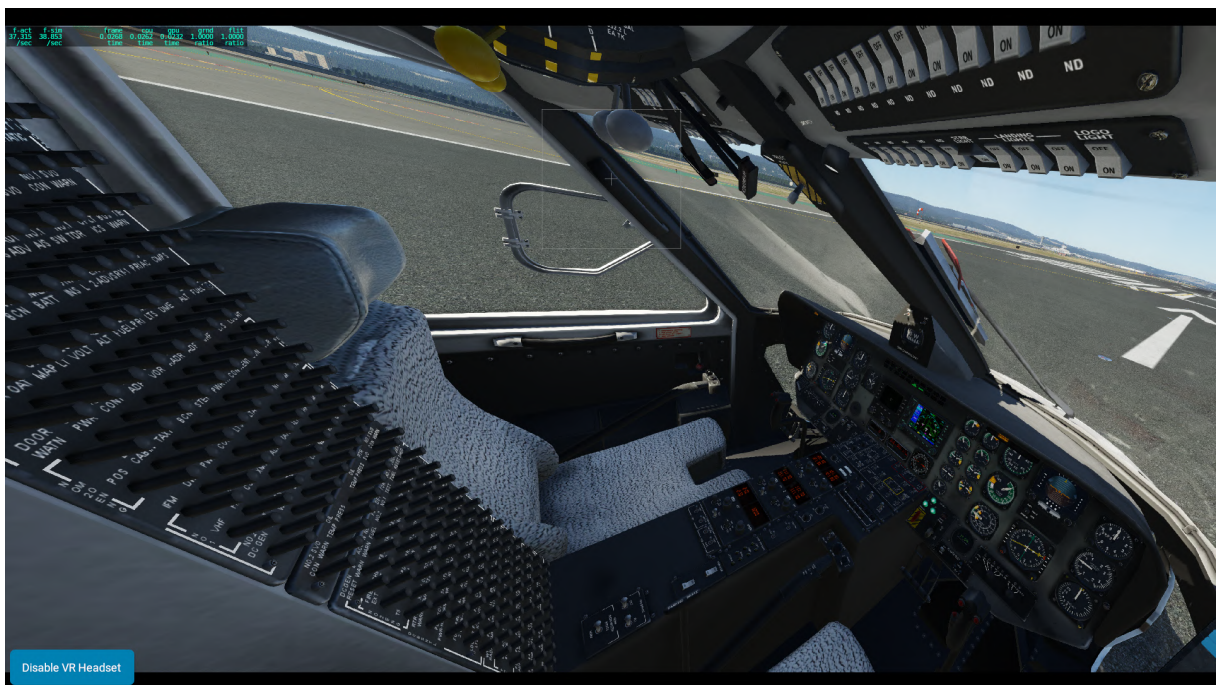


FIGURA A.10 – Vista 2



FIGURA A.11 – Vista 3



FIGURA A.12 – Vista 4

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2025	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-075/2025	4. N° DE PÁGINAS 59
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Comparação de interfaces de simulação aplicáveis ao simulador de estabilidade variável do IPEV			
6. AUTOR(ES): Gabriel Firme Rodrigues			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Realidade Virtual; Simulador de Voo; Força Aérea Brasileira; IPEV; Engenharia Aeronáutica			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Realidade virtual; Simuladores de voo; Treinamento do piloto; Segurança do voo; Força Aérea Brasileira; Simulação computadorizada; Computação; Engenharia aeronáutica.			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional () Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia de Aeronáutica. Orientador: Prof. Lucas Oliveira Barbacovi; coorientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. Publicado em 2025.			
11. RESUMO: Simuladores de voo desempenham um papel fundamental no treinamento de pilotos da Força Aérea Brasileira, permitindo a realização de missões complexas em ambiente controlado, com alta segurança, menor custo operacional e significativa flexibilidade. Dentro desse contexto, o aprimoramento dos sistemas visuais é essencial para aumentar a representatividade das condições reais de voo. Com os avanços recentes em tecnologias de realidade virtual e realidade mista, surgem novas possibilidades para ampliar o campo de visão e a imersão dos pilotos, aspectos que são especialmente relevantes em simulações sem plataforma de movimento físico. Este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar diferentes interfaces de simulação aplicáveis ao simulador de estabilidade variável do Instituto de Pesquisa e Ensaios em Voo (IPEV), considerando o potencial de cada tecnologia para aprimorar a percepção visual do piloto e aumentar a fidelidade da experiência simulada. A metodologia adotada inclui uma revisão técnico-bibliográfica sobre soluções imersivas como head-mounted displays (VR e MR), domos de projeção e sistemas visuais alternativos, com a definição de critérios qualitativos e quantitativos para análise comparativa.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			