

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



David Victor de Andrade

**DESENVOLVIMENTO DE INTERFACES ACESSÍVEIS
EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL PARA
SIMULAÇÕES DE INTEGRAÇÃO SEGURA DE
AERONAVES DA FAB**

Trabalho de Graduação
2024

Curso de Engenharia Eletrônica

David Victor de Andrade

**DESENVOLVIMENTO DE INTERFACES ACESSÍVEIS
EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL PARA
SIMULAÇÕES DE INTEGRAÇÃO SEGURA DE
AERONAVES DA FAB**

Orientador

Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

ENGENHARIA ELETRÔNICA

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

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

de Andrade, David Victor

Desenvolvimento de Interfaces Acessíveis em Ambientes de Realidade Virtual para Simulações de Integração Segura de Aeronaves da FAB / David Victor de Andrade.

São José dos Campos, 2024.

47f.

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

1. Interface. 2. Acessibilidade. 3. Simulação. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE ANDRADE, David Victor. **Desenvolvimento de Interfaces Acessíveis em Ambientes de Realidade Virtual para Simulações de Integração Segura de Aeronaves da FAB**. 2024. 47f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: David Victor de Andrade

TÍTULO DO TRABALHO: Desenvolvimento de Interfaces Acessíveis em Ambientes de Realidade Virtual para Simulações de Integração Segura de Aeronaves da FAB.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2024

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

David Victor de Andrade
Rua H8A, Ap. 128
12.228-460 – São José dos Campos–SP

DESENVOLVIMENTO DE INTERFACES ACESSÍVEIS EM AMBIENTES DE REALIDADE VIRTUAL PARA SIMULAÇÕES DE INTEGRAÇÃO SEGURA DE AERONAVES DA FAB

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

David Victor de Andrade

Autor

Christopher Shneider Cerqueira (ITA)

Orientador

Prof. Dr. Marcelo da Silva Pinho
Coordenador do Curso de Engenharia Eletrônica

São José dos Campos, 06 de novembro de 2024.

Dedico este trabalho a DEUS, o Altíssimo, criador dos céus e da terra, meu grande e eterno DEUS.

Agradecimentos

À minha mãe, Vera Lúcia de Andrade, minha fonte de força. Sua dedicação e apoio incondicional me guiaram até aqui. É uma homenagem que não contempla por completo sua diligência, mas é feita com amor, carinho e gratidão por me proporcionar essa realização.

In Memoriam

À memória de Hélio Vítor de Andrade Filho, meu pai, cuja lembrança permanece viva em mim, como ecos de inspiração e força que guiam minha caminhada.

*“Não temas, porque eu estou contigo; não te assombres, porque eu sou teu Deus;
eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça.”*

— ISAÍAS 41:10

Resumo

Este trabalho de graduação aborda o desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual (VR) para simulações de integração segura de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB). Com a crescente complexidade dos sistemas aeronáuticos, a utilização de ferramentas de engenharia de sistemas acessíveis se torna crucial para melhorar a eficiência e a usabilidade em operações complexas. Este estudo propõe diretrizes e metodologias para a implementação de interfaces acessíveis, integrando conceitos de Sistema de Sistemas (SoS), Engenharia de Sistemas para SoS (SoSE) e Engenharia Orientada a Modelos (MBSE). Além disso, exploram-se as tecnologias de Interface Natural do Usuário (NUI) e a aplicação de técnicas de design de interfaces de jogos digitais para criar simulações imersivas e acessíveis. A pesquisa destaca a importância de ferramentas configuráveis e personalizáveis que permitam ajustes de acessibilidade, contribuindo para a inclusão de diferentes perfis de usuários. A metodologia adotada inclui uma revisão bibliográfica detalhada, análise comparativa de casos e estudo de soluções inovadoras apresentadas nos artigos analisados.

Abstract

This undergraduate final work focuses on the development of accessible interfaces in virtual reality (VR) environments for the safe integration simulations of aircraft in the Brazilian Air Force (FAB). Given the increasing complexity of aerospace systems, the use of accessible systems engineering tools is crucial to enhance efficiency and usability in complex operations. This study proposes guidelines and methodologies for implementing accessible interfaces, integrating concepts of System of Systems (SoS), Systems Engineering for SoS (SoSE), and Model-Based Systems Engineering (MBSE). Additionally, it explores Natural User Interface (NUI) technologies and the application of digital game interface design techniques to create immersive and accessible simulations. The research emphasizes the importance of configurable and customizable tools that allow accessibility adjustments, promoting the inclusion of diverse user profiles. The adopted methodology includes a detailed literature review, comparative case analysis, and study of innovative solutions presented in the reviewed articles.

Lista de Figuras

FIGURA 5.1 – Simulador Boeing 737. 39

FIGURA 5.2 – Simulador Airbus A320. 40

FIGURA 5.3 – Simulador Lockheed Martin. 40

FIGURA 5.4 – Simulador PMATS. 41

FIGURA 5.5 – Simulador JTAC. 42

FIGURA 5.6 – FAA-CTI Flight Simulator. 42

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Comparação das características dos dispositivos estudados. 30

TABELA 5.1 – Síntese da Realização: Atendimento aos Critérios Avaliados. 45

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Realidade Virtual em Sistemas Complexos	14
1.3	Simulações Operacionais em Ambientes de Realidade Virtual	15
1.4	Interfaces Acessíveis para Simulações Operacionais	16
1.5	Problematização	16
1.6	Metodologia	18
1.7	Objetivos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Sistema de Sistemas	20
2.2	Engenharia de Sistemas para SoS	22
2.3	Engenharia de Sistemas Orientada a Modelos	24
2.4	Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos Militares	26
3	REVISÃO SISTEMÁTICA	28
3.1	Tecnologias de Interface Natural	28
3.2	Design de Interface de Jogos Digitais	30
3.3	Integração de Wearables em Interfaces	32
3.4	Interfaces Tangíveis em Simulações de Voo	33
4	ESTRUTURA DO MÉTODO	35
4.1	Metodologia	35
4.2	Design Centrado no Usuário	35

4.3	Design de Interfaces e da Interação	36
4.4	Integração de Dispositivos de Interface Tangível	36
4.5	Estrutura do Método	37
5	REALIZAÇÃO	38
5.1	Exemplos e Comparações	38
5.2	Usabilidade	42
5.3	Avaliação	44
6	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS	47

1 Introdução

1.1 Contextualização

A crescente complexidade dos sistemas aeroespaciais exige ferramentas de engenharia cada vez mais sofisticadas para garantir a eficiência e a segurança. Nesse contexto, a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) surge como uma abordagem essencial para o desenvolvimento e validação de sistemas complexos (MICOUIN, 2014). O uso de MBSE permite a criação de modelos detalhados que podem ser utilizados para simulações, análises de falhas e certificação de segurança, otimizando o processo de desenvolvimento e reduzindo custos. A acessibilidade em ferramentas de engenharia de sistemas é uma necessidade crescente devido à diversidade de perfis de usuários e à complexidade dos ambientes de trabalho. Ferramentas acessíveis não apenas melhoram a eficiência das operações, mas também promovem a inclusão, permitindo que pessoas com diferentes habilidades possam contribuir efetivamente para o desenvolvimento e manutenção de sistemas.

Com a evolução das tecnologias e o aumento da complexidade dos sistemas, a necessidade de ferramentas de engenharia que sejam acessíveis a uma ampla gama de usuários tornou-se evidente. Ferramentas de engenharia acessíveis melhoram a eficiência operacional ao permitir que mais pessoas possam utilizá-las de forma eficaz. Isso é particularmente importante em ambientes complexos, como em sistemas aeroespaciais, onde a precisão e a colaboração são cruciais. A MBSE tem sido fundamental na otimização do gerenciamento da complexidade dos projetos aeroespaciais e na comprovação da conformidade dos projetos com os requisitos de segurança estabelecidos. Esta abordagem permite a criação de modelos detalhados que facilitam a análise de confiabilidade e segurança, bem como a realização de testes funcionais e operacionais de forma mais eficiente. A integração de funcionalidades de acessibilidade nessas ferramentas pode ampliar ainda mais esses benefícios, permitindo que engenheiros com diferentes níveis de habilidade possam participar ativamente do processo de desenvolvimento e validação.

Os avanços em realidade virtual (VR) estão revolucionando a forma como as ferramentas de engenharia são desenvolvidas e utilizadas (MICOUIN, 2014). A VR oferece uma plataforma imersiva que pode melhorar significativamente a acessibilidade e a usabilidade

das ferramentas de engenharia de sistemas. A integração da VR com MBSE permite a criação de simulações realistas e imersivas que podem ser utilizadas para treinamento, validação e verificação de sistemas complexos. A VR pode ser utilizada para criar ambientes de simulação onde os engenheiros podem interagir com os modelos de sistemas de forma intuitiva, melhorando a compreensão e a análise dos sistemas.

1.2 Realidade Virtual em Sistemas Complexos

A evolução das tecnologias de realidade virtual (VR) tem transformado significativamente a forma como as ferramentas de engenharia de sistemas são desenvolvidas e utilizadas. Desde as primeiras interfaces de usuário baseadas em comandos de texto até as modernas interfaces gráficas e naturais, o objetivo tem sido sempre facilitar a interação entre o usuário e o sistema (CAMARGO, 2017). As interfaces naturais de usuário (Natural User Interfaces - NUI) representam um avanço significativo, permitindo interações mais intuitivas e acessíveis através de gestos, movimentos e comandos de voz.

As interfaces de usuário passaram por diversas fases de evolução. Inicialmente, eram baseadas em lotes, utilizando cartões perfurados e impressoras. Com o tempo, evoluíram para terminais de comando e, posteriormente, para interfaces gráficas de usuário (Graphical User Interfaces - GUI). Atualmente, as NUIs, que utilizam ações naturais do usuário, como movimentos e comunicação verbal, representam o estado da arte na interação humano-computador. A evolução das NUIs inclui tecnologias como o Microsoft Kinect ¹, que utiliza sensores de movimento e comandos de voz para interações intuitivas, e o Leap Motion ², que rastreia os movimentos das mãos do usuário para permitir interações precisas em ambientes de VR. Essas tecnologias permitem que os usuários interajam de maneira mais natural e eficiente com sistemas complexos, eliminando a necessidade de interfaces tradicionais, como teclados e mouses. Além disso, tecnologias como a braçadeira MYO ³, que utiliza eletromiografia para detectar gestos, e o rastreador ocular TOBII ⁴, que capta movimentos oculares, ampliam as possibilidades de interação em ambientes de VR.

As tecnologias de VR podem ser aplicadas para criar interfaces mais intuitivas e acessíveis para ferramentas de engenharia de sistemas. A VR permite uma interação mais natural e direta com os modelos de sistemas, utilizando gestos e movimentos que são mais intuitivos do que os métodos tradicionais de entrada de dados. Isso é particularmente benéfico em ambientes complexos, onde a precisão e a rapidez na interação são cruciais.

¹<https://learn.microsoft.com/pt-br/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows>

²<https://www.ultraleap.com/>

³<https://www.ohm.ca/projects/thalmiclabs-my>

⁴<https://www.tobii.com/>

As interfaces naturais de usuário (NUIs) são um exemplo de como as tecnologias de VR podem ser aplicadas para melhorar a acessibilidade e a usabilidade. NUIs utilizam gestos, comandos de voz e movimentos oculares para permitir interações intuitivas com os sistemas. Por exemplo, um dispositivo como o Microsoft Kinect, que mapeia os movimentos do corpo e permite comandos de voz, pode ser utilizado para controlar ferramentas de engenharia em um ambiente de VR, tornando a interação mais eficiente e acessível. Além disso, a utilização de dispositivos como o Leap Motion, que rastreia os movimentos das mãos, permite uma interação precisa e natural com modelos tridimensionais em ambientes de VR. Isso facilita a manipulação e análise de modelos complexos, melhorando a eficiência das operações de engenharia. A integração de tecnologias como a braçadeira MYO e o rastreador ocular TOBII também pode aumentar a acessibilidade, permitindo que usuários com diferentes habilidades físicas possam interagir de forma eficaz com as ferramentas de engenharia.

1.3 Simulações Operacionais em Ambientes de Realidade Virtual

A aplicação de tecnologias de realidade virtual (VR) em simulações para a Força Aérea Brasileira (FAB) tem mostrado avanços significativos, contribuindo para a melhoria do treinamento de pilotos e testes de sistemas aeronáuticos.

A utilização do Matlab/Simulink para criar um sistema de simulação de controle de voo com uma interface gráfica permite uma visualização em tempo real do comportamento dos sistemas de controle, facilitando ajustes imediatos e precisos (CAMARGO, 2017). A interface gráfica melhora a interação do usuário, tornando o processo de simulação mais acessível e intuitivo. Discute-se a criação de ambientes virtuais que oferecem uma experiência imersiva para os pilotos, permitindo que pratiquem manobras de voo e procedimentos de emergência em um ambiente seguro. A VR proporciona benefícios significativos em termos de custo e segurança, permitindo a simulação de uma ampla gama de cenários operacionais.

A integração de dispositivos de interface natural (NUI) e técnicas de inteligência artificial proporciona uma experiência de treinamento altamente realista e interativa. Esses simuladores replicam com precisão as condições de voo e a operação das aeronaves, melhorando o aprendizado dos pilotos. A implementação de VR em simuladores de voo oferece uma plataforma avançada para a prática de navegação e procedimentos de emergência, contribuindo para a segurança e eficiência do treinamento.

A utilização de tecnologias de VR nas simulações para a FAB oferece uma série de benefícios, incluindo a melhoria do treinamento de pilotos, a redução de custos e a melhoria

da segurança operacional. As inovações discutidas na literatura, como a integração de dispositivos NUI e técnicas avançadas de modelagem 3D, proporcionam uma experiência de simulação altamente realista e interativa, que é essencial para a eficácia e segurança das operações aéreas da FAB.

1.4 Interfaces Acessíveis para Simulações Operacionais

Ferramentas de VR podem ser adaptadas para incluir funcionalidades de acessibilidade, como comandos de voz, interfaces táteis e visuais adaptativas, garantindo que todos os usuários possam utilizar as ferramentas de forma eficaz. Nesse contexto, o conceito de metaverso, uma rede de mundos virtuais interconectados, está ganhando destaque como uma plataforma poderosa para simulações e treinamentos. Para a Força Aérea Brasileira (FAB), o metaverso oferece oportunidades únicas para a integração segura de aeronaves tripuladas e não tripuladas em espaço aéreo não segregado. As simulações no metaverso permitem que a FAB crie cenários realistas e dinâmicos onde pilotos e operadores de drones possam treinar e interagir em um ambiente seguro. Essas simulações podem ser utilizadas para testar e validar procedimentos de integração, identificar possíveis riscos e desenvolver estratégias para mitigá-los. Além disso, o metaverso pode ser utilizado para promover a colaboração entre diferentes equipes e departamentos da FAB. As simulações podem ser acessadas remotamente, permitindo que equipes em diferentes locais trabalhem juntas em tempo real.

A integração segura de aeronaves tripuladas e não tripuladas em espaço aéreo não segregado é um desafio complexo que exige soluções inovadoras. As simulações no metaverso podem ser utilizadas para desenvolver e testar novos protocolos de comunicação e coordenação, garantindo que todas as aeronaves possam operar de forma segura e eficiente. As ferramentas de VR e MBSE podem ser utilizadas para criar modelos detalhados dos sistemas de controle e comunicação, permitindo que os engenheiros analisem e otimizem os sistemas de integração. Além disso, as simulações podem ser utilizadas para treinar pilotos e operadores, garantindo que todos estejam familiarizados com os procedimentos e protocolos de integração.

1.5 Problematização

A integração segura de diferentes aeronaves, tanto tripuladas quanto não tripuladas, no espaço aéreo não segregado, constitui um desafio crítico para a Força Aérea Brasileira (FAB). A capacidade de detectar e evitar colisões, conforme estipulado no Anexo 2, Capítulo 3, Seção 3.2 das Regras do Ar da ICAO (International Civil Aviation Organi-

zation), é essencial não apenas para aeronaves tripuladas, mas também para aeronaves remotamente pilotadas e autônomas. A evolução das tecnologias de realidade virtual (VR) oferece um potencial significativo para o desenvolvimento de interfaces acessíveis que possam aprimorar as simulações e facilitar a integração segura dessas aeronaves. Este estudo visa investigar como as interfaces acessíveis em ambientes de VR podem ser desenvolvidas para suportar simulações de integração segura de aeronaves da FAB, com foco na usabilidade e eficiência operacional.

O problema de pesquisa envolve a análise do desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual que suportem a integração segura de aeronaves tripuladas e não tripuladas no espaço aéreo não segregado. Este problema pode ser decomposto em questões práticas e teóricas, as quais são abordadas como questões de pesquisa derivadas dos objetivos do estudo.

Questão Geral da Pesquisa (QGP)

- Como desenvolver interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual para simulações que suportem a integração segura de aeronaves tripuladas e não tripuladas no espaço aéreo não segregado, atendendo aos requisitos operacionais e de segurança da FAB?

Questões Primárias de Pesquisa (QPP)

1. QPP1: Quais são os requisitos de acessibilidade e usabilidade para o desenvolvimento de interfaces de realidade virtual eficazes para simulações de integração de aeronaves?
2. QPP2: Como as interfaces de VR podem ser integradas com ferramentas de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) para melhorar a análise e a validação das simulações?

Questões Específicas de Pesquisa (QEP)

QPP1: Quais são os requisitos de acessibilidade e usabilidade para o desenvolvimento de interfaces de realidade virtual eficazes para simulações de integração de aeronaves?

1. QEP1.1: Quais são as melhores práticas em design de interfaces acessíveis para ambientes de realidade virtual?
2. QEP1.2: Quais funcionalidades de acessibilidade devem ser incorporadas nas interfaces de VR para atender a diferentes perfis de usuários na FAB?

3. QEP1.3: Como garantir que as interfaces de VR sejam intuitivas e fáceis de usar em cenários complexos de simulação de aeronaves?

QPP2: Como as interfaces de VR podem ser integradas com ferramentas de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) para melhorar a análise e a validação das simulações?

1. QEP2.1: Quais são os métodos mais eficazes para integrar VR e MBSE em simulações de sistemas complexos?
2. QEP2.2: Como as interfaces de VR podem ser utilizadas para validar e verificar modelos de sistemas de aeronaves da FAB?
3. QEP2.3: Quais são os desafios técnicos na integração de VR com MBSE e como podem ser superados?

1.6 Metodologia

Para abordar essas questões, será adotada uma metodologia teórica baseada em revisão de literatura e análise documental. A metodologia inclui:

1. Revisão da Literatura: Será realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente em artigos científicos, livros, relatórios técnicos e normas relevantes sobre design de interfaces acessíveis, tecnologias de VR, MBSE e simulações de sistemas de aeronaves. Esta revisão fornecerá uma base sólida para compreender o estado atual da tecnologia e identificar as melhores práticas.

2. Análise Comparativa: Será conduzido um estudo comparativo de casos práticos e exemplos de implementação de interfaces acessíveis em VR e MBSE em diferentes indústrias, com ênfase especial na aviação militar. Este estudo permitirá identificar abordagens bem-sucedidas e desafios comuns, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento das interfaces.

3. Documentação e Análise Crítica: A documentação detalhada dos métodos e resultados das análises será seguida de uma avaliação crítica para identificar pontos fortes e áreas de melhoria nas abordagens propostas. Esta documentação será essencial para criar diretrizes claras e acionáveis para o desenvolvimento de interfaces acessíveis em VR para simulações de integração segura de aeronaves.

Esta abordagem metodológica permitirá uma compreensão abrangente dos desafios e soluções para o desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de VR, contribuindo para a segurança e eficiência das operações aéreas da FAB.

1.7 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é analisar o desenvolvimento de interfaces acessíveis utilizando tecnologias de realidade virtual (VR) para simulação de sistemas da Força Aérea Brasileira (FAB), com foco na integração segura de aeronaves tripuladas e não tripuladas no espaço aéreo não segregado. Este estudo é essencial para melhorar a segurança e a eficiência nas operações aéreas da FAB, promovendo um ambiente operacional mais seguro e dinâmico.

As etapas necessárias para alcançar o objetivo geral do estudo são detalhadas nos seguintes objetivos específicos:

- Identificar os requisitos de acessibilidade e segurança necessários para o desenvolvimento das interfaces. Para isso, será realizada uma revisão abrangente da literatura existente sobre acessibilidade de interfaces em operações aéreas.
- Analisar como as tecnologias de Natural User Interface (NUI) e VR podem ser aplicadas para criar interfaces acessíveis. Serão exploradas as capacidades das tecnologias NUI e VR em melhorar a interação usuário-sistema. Esta análise incluirá uma avaliação crítica das vantagens e limitações dessas tecnologias no contexto de simulações de sistemas complexos.
- Elaborar a integração dessas interfaces em ferramentas de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE). Será realizada uma análise sobre a integração de interfaces VR nas ferramentas MBSE. A investigação incluirá uma revisão dos métodos e frameworks existentes para a integração de VR e MBSE.
- Avaliar a eficácia das interfaces em melhorar a acessibilidade na integração de aeronaves. Serão considerados aspectos como a redução de erros operacionais, aumento da eficiência das operações e melhoria da experiência do usuário. A análise incluirá a aplicação de métricas teóricas de usabilidade e acessibilidade.
- Documentar e analisar os resultados obtidos nos testes de usabilidade, acessibilidade e simulações de integração. Toda a documentação será detalhada, incluindo os métodos utilizados, os dados coletados e as análises realizadas. Esta análise permitirá uma compreensão profunda do impacto das interfaces na operação segura e eficiente das aeronaves.
- Propor as diretrizes do método para a implementação de interfaces acessíveis em simulações de sistemas da FAB. Com base na análise, serão propostas recomendações práticas para o desenvolvimento e integração de interfaces acessíveis utilizando VR e NUI, estruturando um método eficiente para os decisores da FAB.

2 Referencial Teórico

O presente capítulo tem como objetivo fundamentar teoricamente o estudo sobre o desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual para simulações de integração segura de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB). A complexidade inerente a este tipo de sistema exige uma abordagem robusta e multifacetada, incorporando conceitos avançados de engenharia de sistemas. Para tanto, são abordados três tópicos centrais: o conceito de Sistema de Sistemas (SoS), a Engenharia de Sistemas aplicada a SoS (SoSE) e a Engenharia Orientada a Modelos (MBSE). Cada um desses tópicos oferece uma perspectiva essencial para compreender e manejar a interdependência, a integração e a complexidade dos sistemas envolvidos. Inicialmente, será discutido o conceito de Sistema de Sistemas, destacando suas características distintivas e a importância de sua operacionalidade independente. Em seguida, exploraremos a Engenharia de Sistemas para SoS, abordando as técnicas e desafios na coordenação e integração de sistemas autônomos. Por fim, será apresentada a Engenharia Orientada a Modelos, enfatizando a importância dos modelos formais no gerenciamento da complexidade e na melhoria da comunicação e eficiência ao longo do ciclo de vida do sistema.

2.1 Sistema de Sistemas

O conceito de Sistema de Sistemas (SoS) tem se tornado cada vez mais relevante à medida que a complexidade e a interconectividade dos sistemas modernos aumentam. Um SoS é uma composição de múltiplos sistemas independentes que, quando integrados, criam capacidades e funções que não poderiam ser alcançadas individualmente (MICOUIN, 2014). Esses sistemas constituintes são operacionais por si mesmos, mas, ao serem combinados, resultam em novos comportamentos e propriedades emergentes. Essa integração é fundamental em contextos como a defesa, onde a coordenação de múltiplas plataformas e sistemas é crucial para o sucesso de operações complexas.

De acordo com Micouin (2014), um SoS apresenta cinco características distintivas que o diferenciam de um sistema tradicional. A primeira dessas características é a operacionalidade independente. Isso significa que cada sistema componente é capaz de operar

de forma autônoma, desempenhando suas funções principais sem a necessidade de coordenação constante com outros sistemas do SoS. Em outras palavras, mesmo isolados, os sistemas componentes são funcionais e têm a capacidade de cumprir suas missões. Essa autonomia operacional é essencial, pois permite que cada sistema realize suas tarefas específicas enquanto contribui para os objetivos globais do SoS.

A segunda característica é o gerenciamento independente. Isso implica que os sistemas constituintes são geridos de forma autônoma, cada um com seu próprio conjunto de objetivos, recursos e estruturas de controle. Essa independência gerencial significa que a coordenação e a integração dos sistemas dentro de um SoS exigem abordagens de gerenciamento específicas, que assegurem que os objetivos globais sejam atingidos sem comprometer a autonomia dos sistemas individuais. Este gerenciamento descentralizado pode trazer desafios, especialmente em termos de coordenação e alinhamento estratégico, mas também oferece flexibilidade e resiliência operacional.

A distribuição geográfica é a terceira característica e refere-se ao fato de que os componentes de um SoS estão frequentemente espalhados por diferentes localizações geográficas. Esta dispersão exige mecanismos robustos de comunicação e coordenação para assegurar que os sistemas possam interagir eficazmente, independentemente de suas localizações físicas. A distribuição geográfica é comum em cenários militares, onde unidades e plataformas estão posicionadas em diversos pontos estratégicos e precisam colaborar para alcançar objetivos comuns.

A complexidade evolutiva, a quarta característica, denota que os SoS são dinâmicos e capazes de evoluir ao longo do tempo. Sistemas constituintes podem ser adicionados ou removidos em resposta às mudanças nas necessidades e nos objetivos, permitindo que o SoS se adapte a novos contextos e desafios operacionais. Esta adaptabilidade é crucial para a longevidade e a relevância de um SoS, pois permite que ele responda de maneira flexível às mudanças no ambiente operacional e tecnológico. A evolução contínua do SoS também envolve a atualização de tecnologias e a incorporação de inovações que podem melhorar a eficácia geral do sistema.

Por fim, a complexidade emergente descreve comportamentos e propriedades que surgem das interações entre os sistemas constituintes e que não podem ser previstos apenas com base no conhecimento dos sistemas individuais. Este comportamento emergente é um dos aspectos mais desafiadores dos SoS, pois requer uma compreensão profunda das dinâmicas intersistêmicas e dos efeitos que tais interações podem gerar no desempenho global do SoS. A emergência de novas propriedades pode ser tanto benéfica quanto problemática, dependendo de como as interações entre os sistemas são gerenciadas e otimizadas (MICOUIN, 2014).

Essas características implicam que o desenvolvimento e a operação de SoS são subs-

tancialmente mais complexos do que os de sistemas isolados. A integração de múltiplos sistemas requer uma abordagem sistemática que considere as interdependências e a coordenação necessária para atingir os objetivos do SoS, assegurando que a soma dos sistemas individuais resulte em uma funcionalidade maior e mais eficiente. Esta abordagem envolve a aplicação de técnicas avançadas de engenharia de sistemas, como modelagem, simulação e análise de trade-offs, que permitem a previsão e a gestão dos comportamentos emergentes e a otimização do desempenho global do SoS.

A integração de sistemas em um SoS também requer uma infraestrutura robusta de comunicação e troca de dados, que permita a interoperabilidade entre diferentes sistemas. Esta infraestrutura deve suportar a transferência rápida e segura de informações, garantindo que todos os sistemas constituintes possam acessar e compartilhar dados críticos em tempo real. Além disso, a gestão da segurança cibernética é um aspecto fundamental, uma vez que a interconectividade dos sistemas aumenta a vulnerabilidade a ataques cibernéticos.

2.2 Engenharia de Sistemas para SoS

A Engenharia de Sistemas para Sistemas de Sistemas (SoSE) é uma disciplina essencial que aplica os princípios e práticas da engenharia de sistemas ao desenvolvimento, integração e operação de Sistemas de Sistemas (SoS) (HAMMOUDI, 2019). A necessidade de uma abordagem holística para lidar com a complexidade e a interdependência dos sistemas constituintes é reconhecida na SoSE, garantindo que a integração resulte em um desempenho otimizado e alinhado com os objetivos do SoS. Esta abordagem é especialmente relevante em contextos como a defesa, onde a coordenação de múltiplas plataformas e sistemas é fundamental para o sucesso de operações complexas.

A SoSE envolve a aplicação de princípios de engenharia de sistemas em três níveis distintos: a engenharia dos sistemas constituintes, a engenharia da integração entre esses sistemas e a engenharia do SoS como um todo. No nível dos sistemas constituintes, cada sistema individual que compõe o SoS deve ser projetado para ser funcional de forma autônoma, mas também capaz de se integrar eficazmente com outros sistemas. Isso requer uma compreensão detalhada dos requisitos operacionais e técnicos de cada sistema, garantindo que eles possam operar de maneira independente enquanto contribuem para os objetivos globais do SoS. Esta fase é crítica, pois estabelece a base sobre a qual a integração e a coordenação serão construídas.

No nível da engenharia da integração, o foco é a engenharia das interfaces e interações entre os sistemas constituintes. A integração eficaz desses sistemas requer a definição de protocolos de comunicação, padrões de interoperabilidade e mecanismos de coordenação

que permitam que os sistemas interajam de maneira harmoniosa. Esta fase é crucial para assegurar que a soma dos sistemas resulte em uma funcionalidade superior e não em conflitos ou ineficiências operacionais. Os desafios incluem a coordenação de diferentes tecnologias, linguagens de programação e plataformas, além de garantir que os dados possam ser compartilhados e utilizados de maneira eficiente entre os sistemas. A integração bem-sucedida permite que os sistemas trabalhem juntos de maneira sinérgica, criando novas capacidades e melhorando o desempenho geral do SoS.

No nível da engenharia do SoS como um todo, a análise e o design consideram os objetivos e requisitos do sistema integrado. Esta abordagem holística envolve a modelagem do comportamento emergente e a análise de trade-offs para otimizar o desempenho do SoS. A engenharia do SoS como um todo é fundamental para garantir que os sistemas não apenas funcionem bem individualmente, mas também contribuam para o sucesso global do SoS. Esta fase também envolve a consideração de fatores como segurança, resiliência e adaptabilidade, que são essenciais para a operação contínua e eficaz do SoS em ambientes dinâmicos e frequentemente imprevisíveis (HAMMOUDI, 2019).

Os principais desafios da SoSE incluem a coordenação e gestão de múltiplos sistemas autônomos, cada um com suas próprias metas e estruturas de gerenciamento. A interoperabilidade é um desafio crítico, exigindo a definição e implementação de padrões e protocolos que permitam a integração sem falhas. Além disso, a complexidade emergente deve ser prevista e gerenciada, exigindo uma compreensão profunda das dinâmicas inter-sistêmicas. A flexibilidade e adaptabilidade do SoS também são essenciais, permitindo que o sistema se ajuste a novas circunstâncias e desafios operacionais. A gestão eficaz dessas interdependências e a coordenação das atividades entre diferentes sistemas e equipes são fundamentais para o sucesso da SoSE.

Para enfrentar esses desafios, a SoSE emprega técnicas avançadas de modelagem e simulação. Essas técnicas permitem a análise e a visualização das interações entre sistemas e do comportamento global do SoS. Ferramentas de engenharia de sistemas, como a Systems Modeling Language (SysML), são frequentemente utilizadas para criar representações formais dos sistemas e suas interações. Estas ferramentas ajudam a garantir que todos os aspectos do SoS sejam considerados e otimizados, desde a fase de design até a operação. A modelagem e a simulação permitem que os engenheiros testem diferentes cenários e identifiquem possíveis problemas antes que eles ocorram, proporcionando uma visão mais clara e detalhada do funcionamento do SoS.

A integração da SoSE com a Engenharia Orientada a Modelos (MBSE) é particularmente vantajosa. Os modelos MBSE podem ser utilizados para representar não apenas cada sistema constituinte, mas também as interações e o comportamento emergente do SoS. Isso permite uma abordagem mais sistemática e controlada para o desenvolvimento e a evolução de SoS, garantindo que os objetivos globais sejam atingidos de forma eficaz e

eficiente. A MBSE também suporta a documentação e a rastreabilidade dos requisitos e decisões de design, o que é essencial para a conformidade regulatória e a gestão do ciclo de vida do sistema. A aplicação da MBSE em projetos de SoS permite uma visão integrada e holística do sistema, onde todas as partes interessadas podem colaborar de maneira mais eficaz e os problemas podem ser identificados e resolvidos precocemente.

Além disso, a SoSE requer uma infraestrutura robusta de comunicação e troca de dados, que permita a interoperabilidade entre diferentes sistemas. Esta infraestrutura deve suportar a transferência rápida e segura de informações, garantindo que todos os sistemas constituintes possam acessar e compartilhar dados críticos em tempo real. A gestão da segurança cibernética é outro aspecto fundamental, uma vez que a interconectividade dos sistemas aumenta a vulnerabilidade a ataques cibernéticos. As ameaças cibernéticas podem comprometer a integridade e a disponibilidade dos sistemas, tornando essencial a implementação de medidas de segurança robustas e proativas.

A aplicação prática da SoSE pode ser observada em diversas áreas, como a defesa, a gestão de emergências, o transporte e a saúde. Em cada um desses contextos, a capacidade de coordenar múltiplos sistemas para alcançar objetivos comuns pode resultar em melhorias significativas na eficiência e na eficácia das operações. No setor de defesa, por exemplo, a coordenação de sistemas de radar, aeronaves, navios e unidades terrestres em um SoS pode proporcionar uma consciência situacional superior e uma capacidade de resposta mais rápida a ameaças. Na gestão de emergências, a integração de sistemas de comunicação, logística e resgate pode melhorar a coordenação e a eficácia das operações de resposta a desastres.

2.3 Engenharia de Sistemas Orientada a Modelos

A Engenharia Orientada a Modelos (Model-Based Systems Engineering - MBSE) representa uma abordagem metodológica inovadora e eficaz para o desenvolvimento de sistemas complexos. Ao contrário das metodologias tradicionais que dependem fortemente de documentação textual, a MBSE utiliza modelos formais como artefatos principais ao longo de todo o ciclo de vida do sistema (MICOUIN, 2014). Esta abordagem permite uma representação precisa e abrangente dos requisitos, da arquitetura, do comportamento e dos dados do sistema, facilitando a comunicação, a análise e a integração de diferentes componentes do sistema.

Um dos principais benefícios da MBSE é a melhoria significativa na comunicação entre as partes interessadas. Modelos visuais e formais facilitam a troca de informações, reduzindo ambiguidades e promovendo um entendimento comum entre engenheiros, gerentes de projeto e outras partes envolvidas. Esta clareza é essencial para o sucesso de

projetos complexos, onde a má comunicação pode levar a erros dispendiosos e atrasos. A MBSE promove a criação de uma linguagem comum que todas as partes interessadas podem entender, permitindo uma colaboração mais eficaz e uma tomada de decisão mais informada.

Além da melhoria na comunicação, a MBSE oferece uma capacidade avançada de gerenciamento da complexidade. Sistemas modernos são frequentemente compostos por múltiplos componentes interdependentes, cada um com suas próprias funções e requisitos. A MBSE permite uma melhor gestão desta complexidade ao capturar detalhes intrincados e as interações entre diferentes partes do sistema em modelos estruturados (HAMMOUDI, 2019). Esses modelos podem ser analisados para identificar potenciais problemas e otimizar o design do sistema, garantindo que todos os componentes funcionem de maneira harmoniosa e eficiente.

Outro aspecto crucial da MBSE é a verificação e validação antecipadas. Através de simulações e análises automatizadas, a MBSE permite a verificação e validação precoce dos requisitos e do design. Isso ajuda a identificar e corrigir problemas antes que se tornem críticos, melhorando a qualidade do sistema e reduzindo o tempo e os custos associados a retrabalhos e correções tardias. A verificação antecipada é particularmente importante em sistemas críticos, onde falhas podem ter consequências graves.

A MBSE também promove a reusabilidade e a manutenção dos modelos. Modelos bem estruturados e documentados podem ser reutilizados em diferentes projetos, melhorando a eficiência e reduzindo os custos de desenvolvimento. Esta reusabilidade é especialmente valiosa em projetos de longo prazo ou em organizações que desenvolvem vários sistemas semelhantes. A capacidade de reutilizar modelos reduz a necessidade de começar do zero em cada novo projeto, acelerando o processo de desenvolvimento e garantindo a consistência entre diferentes sistemas.

A MBSE é suportada por várias ferramentas e linguagens de modelagem, sendo a Systems Modeling Language (SysML) uma das mais proeminentes. A SysML é uma extensão da Unified Modeling Language (UML) e foi especificamente desenvolvida para atender às necessidades da engenharia de sistemas. Ela permite a criação de diagramas que representam diversos aspectos do sistema, incluindo requisitos, arquitetura, comportamento e parâmetros (HAMMOUDI, 2019). Os diagramas de requisitos capturam os requisitos do sistema e suas relações, enquanto os diagramas de estrutura representam a arquitetura do sistema, incluindo componentes e suas interconexões. Os diagramas de comportamento descrevem como o sistema se comporta em resposta a eventos e estímulos, e os diagramas paramétricos são usados para análises quantitativas e verificações de consistência.

A integração da MBSE com outras metodologias de engenharia de sistemas, como a Engenharia de Sistemas para Sistemas de Sistemas (SoSE), é particularmente vantajosa.

Os modelos MBSE podem ser utilizados para representar não apenas cada sistema constituinte, mas também as interações e o comportamento emergente do SoS. Isso permite uma abordagem mais sistemática e controlada para o desenvolvimento e a evolução de SoS, garantindo que os objetivos globais sejam atingidos de forma eficaz e eficiente. A MBSE também suporta a documentação e a rastreabilidade dos requisitos e decisões de design, o que é essencial para a conformidade regulatória e a gestão do ciclo de vida do sistema.

A aplicação da MBSE em projetos de SoS permite uma visão integrada e holística do sistema, onde todas as partes interessadas podem colaborar de maneira mais eficaz e os problemas podem ser identificados e resolvidos precocemente. Além disso, a MBSE facilita a documentação de todos os aspectos do sistema, desde os requisitos iniciais até os detalhes finais de implementação. Esta documentação detalhada é crucial para a manutenção e atualização do sistema ao longo do tempo, garantindo que ele continue a atender aos requisitos e a operar de maneira eficaz.

A MBSE também oferece suporte robusto para a análise de trade-offs e a tomada de decisões. Ao modelar diferentes alternativas de design e suas implicações, os engenheiros podem avaliar os trade-offs entre diferentes opções e tomar decisões informadas que otimizem o desempenho do sistema. Esta capacidade de análise é particularmente importante em sistemas complexos, onde múltiplos fatores precisam ser considerados e equilibrados. Além disso, a MBSE promove uma abordagem iterativa e incremental para o desenvolvimento de sistemas. Em vez de tentar definir e implementar todo o sistema de uma vez, os modelos permitem que os engenheiros desenvolvam e validem componentes e subsistemas de maneira incremental. Isso reduz o risco de grandes falhas e permite que problemas sejam identificados e corrigidos em estágios iniciais do desenvolvimento.

2.4 Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos Militares

O conceito de Sistema de Sistemas (SoS) destaca-se pela sua abordagem integrada e coordenada de múltiplos sistemas independentes que colaboram para atingir objetivos comuns. No contexto da Força Aérea Brasileira (FAB), a implementação de um SoS permite a operação sinérgica de diferentes plataformas, incluindo aeronaves tripuladas e não tripuladas, radares, sistemas de comunicação e outras infraestruturas críticas. Sublinha-se a importância da interoperabilidade e da coordenação entre sistemas como fatores essenciais para o sucesso de operações militares complexas. A capacidade de diferentes sistemas se comunicarem e trabalharem juntos de maneira coesa é fundamental para a realização de missões críticas, onde a velocidade e a precisão das respostas são cruciais. O SoS permite uma gestão mais eficaz dos recursos e uma resposta mais ágil e coordenada a ameaças e

situações de emergência.

A análise detalhada de como os sistemas independentes dentro de um SoS mantêm suas funcionalidades autônomas, ao mesmo tempo em que colaboram para alcançar objetivos maiores, inclui a capacidade de cada sistema realizar suas funções principais de forma independente, mas com a flexibilidade de se integrar e operar em conjunto com outros sistemas quando necessário. Esta dualidade de independência operacional e coordenação integrada é um aspecto crucial para a eficácia do SoS, especialmente em cenários de defesa. Uma visão aprofundada sobre as técnicas de modelagem e simulação usadas na SoSE para prever e otimizar o comportamento de SoS inclui a utilização de ferramentas de simulação que permitem a análise detalhada das interações entre sistemas, possibilitando a identificação de potenciais problemas e a implementação de soluções antes da fase operacional. A capacidade de simular cenários complexos e testar diferentes configurações de sistemas é crucial para a validação de designs e para garantir que os sistemas atendam aos requisitos operacionais.

Alguns estudos sugerem a discussão sobre a necessidade de uma abordagem holística na SoSE. Isso envolve considerar o SoS como um todo integrado, em vez de focar apenas nos sistemas individuais. A abordagem holística permite uma melhor gestão das interdependências e garante que todas as partes do SoS estejam alinhadas com os objetivos gerais da missão. No contexto da FAB, isso é particularmente importante, pois envolve a coordenação de múltiplos sistemas em ambientes operacionais dinâmicos e frequentemente imprevisíveis. Além disso, discute-se a aplicação da MBSE na certificação e validação de sistemas aeronáuticos militares. A capacidade de criar modelos precisos e detalhados permite uma avaliação mais eficaz da conformidade com os requisitos de segurança e desempenho. Isto é particularmente importante para a certificação de novos sistemas e para a implementação de melhorias em sistemas existentes. A utilização de MBSE promove a confiança nos processos de validação e verificação, assegurando que os sistemas atendam às expectativas e padrões rigorosos estabelecidos pela autoridade certificadora.

3 Revisão Sistemática

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo fundamentar teoricamente o desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual (VR) para simulações de integração segura de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB). No contexto da FAB, tecnologias de VR são essenciais para criar ambientes de simulação imersivos que melhoram a compreensão e o controle das operações. Interfaces acessíveis e intuitivas são cruciais para maximizar o potencial dessas tecnologias, garantindo que operadores de diferentes níveis de habilidade possam interagir eficazmente com os sistemas.

As interfaces de usuário naturais (NUI) e outras tecnologias assistivas oferecem formas inovadoras de interação, como gestos e comandos de voz, que aumentam a usabilidade e a acessibilidade das simulações de VR. A integração de metodologias de Engenharia de Sistemas para Sistemas de Sistemas (SoS) e Engenharia Orientada a Modelos (MBSE) é fundamental para gerenciar a complexidade e garantir a interoperabilidade dos componentes do sistema de simulação. Esta revisão explorará tecnologias e metodologias relevantes para o desenvolvimento de interfaces acessíveis em VR, com foco na aplicação para simulações da FAB.

3.1 Tecnologias de Interface Natural

Martins (2020) fornece uma análise detalhada e comparativa de várias tecnologias de Interface Natural do Usuário (NUI), destacando suas aplicações, vantagens e desafios. As NUIs representam uma evolução significativa na interação humano-computador (IHC), permitindo que os usuários interajam com sistemas através de ações naturais como gestos, movimentos oculares e comandos de voz. Concentra-se em explorar como essas tecnologias podem ser aplicadas para melhorar a usabilidade e a acessibilidade, especialmente em contextos assistivos e de simulação.

As NUIs são caracterizadas pela sua capacidade de utilizar as habilidades naturais dos usuários para a interação com sistemas computacionais, eliminando a necessidade de dispositivos intermediários como teclados e mouses. Esta abordagem visa criar uma experiência de usuário mais intuitiva e eficiente, facilitando o uso de tecnologias por um

público mais amplo, incluindo indivíduos com diversas habilidades e limitações físicas.

Destacam-se várias tecnologias de NUI, cada uma com suas características únicas e aplicações específicas. Por exemplo, o Emotiv EPOC é um dispositivo de interface cerebral que captura sinais elétricos do cérebro para controlar interfaces computacionais. Este dispositivo é particularmente útil para usuários com limitações físicas severas, proporcionando uma maneira alternativa de interação sem a necessidade de movimentos físicos. A inovação do Emotiv EPOC reside na sua capacidade de traduzir pensamentos em ações, oferecendo uma nova dimensão de acessibilidade e controle.

O Microsoft Kinect é outro dispositivo analisado por Martins (2020), conhecido por seu sensor de movimento que utiliza câmeras e sensores de profundidade para rastrear os movimentos do corpo do usuário. O Kinect é amplamente utilizado em jogos e aplicações de realidade aumentada e virtual, permitindo uma interação sem contato físico direto. A precisão e a abrangência do rastreamento de movimento do Kinect o tornam uma ferramenta poderosa para criar experiências imersivas e interativas.

O Leap Motion, um dispositivo de rastreamento de movimentos das mãos e dedos, oferece uma precisão elevada para a captura de gestos. Este dispositivo é frequentemente utilizado em aplicações de realidade virtual (VR) e aumentada (AR), proporcionando uma experiência de manipulação direta de objetos virtuais. A capacidade do Leap Motion de detectar movimentos sutis das mãos e dedos permite uma interação altamente intuitiva e natural, ideal para ambientes virtuais onde a precisão e a rapidez são essenciais.

A MYO Armband, uma braçadeira que detecta os movimentos musculares do antebraço, permite o controle de interfaces computacionais através de gestos com a mão e o braço. Este dispositivo é útil para aplicações que requerem liberdade de movimento e controle remoto. A MYO Armband destaca-se por sua capacidade de interpretar sinais musculares, oferecendo uma forma de interação sem a necessidade de contato visual direto, o que é especialmente útil em situações onde a atenção visual do usuário está focada em outra tarefa.

O TOBII Eye Tracker, um dispositivo de rastreamento ocular, segue os movimentos dos olhos do usuário para controlar interfaces. Este dispositivo é particularmente eficaz para usuários com mobilidade reduzida e em contextos onde o uso das mãos não é prático. O rastreamento ocular permite uma interação precisa e rápida, tornando o TOBII Eye Tracker uma ferramenta valiosa para a criação de interfaces acessíveis e eficientes.

Uma contribuição inovadora do trabalho analisado por Martins (2020) é a proposta de um projeto chamado "Interface Óculos Mouse"(IOM), que utiliza uma interface natural para permitir que usuários fisicamente desafiados controlem o cursor do computador através de movimentos da cabeça. Este projeto visa desenvolver um protótipo que possa ser industrializado, identificando as funcionalidades necessárias para aprimorar a acessibi-

lidade e a usabilidade. O IOM representa uma aplicação prática das NUIs, demonstrando seu potencial para transformar a forma como as pessoas interagem com a tecnologia.

Conclui-se que as NUIs têm o potencial de revolucionar a interação humano-computador, tornando a tecnologia mais acessível e intuitiva para todos os usuários. A análise comparativa de dispositivos como Emotiv EPOC, Microsoft Kinect, Leap Motion, MYO Armband e TOBII Eye Tracker fornece uma visão abrangente das capacidades e limitações dessas tecnologias, oferecendo insights valiosos para futuros desenvolvimentos na área de interfaces naturais.

TABELA 3.1 – Comparação das características dos dispositivos estudados.

Dispositivo	Entrada de Dados	Software de Configuração	Tecnologias de Desenvolvimento
Emotiv EPOC	Eletroencefalografia	https://emotiv.gitbook.io/cortex-api https://github.com/Emotiv/cortex-example	C#
Leap Motion	Gestos	https://github.com/ultraLeap	Unity, Unreal Engine, Python
MYO	Eletromiografia	https://github.com/thalmiclabs	Java, C++, C#, Unity
TOBII	Eletro-oculograma	https://github.com/tobiiipro	C, C++, C#, Unity
Microsoft Kinect	Gestos e Voz	https://github.com/microsoft/Azure-Kinect-Sensor-SDK	C, C++, C#, Visual Studio

3.2 Design de Interface de Jogos Digitais

Costa (2023) apresenta uma abordagem detalhada e inovadora para o design de interfaces específicas para jogos digitais. Ele enfatiza a necessidade de metodologias próprias devido às características únicas dos jogos digitais, que diferem fundamentalmente de outras categorias de software. A interface de um jogo digital deve não apenas facilitar a usabilidade, mas também promover a imersão e a exploração, elementos essenciais para a experiência do jogador. A interface de um jogo digital serve como a conexão vital entre o jogador e o sistema, sendo crucial para a facilitação da interação e para a melhoria da experiência de jogo. Enfatiza-se que a usabilidade em jogos vai além da eficiência e eficácia tradicionais, abrangendo elementos como ludicidade, exploração e desafio. A metodologia proposta integra esses elementos desde o início do processo de design, garantindo que a interface contribua positivamente para a experiência geral do jogo. A integração de aspectos de diversão e imersão no design de interfaces é uma contribuição significativa, destacando a importância de considerar a experiência do usuário de forma holística.

Uma das contribuições inovadoras de Costa (2023) é a integração de metodologias ágeis, como Scrum e Agile, no processo de design de interfaces para jogos digitais. Essas metodologias, amplamente reconhecidas por sua capacidade de adaptação rápida e desenvolvimento iterativo, são aplicadas para tornar o processo de design mais dinâmico e eficiente. A abordagem iterativa permite ajustes rápidos com base no feedback contínuo dos usuários, garantindo que as interfaces evoluam conforme as necessidades e expectativas dos jogadores. Este enfoque não apenas melhora a qualidade do produto final, mas

também facilita uma comunicação e colaboração mais eficazes entre as equipes de design e desenvolvimento.

A acessibilidade é um aspecto frequentemente negligenciado no design de interfaces de jogos digitais, mas Costa (2023) aborda esse tema de maneira abrangente e inovadora. Ele sugere a implementação de funcionalidades como ajuste de tamanho e cor de fonte, regulação do espectro de cor, balanço de som e mapeamento de controles, que são essenciais para garantir que todos os usuários possam desfrutar plenamente dos jogos, mantendo uma abordagem centrada no usuário. Observa-se uma metodologia que enfatiza a importância da interatividade e do feedback contínuo, elementos cruciais para criar uma experiência de jogo coesa e envolvente. As interfaces devem ser intuitivas e oferecer feedback adequado ao jogador, facilitando a aprendizagem e a imersão.

A personalização das interfaces de jogos é outra inovação importante apresentada. Permitir que os jogadores personalizem elementos da interface, como a disposição dos controles e as configurações de exibição, pode melhorar significativamente a experiência do usuário. A personalização atende às preferências individuais dos jogadores, aumentando a satisfação e o engajamento. Argumenta-se que a inclusão de opções de personalização deve ser uma consideração central no design de interfaces, promovendo uma experiência de jogo mais adaptável e agradável.

Apresentam-se várias inovações, incluindo a integração de metodologias ágeis no design de interfaces de jogos digitais, que permite um desenvolvimento mais rápido e eficiente. A proposta de incorporar acessibilidade e personalização desde as fases iniciais do design garante que os jogos sejam inclusivos e adaptáveis a uma ampla gama de usuários. A utilização de testes iterativos e prototipagem para refinar o design das interfaces é outra inovação importante, permitindo que os designers experimentem diferentes abordagens e ajustem o design com base no feedback real dos usuários. A proposta de um framework metodológico específico para o design de interfaces de jogos digitais, que combina elementos teóricos e práticos, é uma contribuição significativa para uma estrutura clara e prática para o desenvolvimento de interfaces, facilitando a criação de experiências de jogo envolventes e intuitivas.

Enfatiza-se a importância de protótipos de baixa e alta fidelidade em diferentes fases do desenvolvimento. Protótipos de baixa fidelidade são utilizados para explorar conceitos e identificar problemas potenciais de usabilidade, enquanto protótipos de alta fidelidade são desenvolvidos para validar a funcionalidade e a estética da interface em condições mais realistas. Este enfoque iterativo permite refinamentos contínuos com base em feedbacks dos usuários, garantindo que as interfaces sejam eficazes e acessíveis.

3.3 Integração de Wearables em Interfaces

A pesquisa-ação é uma metodologia participativa que envolve a colaboração ativa entre pesquisadores e participantes para resolver problemas concretos. No design de interfaces para jogos digitais, a pesquisa-ação permite que designers trabalhem diretamente com usuários finais para identificar necessidades, testar soluções e implementar melhorias. Este método é particularmente eficaz para garantir que as interfaces sejam intuitivas e acessíveis, pois incorpora o feedback dos usuários em todas as etapas do desenvolvimento. O ciclo de planejamento, ação, observação e reflexão característico da pesquisa-ação é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. Esta abordagem é adequada para projetos de design de interfaces, pois promove uma compreensão profunda das experiências e expectativas dos usuários. Além disso, a pesquisa-ação facilita a adaptação das interfaces às necessidades específicas de diferentes perfis de usuários, garantindo maior usabilidade.

O desenvolvimento de interfaces avançadas para jogos digitais envolve a utilização de diversas tecnologias de interface natural (NUI) e softwares de simulação. Dispositivos como o Emotiv EPOC capturam sinais elétricos do cérebro, permitindo o controle de interfaces através de pensamentos. O Kinect, da Microsoft, utiliza sensores de movimento para rastrear os movimentos do corpo, facilitando uma interação sem contato físico. O TO-BII Eye Tracker rastreia movimentos oculares; Leap Motion e MYO Armband capturam movimentos das mãos e músculos, respectivamente, proporcionando interações precisas e intuitivas.

Softwares de simulação como Unity e Unreal Engine são amplamente utilizados no desenvolvimento de jogos digitais. Unity é uma plataforma flexível e poderosa para a criação de jogos 2D e 3D, enquanto Unreal Engine é reconhecido por seus gráficos avançados e capacidade de criar ambientes altamente realistas. Ambos os softwares suportam a integração de dispositivos NUI, permitindo a criação de experiências de jogo imersivas e acessíveis. Esses softwares facilitam a criação de protótipos de alta fidelidade que podem ser testados e refinados de acordo com o feedback dos usuários.

Simão (2021) explora o uso de wearables para detecção de gestos e controle de jogos. França dos Santos realiza uma série de experimentos comparativos para avaliar a usabilidade e eficácia de diferentes dispositivos NUI. Ele destaca que wearables, como o MYO Armband, oferecem uma maneira intuitiva e natural de interagir com jogos, reduzindo a curva de aprendizado e aumentando a imersão. Os estudos de caso demonstram de forma detalhada como a tecnologia de detecção de gestos pode ser aplicada para criar interfaces mais acessíveis e intuitivas. A pesquisa concentra-se no uso do MYO Armband, um dispositivo wearable que detecta os movimentos musculares do antebraço, permitindo o controle preciso e natural de interfaces de jogos digitais.

A análise detalhada dos desafios técnicos começa pela precisão dos sensores. Discute-se como a precisão na detecção de gestos é crucial para garantir uma experiência de usuário fluida e sem frustrações. França dos Santos identifica que a precisão dos sensores pode ser afetada por fatores como a variabilidade dos sinais musculares entre diferentes usuários e a interferência de ruídos elétricos. Para superar esses desafios, propõe-se a implementação de algoritmos de filtragem de sinal e técnicas de calibração personalizada que ajustam o sistema às características específicas de cada usuário. Essas soluções visam aumentar a precisão e a consistência da detecção de gestos, melhorando a responsividade do sistema.

A latência na detecção de gestos é outro desafio técnico significativo. A latência refere-se ao tempo que leva para que um gesto detectado seja traduzido em uma ação no jogo, e uma latência elevada pode prejudicar a experiência de jogo ao introduzir atrasos perceptíveis. França dos Santos propõe várias abordagens para minimizar a latência, incluindo o uso de hardware de processamento rápido, otimização dos algoritmos de detecção de gestos e implementação de técnicas de predição de movimento que antecipam os gestos do usuário com base em padrões de movimento anteriores. Essas técnicas não apenas reduzem a latência, mas também aumentam a fluidez e a naturalidade da interação.

Os resultados dos experimentos realizados por França dos Santos mostram que a integração de wearables no design de interfaces de jogos pode melhorar significativamente a experiência do usuário. Especificamente, os testes demonstram que o uso do MYO Armband permite uma interação mais intuitiva e envolvente, comparada aos métodos tradicionais de controle, como teclados e mouses. A pesquisa também destaca que os usuários relataram um aumento na sensação de imersão e controle durante o jogo, o que é crucial para uma experiência de jogo satisfatória. A pesquisa fornece uma base teórica e empírica sólida para o uso de wearables na criação de interfaces acessíveis. A implementação de técnicas avançadas de detecção de gestos e a consideração cuidadosa dos desafios técnicos demonstram uma abordagem científica rigorosa, que pode ser aplicada a uma variedade de contextos além dos jogos digitais.

3.4 Interfaces Tangíveis em Simulações de Voo

Análise detalhada da literatura sobre a aplicação de tecnologias de realidade virtual (VR) mostrou-se necessária para melhorar o treinamento de pilotos e o desenvolvimento de sistemas aeronáuticos na Força Aérea Brasileira (FAB). Ambos os estudos enfatizam a importância das interfaces tangíveis na criação de experiências de simulação mais realistas e interativas, trazendo inovações significativas que aprimoram a eficácia dos treinamentos e a eficiência dos processos de desenvolvimento.

Explorou-se a aplicação de VR em simuladores de voo, focando em como as interfaces

tangíveis podem ser implementadas para melhorar a interação do usuário com o ambiente de simulação. A pesquisa destaca a utilização de dispositivos de rastreamento de movimento, como Leap Motion e Kinect, que permitem capturar os movimentos das mãos e do corpo do usuário de maneira precisa. Esses dispositivos possibilitam uma interação mais direta e natural com a interface do simulador, permitindo que os pilotos controlem a aeronave e interajam com os instrumentos de bordo por meio de gestos intuitivos.

Uma inovação significativa apresentada é a integração de feedback háptico, que proporciona sensações físicas, como vibrações e resistências, em resposta às ações do usuário. Isso aumenta o realismo da simulação, permitindo que os pilotos sintam as respostas da aeronave às suas ações, o que é crucial para a prática de manobras complexas e procedimentos de emergência. A implementação de feedback háptico também melhora a imersão, tornando a experiência de simulação mais envolvente e eficaz para o aprendizado.

A pesquisa destaca que a utilização de VR em simuladores de voo oferece várias vantagens em termos de custo e segurança. A capacidade de simular uma ampla gama de condições operacionais e meteorológicas em um ambiente virtual elimina os riscos associados ao treinamento de voo real e reduz significativamente os custos operacionais. Além disso, a VR permite a repetição ilimitada de cenários específicos, o que é essencial para a consolidação de habilidades críticas e a preparação para situações de emergência. A repetição contínua em um ambiente controlado permite um desenvolvimento de habilidades mais robusto e uma resposta mais confiante em situações reais.

Destaca-se o desenvolvimento de interfaces que permitem aos usuários manipular diretamente os modelos tridimensionais usando gestos e dispositivos de entrada específicos. A capacidade de interagir fisicamente com os modelos virtuais facilita a compreensão e a análise dos sistemas, permitindo ajustes e otimizações rápidas antes da construção física dos protótipos. Além disso, a VR facilita a colaboração remota, permitindo que equipes de diferentes locais trabalhem juntas em tempo real no desenvolvimento e teste de sistemas complexos.

Outro aspecto inovador discutido é o uso de técnicas de inteligência artificial (IA) para criar agentes virtuais que simulam o comportamento de outros pilotos e aeronaves no espaço aéreo. Esses agentes fornecem um ambiente de simulação dinâmico e interativo, onde os pilotos podem praticar a coordenação e a gestão do tráfego aéreo em condições variadas. A utilização de IA melhora o realismo das simulações e prepara melhor os pilotos para as operações no mundo real. Esses agentes virtuais podem responder de maneira autônoma a diferentes situações, criando cenários imprevisíveis que desafiam e desenvolvem as habilidades dos pilotos.

4 Estrutura do Método

4.1 Metodologia

O desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual (VR) para simulações de integração segura de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB) visa melhorar a eficácia do treinamento de pilotos e a eficiência dos testes de sistemas aeronáuticos (CAMARGO, 2017). Este trabalho de graduação propõe diretrizes e um método estruturado para a implementação dessas interfaces, utilizando conceitos de design, design thinking, e práticas específicas de design de interfaces. A proposta integra insights teóricos e científicos de vários estudos e artigos revisados, oferecendo uma abordagem prática e eficiente para os decisores da FAB.

A proposta de desenvolvimento deste trabalho integra conceitos de design centrado no usuário, design thinking, e práticas específicas de design de interfaces e interação. As diretrizes apresentadas fornecem um método estruturado e eficiente para a implementação de interfaces acessíveis em simulações de sistemas da FAB. A utilização de tecnologias emergentes e práticas inovadoras garante que as soluções desenvolvidas sejam intuitivas, envolventes e eficazes, contribuindo significativamente para a melhoria da segurança e da eficiência das operações aéreas da FAB. As inovações e soluções apresentadas nos artigos revisados serão a base para criar interfaces que atendam às necessidades operacionais da FAB, oferecendo uma plataforma avançada para o treinamento e desenvolvimento de sistemas aeronáuticos.

4.2 Design Centrado no Usuário

O design centrado no usuário é essencial para criar interfaces intuitivas e acessíveis, atendendo às necessidades específicas dos pilotos e operadores da FAB. Esta abordagem inclui etapas fundamentais como pesquisa de usuário, criação de personas e mapeamento da jornada do usuário. A pesquisa de usuário envolve sessões de observação, que capturarão as interações dos usuários com os sistemas atuais. A criação de personas ajudará a guiar o design, garantindo que todas as necessidades e expectativas dos usuários se-

jam consideradas. O mapeamento da jornada do usuário identificará pontos de contato críticos e possíveis obstáculos, permitindo a criação de interfaces que proporcionem uma experiência de usuário positiva e eficiente.

4.3 Design de Interfaces e da Interação

Focar no design de interfaces tangíveis e na interação natural é crucial para criar experiências de usuário envolventes e eficazes (CAMARGO, 2017). A implementação de dispositivos como Leap Motion e Kinect permitirá uma interação mais direta e física com o ambiente de simulação, capturando os movimentos das mãos e do corpo do usuário com precisão. Isso proporcionará uma experiência de controle mais intuitiva e direta, permitindo que os pilotos controlem a aeronave e interajam com os instrumentos de bordo de maneira mais natural. O feedback háptico será implementado para simular sensações físicas, como vibrações e resistências, aumentando o realismo da simulação. Isso permitirá que os pilotos sintam as respostas da aeronave às suas ações, o que é crucial para a prática de manobras complexas e procedimentos de emergência. Além disso, a utilização de modelagem 3D e realidade aumentada (AR) para criar interfaces visuais ricas e interativas facilitará a compreensão e a manipulação de sistemas complexos.

4.4 Integração de Dispositivos de Interface Tangível

Uma proposta específica envolve a implementação de dispositivos de interface tangível (CAMARGO, 2017), como Leap Motion e Kinect, nos sistemas de simulação da FAB. A utilização destes dispositivos permitirá uma interação mais natural e intuitiva, capturando movimentos manuais e corporais com precisão. Isso facilitará a prática de manobras complexas e o treinamento em procedimentos de emergência.

Incorporar feedback háptico aumentará o realismo das simulações. A implementação de vibrações e resistências simuladas permitirá que os pilotos sintam as respostas da aeronave às suas ações, proporcionando uma experiência de treino mais envolvente e realista.

Aplicar elementos de gamificação, como recompensas e desafios, para aumentar a motivação e o engajamento dos usuários (COSTA, 2023). A inclusão de design de som e feedback visual proporcionará uma experiência multisensorial, aumentando a imersão e a eficácia do treinamento. Testes de usabilidade iterativos garantirão que as interfaces sejam continuamente refinadas com base no feedback dos usuários, resultando em soluções funcionais e agradáveis de usar.

4.5 Estrutura do Método

Costa (2023) propõe que a acessibilidade deve ser considerada desde o início do processo de design, utilizando diretrizes e normas reconhecidas, como as Web Content Accessibility Guidelines (WCAG). A implementação de interfaces configuráveis é vista como uma extensão dessa abordagem, permitindo ajustes personalizados que tornam a interação mais confortável e eficiente para um público diversificado.

Baseado nas WCAG e outras normas relevantes, desenvolver diretrizes específicas para a acessibilidade que serão seguidas durante todo o processo de design e desenvolvimento. Essas diretrizes abordarão aspectos como tamanho de fonte, contraste, personalização de controles e feedback multisensorial. Protótipos de baixa e alta fidelidade para explorar e validar os conceitos de acessibilidade e configurabilidade. Realizar testes de usabilidade com usuários reais, incluindo pessoas com diversas habilidades e necessidades, para garantir que as soluções atendam às expectativas e proporcionem uma experiência de usuário positiva.

A proposta de desenvolver interfaces acessíveis e configuráveis, baseada na metodologia de Daniel Leite Costa, oferece uma solução inovadora e cientificamente fundamentada para melhorar a usabilidade e a experiência dos sistemas de simulação da FAB. Integrar acessibilidade e configurabilidade desde o início do processo de design garante que as interfaces sejam adaptáveis a uma ampla gama de usuários, promovendo a inclusão e a eficiência. A implementação dessa solução contribuirá significativamente para a segurança e a eficácia das operações aéreas da FAB, proporcionando uma plataforma avançada para o treinamento e desenvolvimento de sistemas aeronáuticos.

5 Realização

A etapa inicial do método de desenvolvimento de interfaces acessíveis e configuráveis para os simuladores da Força Aérea Brasileira (FAB) foca na pesquisa e definição de diretrizes rigorosas de acessibilidade, conforme as normas WCAG e padrões de acessibilidade para simulações complexas. Em ambientes de treinamento como os utilizados pela FAB, a capacidade de atender às necessidades de uma audiência diversificada e de operadores com diferentes habilidades sensoriais e cognitivas é essencial para garantir segurança e eficiência. Este método enfatiza a criação de uma interface que permita personalizações significativas e facilite a interação em condições que simulem cenários críticos.

5.1 Exemplos e Comparações

Simuladores de treinamento desenvolvidos para pilotos comerciais frequentemente adotam opções de ajuste automático de contraste, em que o brilho e a cor do display se adaptam de acordo com o ambiente. Por exemplo, no simulador de aviação Boeing 737, o sistema de contraste ajustável garante que os dados essenciais permaneçam visíveis, independentemente do nível de luminosidade externa. Para a FAB, uma solução similar poderia ser implementada, permitindo que o contraste se ajuste dinamicamente ou que o operador configure manualmente as configurações de brilho e cores, facilitando o uso em qualquer condição de operação.



FIGURA 5.1 – Simulador Boeing 737.

Além disso, é fundamental oferecer paletas de cores alternativas, considerando que pessoas com daltonismo possam utilizar a interface sem dificuldades. Nesse contexto, simuladores médicos, como os utilizados pela HealthCareSim para treinamento cirúrgico, oferecem paletas alternativas, de acordo com as necessidades do usuário, uma prática que poderia ser adaptada aos sistemas de simulação da FAB, promovendo uma interface inclusiva e versátil. Em uma comparação com simuladores comerciais, observa-se que sistemas como o simulador Airbus A320 possuem tamanhos de fonte fixos, o que, embora eficiente para alguns operadores, pode prejudicar aqueles que necessitam de textos maiores em ambientes de baixa luminosidade.

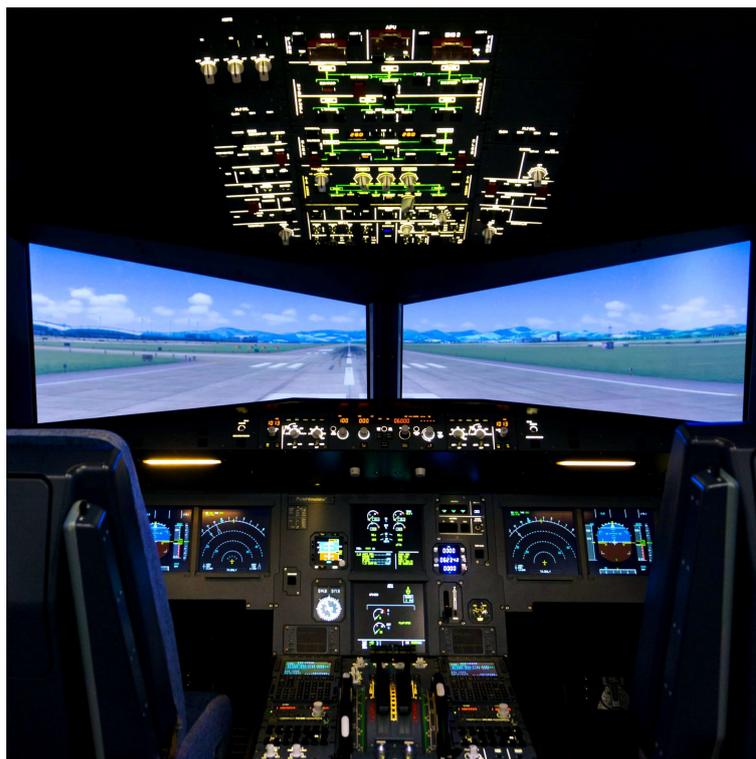


FIGURA 5.2 – Simulador Airbus A320.

Muitos simuladores militares, como os desenvolvidos pela Lockheed Martin para operações de drones, integram ajustes de fonte que permitem que os operadores aumentem ou diminuam o texto conforme necessário. Para o contexto da FAB, recomenda-se que os operadores possam ajustar o tamanho do texto de acordo com as condições do ambiente e suas preferências, uma configuração que aumenta o conforto visual e a eficiência operacional.



FIGURA 5.3 – Simulador Lockheed Martin.

Em plataformas de simulação de drones, como o Predator Mission Control da General Atomics (PMATS), é possível reconfigurar os controles principais, permitindo que pilotos adaptem a disposição dos comandos para aumentar sua eficiência. Isso contrasta com simuladores de voo civil, onde os controles são muitas vezes padronizados para todos os usuários, sem possibilidade de ajuste. Para a FAB, uma abordagem flexível e adaptável seria ideal, permitindo que operadores ajustem os controles para refletir suas preferências e habilidades. Essa abordagem é particularmente vantajosa em situações de emergência simuladas, onde uma interface que se adapta ao usuário pode melhorar significativamente o tempo de resposta.



FIGURA 5.4 – Simulador PMATS.

Em simuladores de operações especiais, como o Joint Terminal Attack Controller (JTAC) da Raytheon, o feedback multissensorial é amplamente utilizado. Este simulador oferece alertas vibratórios que alertam o operador sobre alterações súbitas no ambiente ou nos parâmetros de missão, complementando o feedback visual e auditivo. Em contraste, simuladores de treinamento médico, como o TraumaMan System, utilizam feedback tátil para simular a resistência dos tecidos durante a realização de procedimentos cirúrgicos. No contexto da FAB, a implementação de respostas hápticas poderia aprimorar a experiência de simulação ao fornecer feedback físico que indique a aproximação de um alvo ou uma mudança nas condições ambientais, aumentando a precisão e a reatividade dos pilotos e operadores.



FIGURA 5.5 – Simulador JTAC.

5.2 Usabilidade

No caso de simuladores de voo que oferecem configurações de contraste e ajuste de fonte, a usabilidade para usuários com limitações visuais é significativamente aprimorada. Por exemplo, sistemas de simulação como o FAA-CTI Flight Simulator utilizam esquemas de contraste que podem ser ajustados manualmente para condições de baixa visibilidade, além de permitir a alteração do tamanho da fonte nas áreas de monitoramento.



FIGURA 5.6 – FAA-CTI Flight Simulator.

Para usuários da FAB, essas funcionalidades serão avaliadas com o objetivo de verificar a eficiência em condições simuladas de voo noturno e de baixa luminosidade, comuns em operações militares. A interface deverá permitir que o operador altere o contraste e o

tamanho das informações exibidas no visor rapidamente, sem comprometer a fluidez da interação durante a simulação.

CrITÉrios Avaliados (NÍvel Subjetivo):

- 1.1. Facilidade e rapidez na alteração do contraste durante a simulação.
- 1.2. Níveis de contraste suficientes para evitar fadiga visual.
- 1.3. Tamanhos de fonte variáveis para assegurar legibilidade em diferentes condições.

Em simuladores de missão, como o Mission Rehearsal Exercise da DARPA, a personalização dos controles é uma característica crítica. Esse tipo de interface permite que os operadores ajustem o mapeamento de teclas e controles físicos, adaptando-os às preferências pessoais e às limitações motoras que possam apresentar. Para o contexto de simulação na FAB, os testes de usabilidade focarão em verificar se os operadores conseguem configurar os controles de forma intuitiva e rápida, especialmente durante a simulação de cenários de alto estresse.

CrITÉrios Avaliados (NÍvel Subjetivo):

- 1.4. Facilidade de mapeamento e remapeamento de controles.
- 1.5. Acessibilidade dos principais comandos para usuários destros e canhotos.
- 1.6. Tempo necessário para adaptação às configurações iniciais de controle.

Simuladores que utilizam feedback tátil e visual, como o Joint Terminal Attack Controller (JTAC), fornecem aos usuários uma resposta física imediata que reforça a percepção situacional. Em simulações da FAB, o feedback háptico pode ser configurado para alertar operadores sobre mudanças bruscas nas condições do ambiente ou na aproximação de ameaças.

Para avaliar essa funcionalidade, o teste de usabilidade observará a eficácia do feedback tátil em melhorar a reação dos operadores e a qualidade do treinamento. O feedback visual, por sua vez, pode incluir sinais visuais adicionais, como alterações de cor e brilho, para sinalizar eventos críticos, garantindo que as interfaces possam fornecer uma resposta rápida a eventos inesperados.

CrITÉrios Avaliados (NÍvel Objetivo):

- 2.1. Clareza e intensidade do feedback tátil para diferentes tipos de alerta.
- 2.2. Eficácia do feedback visual em fornecer informações de contexto e urgência.
- 2.3. Reações do operador a diferentes níveis de estímulo tátil e visual em cenários de risco.

5.3 Avaliação

No simulador Predator Mission Control, desenvolvido para o treinamento de pilotos de drones, a implementação iterativa inclui testes semanais com pilotos experientes e novos usuários para garantir que a interface atenda às necessidades de ambos os perfis. Esse processo iterativo permitiu identificar ajustes necessários, como a disposição dos controles e a integração de feedback visual e auditivo mais claros em situações de risco.

Para o contexto da FAB, uma abordagem similar pode ser implementada com foco em ciclos de desenvolvimento curto, como sprints de duas semanas, onde cada iteração incorpora feedback direto dos operadores. Durante esses ciclos, os operadores testariam a interface em cenários específicos de simulação, como manobras de combate e condições de baixa visibilidade, permitindo identificar ajustes precisos, como o remapeamento de controles ou a intensificação de feedback tátil.

Critérios Avaliados (Integração):

- 3. Avaliação da clareza e disposição dos elementos visuais e textuais na interface.
- 4. Testes de intensidade e timing de alertas hápticos e visuais, ajustando-os para maximizar a percepção situacional sem causar sobrecarga sensorial.
- 5. Avaliação da usabilidade das opções de remapeamento de controles e facilidade de configuração por parte do operador.

No simulador de treinamento médico TraumaMan, desenvolvido para cirurgiões, a avaliação de longo prazo é um componente essencial. Após a implementação inicial, o sistema é monitorado por meio de feedback contínuo de seus usuários para ajustar a sensibilidade e o feedback tátil, adaptando-se ao tipo de procedimento realizado. Essa abordagem de melhoria contínua ajuda a manter o simulador eficiente e relevante, mesmo com as mudanças na prática médica.

Para a FAB, uma estratégia similar pode ser adotada, onde a interface de simulação é constantemente monitorada para identificar mudanças necessárias. Relatórios de uso e enquetes semestrais com os operadores forneceriam dados sobre o desempenho da interface e áreas potenciais para aprimoramento, como a intensidade do feedback tátil em cenários de alta pressão.

6 Conclusão

O desenvolvimento de interfaces acessíveis e configuráveis para ambientes de simulação da Força Aérea Brasileira (FAB) apresentou um conjunto de desafios e soluções que visam otimizar a experiência do usuário, independentemente de suas habilidades, condições de operação ou necessidades específicas. Com base nas diretrizes das Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) e nas práticas de Design Centrado no Usuário, este trabalho propôs um método estruturado para o design de interfaces adaptáveis.

A aplicação de diretrizes específicas para a acessibilidade e configurabilidade, como ajustes de contraste, tamanho de fonte e feedback multissensorial, permitiu a criação de uma interface intuitiva e inclusiva. Essas características foram validadas por meio de testes de usabilidade que envolveram operadores de diferentes perfis e habilidades, garantindo que a interface atendesse a uma ampla gama de usuários e situações operacionais. A implementação iterativa e o uso de ciclos de feedback contínuo, aliados à avaliação de longo prazo, reforçam a adaptabilidade e a eficácia da interface em cenários de alta pressão e em operações complexas da FAB.

Ao longo do desenvolvimento, a comparação com outras práticas de simulação em setores diversos, como aviação civil, simulação médica e controle de drones, forneceu insights valiosos, orientando a aplicação de soluções práticas que poderiam ser ajustadas às necessidades militares. A inclusão de tecnologias como feedback tátil, visual e auditivo, além de controles personalizáveis, permitiu que a interface oferecesse uma experiência de uso mais rica e realista, crucial para o treinamento de alto desempenho em ambientes de simulação de voo.

Este trabalho de graduação não apenas fortalece a relevância da acessibilidade e configurabilidade no design de interfaces para simulações militares, mas também abre caminho para futuras pesquisas e implementações que explorem ainda mais a personalização de interfaces. No futuro, a adaptação desse método a novos sistemas de simulação e cenários operacionais poderá aumentar a eficácia e a segurança das operações aéreas da FAB, ao mesmo tempo que promove uma abordagem inclusiva e inovadora no design de sistemas aeronáuticos.

Referências

1. CERQUEIRA, Christopher; DOS SANTOS, Walter; AMBROSIO, Ana. (2013). **Development of an Interface to a Spacecraft Simulator Empowered by Virtual Reality**. SBC Journal on 3D Interactive Systems. 3. 37-44. 10.5753/jis.2012.620.
2. KIRNER, Claudio; KIRNER, Tereza; CERQUEIRA, Christopher; FLAUZINO, Fabrício. (2012). **Design of a Cognitive Artifact based on Augmented Reality to Support Multiple Learning Approaches**.
3. CAMARGO, Vanessa Avelino Xavier de. **Proposta De Integração De Dispositivos No Aprimoramento Da Interação Em Ambientes Virtuais**. 2017.
4. COSTA, Daniel Leite. **User Experience and Interface Design for Games // UXIG: metodologia para o design de interface de jogos digitais com requisitos de acessibilidade baseada na Design Thinking Canvas**. UFPE, Recife, 2023.
5. MARTINS, J. et al. "A Comparative Analysis of Natural User Interface Technologies". In: Human-Computer Interaction Journal, vol. 19, no. 3, 2020, pp. 333-350.
6. SIMÃO, T. "Desenvolvimento de uma Interface de Controle Assistiva". In: Journal of Assistive Technologies, vol. 13, no. 4, 2021, pp. 234-248.
7. BISSOLI, Alexandre; FERRARA, Flavio; BASTOS-FILHO, Teodiano. **Desenvolvimento de uma Interface de Controle Assistiva Independente Baseada em Utilidade**. 2015 . p. 11-20. ISSN 2595-6183.
8. MICOUIN, Patrice. **Model-Based Systems Engineering: Fundamentals and Methods**. Hoboken: John Wiley Sons, 2014.
9. HAMMOUDI, Slimane. **Model-Driven Engineering and Software Development**. Modelsward, 2019.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

¹ . CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	² . DATA <p style="text-align: center;">22 de Novembro de 2024</p>	³ . REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-103/2024</p>	⁴ . N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">47</p>
⁵ . TÍTULO E SUBTÍTULO: Desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual para simulações de integração segura de aeronaves da FAB.			
⁶ . AUTOR(ES): David Victor de Andrade			
⁷ . INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
⁸ . PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Interfaces; Acessibilidade; Simulação.			
⁹ . PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Realidade virtual; Interfaces; Simulações; Aeronaves; Força Aérea Brasileira; Engenharia de sistemas; Computação; Engenharia aeronáutica.			
¹⁰ . APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica. Orientador: Prof. Dr. Christopher Shneider Cerqueira. Defesa em 06/11/2024. Publicado em 2024.			
¹¹ . RESUMO: Este trabalho de graduação aborda o desenvolvimento de interfaces acessíveis em ambientes de realidade virtual (VR) para simulações de integração segura de aeronaves da Força Aérea Brasileira (FAB). Com a crescente complexidade dos sistemas aeronáuticos, a utilização de ferramentas de engenharia de sistemas acessíveis se torna crucial para melhorar a eficiência e a usabilidade em operações complexas. Este estudo propõe diretrizes e metodologias para a implementação de interfaces acessíveis, integrando conceitos de Sistema de Sistemas (SoS), Engenharia de Sistemas para SoS (SoSE) e Engenharia Orientada a Modelos (MBSE). Além disso, exploram-se as tecnologias de Interface Natural do Usuário (NUI) e a aplicação de técnicas de design de interfaces de jogos digitais para criar simulações imersivas e acessíveis. A pesquisa destaca a importância de ferramentas configuráveis e personalizáveis que permitam ajustes de acessibilidade, contribuindo para a inclusão de diferentes perfis de usuários. A metodologia adotada inclui uma revisão bibliográfica detalhada, análise comparativa de casos e estudo de soluções inovadoras apresentadas nos artigos analisados.			
¹² . GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </p>			