

# **AValiação da Usabilidade do Software FlexSim Utilizando Diretrizes de Design para Ferramentas de Realidade Virtual**

Rafael Stein<sup>2</sup>

## **RESUMO**

A evolução tecnológica, impulsionada pela integração de tecnologias como a Realidade Virtual e os Digital Twins, têm transformado a concepção de simulação e modelagem de processos industriais. O FlexSim surge como uma ferramenta de autoria voltada para simulação 3D que explora esses avanços, oferecendo um ambiente robusto para a representação e análise de processos complexos. As ferramentas de autoria são estruturas de software que englobam um conjunto de ferramentas e recursos considerados fundamentais para a criação de conteúdo, além de permitir uma manutenção de algum produto de maneira acelerada e eficaz. No entanto, a implementação dessa tecnologia enfrenta desafios, especialmente em termos de usabilidade e suporte ao usuário, fundamentais para sua adoção em ambientes industriais que frequentemente lidam com variáveis estocásticas. Este estudo tem como objetivo avaliar a usabilidade do FlexSim, através da utilização de diretrizes de design fundamentais para a estruturação de uma ferramenta de autoria ideal para o usuário, fundamentadas por uma revisão sistemática da literatura e uma pesquisa quantitativa com alunos da UFSC e usuários iniciantes do FlexSim. No total, houve um total de sete respostas na pesquisa, não constituindo uma base de dados significativa. A análise apontou pontos de possíveis melhoras para o desenvolvimento da viabilidade do FlexSim para aplicação industrial, destacando a necessidade de aprimoramentos na documentação e suporte, bem como a inclusão de exemplos práticos para facilitar sua adoção e contribuir para a inovação e eficiência na área.

**Palavras-chave:** digital twin; flexsim; diretrizes de design.

## **ABSTRACT**

Technological evolution, driven by the integration of technologies such as Virtual Reality and Digital Twins, has been transforming the conception of simulation and modeling of industrial processes. FlexSim emerges as an authoring tool aimed at 3D simulation that explores these advances, offering a robust environment for the representation and analysis of complex processes. Authoring tools are software structures that encompass a set of tools and resources considered fundamental for content creation, in addition to allowing the maintenance of a product in an accelerated and effective manner. However, the implementation of this technology faces challenges, especially in terms of usability and user support, which are fundamental for its adoption in industrial environments that frequently deal with stochastic variables. This study aims to evaluate the usability of FlexSim through the use of fundamental design guidelines for structuring an ideal authoring tool for the user, supported by a systematic literature review and a quantitative survey with UFSC students and novice FlexSim users. In total, there were seven responses to the survey, which does not constitute a significant database. The analysis pointed out areas for potential improvement in developing FlexSim's feasibility for industrial application, highlighting the need for enhancements in documentation and support, as well as the inclusion of practical examples to facilitate its adoption and contribute to innovation and efficiency in the field.

<sup>1</sup> Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel no Curso de Ciência e Tecnologia, do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob orientação do Dr. Cristiano Vasconcellos Ferreira.

<sup>2</sup> Graduando como Bacharel em Ciência e Tecnologia E-mail: rafael.stein@grad.ufsc.br

**Keywords:** digital twins; flexsim; design guidelines.

# 1 INTRODUÇÃO

A expansão tecnológica nos últimos anos, revolucionou a forma como interagimos com o mundo digital e físico, atualizando as concepções de realidade e conectividade (Hillyer, 2020). Além disso, indústrias têm buscado potencializar seu crescimento através do desenvolvimento científico de tecnologias inovadoras que integram o usuário em ambientes dinâmicos e inteligentes, capazes de representar situações reais do cotidiano (Pada, 2023).

Dentro deste cenário de avanços digitais, surgem as tecnologias de simulação e modelagem, especialmente no contexto da Indústria 4.0 (Luściński; Ivanov, 2020; Singh, 2021). O desenvolvimento de ferramentas como o FlexSim, que incorporam Realidade Virtual (RV) e Digital Twin (DT), representa um salto qualitativo na forma como processos industriais são concebidos e analisados, buscando flexibilidade suficiente para obter a melhor eficiência possível (Batty, 2018; Errandonea et al., 2020; Medan, 2021). Este estudo visa avaliar a usabilidade do FlexSim, explorando seus pontos fortes e limitações, e propor melhorias com base em diretrizes de design fundamentais.

Um dos principais fatores procurados no desenvolvimento industrial é a manutenção da qualidade, sendo fundamental para a sobrevivência de uma empresa. Uma gestão da qualidade adequada é capaz de minimizar perdas e aumentar a produtividade (Bello, 2018), levando ao aperfeiçoamento e otimização dos processos produtivos de acordo com as necessidades do consumidor (Souto, 2021).

Diante disso, os computadores têm sido cruciais no monitoramento de processos industriais, armazenando e organização as informações em base de dados, permitindo a realização de cálculos complexos e simulações detalhadas. A evolução da computação permitiu a criação de modelos cada vez mais precisos e a execução de simulações em larga escala, resultando em uma compreensão profunda dos processos industriais (Carvalho, 2012).

Desta forma, a pesquisa se justifica pela necessidade de ferramentas de simulação que sejam não apenas tecnicamente robustas, mas também intuitivas e acessíveis para usuários com diferentes níveis de experiência, denominadas ferramentas de autoria (Chamusca, 2023; Ygitibas et al., 2021). A adoção efetiva dessas tecnologias pode resultar em benefícios econômicos, produtivos e sociais significativos, como a potencialização do crescimento industrial através do desenvolvimento científico de tecnologias inovadoras, como a Realidade Virtual e Digital Twin, além de uma maior eficiência da funcionalidade operacional, otimizando processos e contribuindo para a inovação no setor industrial (Luściński; Ivanov, 2020; Medan, 2021; Pada, 2023).

A partir disso, o FlexSim atua como uma ferramenta inovadora de simulação 3D, capitalizando esses avanços tecnológicos para oferecer um ambiente sofisticado para representação e análise de processos complexos, mas que também deve apresentar uma usabilidade e o suporte ao usuário (Medan, 2021; Nordgren, 2003; Zhu et al., 2014).

O desenvolvimento desta pesquisa busca avaliar a usabilidade do FlexSim, um software de simulação 3D, com base em diretrizes de design específicas. As diretrizes consideram sua aplicabilidade em diferentes contextos de uso e sua eficácia na modelagem e otimização de processos industriais. Desta forma, auxiliam na exploração dos pontos fortes e limitações do software em uma avaliação voltada para o usuário.

Generalizando, para alcançar os objetivos propostos, foi adotada a metodologia PRISMA, que orientou a realização de uma revisão sistemática da literatura (Page et al., 2021). Além disso, foi realizada uma pesquisa quantitativa com alunos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e usuários do FlexSim, onde houve um total de sete respostas. Desta forma, a base de dados utilizada não é considerável para determinar resultados robustos, sendo utilizada para criar uma visão geral acerca das funcionalidades do FlexSim. As diretrizes de design consideradas neste estudo foram extraídas da dissertação

*Design guidelines for intuitive virtual reality authoring tools*, que oferece um conjunto de critérios para avaliar a adequação e a intuitividade de ferramentas de autoria em RV (Chamusca, 2023).

A elaboração deste estudo busca avaliar o potencial do FlexSim para otimizar processos produtivos, proporcionando benefícios econômicos, produtivos e sociais (Luściński; Ivanov, 2020). Através de diretrizes de design para ferramentas de autoria que utilizam realidade virtual, espera-se considerar características capazes de descrever o nível da usabilidade do FlexSim, auxiliando seu desenvolvimento e adoção, corroborando com sua proposta de se tornar uma solução ainda mais eficaz e acessível para a simulação de processos industriais.

## 2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da avaliação do software FlexSim, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, adotando os princípios da metodologia PRISMA (Page et al., 2021), acerca do desenvolvimento de ferramentas que apresentam tecnologias inovadoras de realidade virtual e digital twin voltadas para a utilização do usuário, buscando uma usabilidade simplificada e intuitiva para qualquer indivíduo que desejar utilizá-las, agregando possibilidades da utilização dessas tecnologias de forma acessível (Singh et al., 2021; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Mais especificamente, o estudo busca avaliar a usabilidade da ferramenta FlexSim com base em diretrizes de design apresentadas na dissertação de mestrado de Iolanda Lima Chamusca, *Design guidelines for intuitive virtual reality authoring tool*, que apresenta um conjunto de diretrizes necessárias para analisar se ferramentas de autoria são adequadas e intuitivas para utilização de indivíduos, incluindo aqueles com pouca experiência profissional (Chamusca, 2023). A partir disso, foi realizada uma pesquisa quantitativa, através de um questionário, com um conjunto de estudantes da UFSC e utilizadores iniciantes do FlexSim para avaliar cada diretriz separadamente e validar os resultados obtidos. O questionário foi composto pelas definições de cada diretriz e classificações de nível para cada uma delas, como *Excelente*, *Muito Bom*, *Satisfatório*, *Ruim* ou *Ausente*, apresentando as seguintes questões:

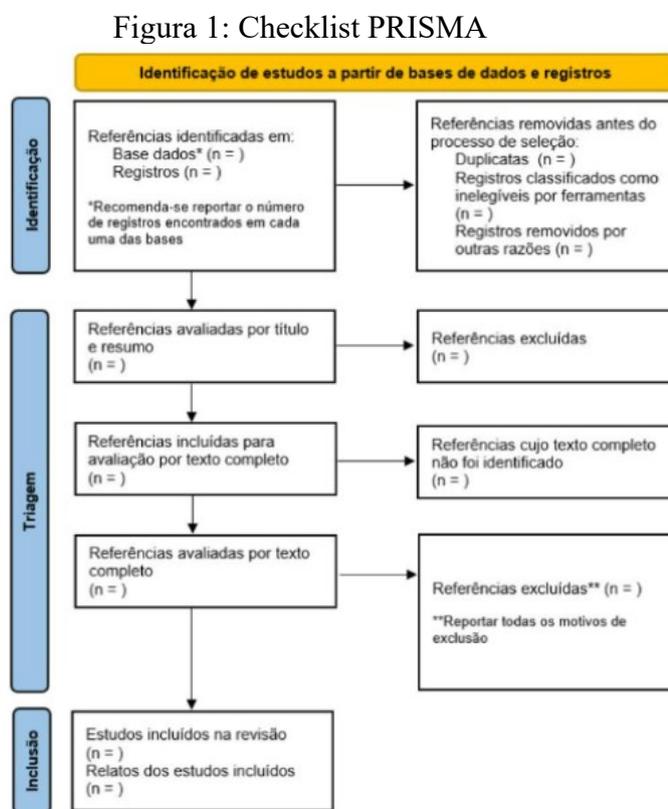
- PQ1: Qual o nível de Adaptação e Comunalidade do FlexSim?
- PQ2: Qual o nível de Automação do FlexSim?
- PQ3: Qual o nível de Customização do FlexSim?
- PQ4: Qual o nível de Democratização do FlexSim?
- PQ5: Qual o nível de Metaforização do FlexSim?
- PQ6: Qual o nível da Liberdade de Movimento do FlexSim?
- PQ7: Qual o nível de Otimização e Balanço de Diversidade do FlexSim?
- PQ8: Qual o nível da Documentação e Tutoriais do FlexSim?
- PQ9: Qual o nível da Criação Imersiva do FlexSim?
- PQ10: Qual o nível de Feedback Imersivo do FlexSim?
- PQ11: Qual o nível de Feedback em Tempo Real do FlexSim?
- PQ12: Qual o nível de Reutilização do FlexSim?
- PQ13: Qual o nível de Compartilhamento e Colaboração do FlexSim?
- PQ14: Qual o nível de Programação Visual do FlexSim?

Dentro desse cenário, a metodologia PRISMA serviu para a realização de uma revisão sistemática da literatura, as diretrizes de design para avaliar cada recurso do FlexSim e a pesquisa quantitativa para avaliar o nível de classificação de cada diretriz de design.

## 2.1 PRISMA

A metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) representa um conjunto de diretrizes desenvolvidas para filtrar referências inadequadas para o desenvolvimento de uma revisão sistemática da literatura, ou seja, tem o objetivo de melhorar a transparência e a consistência na elaboração de revisões sistemáticas e meta-análises. As diretrizes definidas pelo PRISMA servem como métodos para identificar, selecionar, avaliar e sintetizar estudos (Page et al., 2021).

A declaração PRISMA 2020 apresenta uma reformulação da metodologia, contendo um checklist de itens que representam orientações para um desenvolvimento recomendado para revisões sistemáticas, conforme figura 1. A utilização das diretrizes pode providenciar um parecer geral do estado do conhecimento em um determinado campo de pesquisa, além de identificar problemas na investigação primária de referências e gerar ou avaliar teorias desenvolvidas por outros estudos, servindo como um padrão essencial para garantir a qualidade e a integridade na comunicação de pesquisas científicas (Page et al., 2021).



Fonte: Page et al. (2021)

Este artigo baseou-se no objetivo de analisar o desenvolvimento de softwares que apresentam tecnologias de realidade virtual e digital twin, no âmbito das ferramentas disponibilizadas serem intuitivas para o usuário. Desta forma, foram buscadas pesquisas científicas que abordam o tema, capazes de agregar conhecimentos relevantes no desenvolvimento da inovação e das ideias apresentadas no estudo (Dresch; Lacerda; Junior, 2015).

A metodologia é dividida em cinco partes principais, iniciando com o planejamento e partindo para escopo, pesquisa, avaliação e síntese e análise (Page et al., 2021). Cada parte é aprofundada e detalhada nos tópicos a seguir.

### 2.1.1 Planejamento

A fundamentação para a elaboração das pesquisas que estruturam este artigo consistiu na busca por uma base de dados confiável e com um número grande de publicações, auxiliando na pesquisa por referências e na seleção de documentos relevantes para o desenvolvimento do estudo de ferramentas de autoria e a sua acessibilidade para diferentes tipos de usuários. Nessa perspectiva, o Scopus se apresentou como uma ferramenta ideal para a realização das pesquisas, oferecendo uma coleção abrangente de conteúdos científicos que tangem as mais diversas áreas do conhecimento.

O Scopus é uma extensa base de dados bibliográfica, que apresenta mais de 94 milhões de registros e mais de 29.200 títulos de série ativos, abrangendo mais de 240 disciplinas (Elsevier, 2024). Desta forma, se trata de um conjunto de dados inclusivo e interdisciplinar, apresentando ferramentas de pesquisa avançadas que permitem ao usuário filtrar os resultados de acordo com suas preferências, identificando fontes relevantes, tópicos emergentes e explorar potenciais colaborações.

Para mais, a plataforma proporciona credibilidade aos pesquisadores com um perfil de autores qualificados e mantendo as informações atualizadas automaticamente (Elsevier, 2024) Portanto, a escolha do Scopus como banco de dados dedicado para este estudo se baseou no seu diferencial de oferecer um número elevado de publicações, confiabilidade e ferramentas analíticas avançadas que auxiliam na visualização, comparação e exportação de dados.

### 2.1.2 Escopo

A motivação do estudo que serviu de base para a busca e análise dos resultados, é advinda do questionamento e da formulação de perguntas, permitindo a definição do escopo. Desta forma, foram estabelecidos objetivos com a intenção de elucidar a importância do tema com sua relevância na área de desenvolvimento de ferramentas de autoria, permitindo aprofundar as buscas por publicações pertinentes e filtrar de acordo com a relação com o objetivo do estudo. Com isso, propôs-se os seguintes questionamentos:

Q1: O Flexim é considerado uma ferramenta de autoria em Realidade Virtual ?

Q2: Softwares avançados de simulação são capazes de promover uma utilização universal para os usuários?

Q3: As ferramentas que trabalham com Digital Twin e Realidade Virtual são desenvolvidas e avaliadas devidamente para a utilização do usuário?

Portanto, a revisão sistemática da literatura tem o intuito de conceitualizar realidade virtual e digital twin e caracterizar o FlexSim como uma ferramenta de autoria, avaliando a disponibilidade e aplicação dos componentes fornecidos pelo software com base em diretrizes de design para ferramentas de autoria, analisando o cumprimento dos requisitos estabelecidos e a facilidade na utilização de tais componentes na modelação de sistemas de simulação completos.

### 2.1.3 Pesquisa

Com base nas perguntas determinadas no tópico anterior, partiu-se para a aplicação de pesquisas aprofundadas capazes de fundamentar os objetivos propostos. Para isso, foi definido um conjunto de frases que agregam as palavras-chave que englobam a temática abordada nesta revisão sistemática da literatura, as quais são aplicadas na base de dados determinada.

As principais palavras-chave utilizadas foram Realidade Virtual e Digital Twin para

limitar a busca apenas para aqueles conteúdos que trabalham com as tecnologias imersivas. A partir disso, foram classificadas com base em cada aplicação em que eram utilizadas, buscando a separação daquelas referências que citam a avaliação e utilização de ferramentas de forma intuitiva e acessível.

À vista disso, foi formada a frase de busca: *TITLE-ABS-KEY ( ( virtual AND reality OR digital AND twin OR vr ) AND ( intuitive OR flexible OR democratize OR adaptable OR usable OR facilitate OR simplify OR easy OR user-friendly OR accessibility ) AND evaluation AND design )*. Note-se que a sintaxe utiliza operadores condicionais booleanos usuais, como OR e AND.

A pesquisa foi realizada em 23 de maio de 2024, reunindo um total de 386 documentos, incluindo artigos, jornais de congressos e livros.

#### 2.1.4 Avaliação

Apesar da extensa disponibilidade de documentos disponíveis a partir da pesquisa, foi realizada uma filtragem dos resultados através de critérios de inclusão e exclusão para restringir o número de documentos encontrados anteriormente, selecionando aqueles que apresentam um grau de relevância maior para a pesquisa. Desta forma, foram adotados os seguintes critérios exclusivos para uma refinação da busca:

- E1: Apenas documentos publicados a partir de 2017;
- E2: Apenas documentos escritos em inglês;
- E3: Apenas documentos que apresentavam as seguintes palavras-chave: Digital Twin, Evaluation, e Usability.

Vale ressaltar que o período determinado no critério E1, se fez pelo fato de que houve um aumento considerável no número de pesquisas envolvendo Realidade Virtual e Digital Twin a partir de 2017.

A partir disso, os resultados diminuíram para um total de 31 documentos, um número considerado suficiente para a realização de uma busca fundamentada para o desenvolvimento deste estudo. A aplicação desses filtros resultou na frase de busca: *TITLE-ABS-KEY ( ( virtual AND reality OR digital AND twin OR vr ) AND ( intuitive OR flexible OR democratize OR adaptable OR usable OR facilitate OR simplify OR easy OR user-friendly OR accessibility ) AND evaluation AND design ) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2025 AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Evaluation" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Digital Twin" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Usability" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )*

#### 2.1.5 Síntese e Análise

Com o objetivo de selecionar aquelas referências que serão incluídas no trabalho, foi realizada uma análise dos resultados. Para a avaliação, foram considerados os resumos de cada documento e suas respectivas palavras-chave, relacionando-os com o escopo estipulado pelas perguntas Q1, Q2 e Q3. Desta forma, com base no total de 31 documentos reunidos anteriormente e considerando a revisão realizada, foram selecionados 11 trabalhos que estavam em conformidade com os objetivos deste estudo. O resultado é apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 - Pesquisas selecionadas a partir da PRISMA.

(continua)

Autor(es)	Título	Síntese
Ding et al. (2023)	Implementation of Digital Twin in Actual Production: Intelligent Assembly Paradigm for Large-Scale Industrial Equipment	Propõe um paradigma tecnológico baseado em digital twin para a montagem inteligente de equipamentos industriais, incorporando tecnologias-chave que facilitam a integração de informações virtuais e físicas, buscando proporcionar melhorias significativas na transparência e inteligência dos processos de produção.
Liao e She (2024)	How does Virtual Reality (VR) facilitate design? A review of VR usage in early-stage engineering design	Visa compreender como a RV é atualmente empregada no projeto de engenharia em estágios iniciais, para que pesquisadores e profissionais possam entender melhor quando e como utilizar a RV para atividades de projeto eficientes.
Liu et al. (2024)	A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model	Introduz um Modelo de Maturidade de Digital Twin de cinco níveis (DTMM), alinhando sistematicamente as capacidades dos DTs com objetivos e requisitos técnicos, oferecendo uma estrutura para avaliar seu nível de desenvolvimento e traçar sua trajetória de construção.
Nunes et al. (2023)	VR Virtual Prototyping Application for Airplane Cockpit: A Human-centred Design Validation	Avalia a usabilidade de uma aplicação para desenvolver protótipos de cockpits de avião em realidade virtual, do ponto de vista do design centrado no usuário.
Poh et al. (2022)	Mixed Reality for Mechanical Design and Assembly Planning	Desenvolve uma aplicação de Realidade Mista (MR) para engenheiros visualizarem e manipularem virtualmente peças de montagem, conduzindo e planejando uma montagem dentro de seu ambiente físico.
Toivonen et al. (2018)	The FMS Training Center - A versatile learning environment for engineering education	Introduz um ambiente de aprendizado versátil focado em um Sistema de Manufatura Flexível (FMS).
Wang et al. (2020)	Real-time process-level digital twin for collaborative human-robot construction work	Discute a limitação do uso generalizado de robôs autônomos na construção devido à dificuldade de pré-programá-los para tarefas quase repetitivas, propondo a colaboração entre humanos e robôs por um sistema de realidade virtual, que demonstra um plano de tarefa para o robô com a aprovação do humano.

Quadro 1 - Pesquisas selecionadas a partir da PRISMA.

(conclusão)

Wei et al. (2022)	Communication in Immersive Social Virtual Reality: A Systematic Review of 10 Years' Studies	Destaca práticas e desafios atuais, identificando oportunidades de pesquisa para melhorar o design de RV social e torná-la mais acessível.
Wolfartsberger (2019)	Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review	Descreve o desenvolvimento e a avaliação de uma ferramenta baseada em VR para apoiar a revisão de design de engenharia.
Zwoliński et al. (2022)	Vibrating Tilt Platform Enhancing Immersive Experience in VR	Trata do conceito de uma plataforma de inclinação vibratória que permite a mudança de três ângulos de inclinação para reforçar a experiência de RV. O sistema proposto é flexível e adaptável a diferentes aplicações esportivas, de saúde e educacionais.

Fonte: Autor (2024)

Então, com base nas cinco etapas da metodologia PRISMA - planejamento, escopo, pesquisa, avaliação e síntese e análise - foi formada uma lista com 11 publicações que atuaram como base para a revisão da literatura, por apresentarem características semelhantes com o tema deste trabalho. Além disso, diversos filtros foram utilizados para refinar os resultados, buscando selecionar apenas aqueles mais importantes para a realização da avaliação do FlexSim, como uma ferramenta de Digital Twin, com base em diretrizes de design para ferramentas de realidade virtual.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Metaverso

O metaverso é um conceito que se refere a um conjunto de ambientes virtuais que transcendem as fronteiras dos mundos digitais convencionais, por meio de tecnologias que permitem interações multissensoriais e o tratamento dinâmico de dados (Mystakidis, 2022). A partir dele, usuários são capazes de interagir entre si, caracterizando uma nova esfera do espaço cibernético tradicional, trazendo um ambiente tridimensional imersivo (Terrace, 2012).

Derivada do prefixo grego *meta* - significando em seguida, transcendente, abstrato - e universo (Cunningham, 2010; Mystakidis, 2022). O termo foi cunhado pelo escritor Neal Stephenson no romance de ficção científica *Snow Crash*, publicado em 1992, onde mundos virtuais copiavam o mundo físico em sentimentos e efeitos visuais (Paul, 2009). Desta forma, caracteriza um avanço na intersecção entre o mundo digital e físico, onde avatares podem ser representados de acordo com o desejo do usuário (Stephenson, 1992; Zhang *et al.*, 2022).

Atuando como uma evolução na aplicação da Internet, o metaverso trouxe o desenvolvimento de nova geração tecnológica baseada em uma rede de experiência (Meng *et al.*, 2023). Nesse sentido, corresponde a uma plataforma interoperável, aberta e descentralizada que permite usuários acessarem diferentes espaços digitais com suas próprias regras, mantendo uma estrutura que engloba tecnologias como blockchain, computação em nuvem e inteligência artificial (Ning *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022).

Apesar de seu potencial, o metaverso enfrenta desafios significativos com a falta de

regulamentações claras e consenso sobre sua definição e aplicação. Portanto, se trata de um novo paradigma social gerado a partir de uma nova tecnologia em constante desenvolvimento (Conceição *et al.* 2023).

### 3.1.1 Realidade Aumentada, Virtual, Estendida e Mista

O desenvolvimento e utilização do metaverso inclui elementos mais notórios, como a Realidade Virtual (RV), Realidade Aumentada (RA), Realidade Mista (RM) e Realidade Estendida (RE), responsáveis por integrar tecnologias de manipulação de elementos tridimensionais virtuais, se misturando ou não com elementos reais e alterando a perspectiva do usuário (Mystakidis, 2022; Stark, 2022).

A realidade virtual (RV) corresponde a um ambiente alternativo, digitalmente criado e artificial, completamente separado de ambientes reais. A utilização da RV promove uma sensação de imersão do usuário, localizados em um mundo artificialmente criado, onde são capazes de operar de maneiras semelhantes às do ambiente físico (Slater *et al.*, 2016). Através de equipamentos multissensoriais especializados, como óculos de RV, capacetes de imersão e estrias omnidirecionais, ocorre um estímulo à utilização dos sentidos humanos, que promovem uma experiência mais amplificada do ambiente (Mystakidis, 2022; Pellas, 2021).

A realidade aumentada (RA) busca aprimorar o ambiente físico com base em entradas digitais e elementos virtuais (Ibáñez, 2018). Portanto, a RA mescla espacialmente o mundo físico com o virtual, criando uma camada composta pela projeção espacial de elementos digitais por meio de dispositivos, como smartphones, tablets, óculos, lentes de contato ou outras superfícies transparentes (Mystakidis, 2022). De forma geral, a RA possui uma proximidade maior com a realidade física dos usuários (Ning *et al.*, 2021).

A realidade mista (RM) trata da criação de um novo ambiente de visualização que combina mundos reais e virtuais. Nesse ambiente, os elementos físicos e digitais coexistem e interagem entre si (Ning *et al.*, 2021). Desta forma, muitas vezes a RM é tratada como uma aprimoração da RA no sentido de que o ambiente físico interage em tempo real com os dados digitais projetados (Speicher, 2019). Sendo assim, a RM corresponde a uma combinação dos conceitos de RV e RA, incluindo tudo o que está entre uma visualização inteiramente virtual até a completa realidade (Mystakidis, 2022).

A realidade estendida (RE) compreende tecnologias imersivas, ambientes eletrônicos e digitais onde os dados são representados e projetados, incluindo outros elementos sensoriais no ambiente. Portanto, a RE abrange os conceitos de RV, RA e RM (Milgram, 1995; Mystakidis, 2022). Nesse contexto, muitas vezes a RE é tratada como um sinônimo de metaverso (Conceição, 2023).

## 3.2 **Digital Twin**

O conceito de Digital Twin (Gêmeos Digitais) se baseia no espelhamento de processos físicos a partir de uma representação virtual que, através da utilização de dados e sistemas de comunicação e computação, retrata exatamente e atualiza os elementos que compõem o modelo em tempo real (Batty, 2018; Errandonea *et al.*, 2020). Considerando uma simulação, o conceito abre portas para uma abordagem realista e holística de cenários imprevistos e imprevisíveis (Singh *et al.*, 2021).

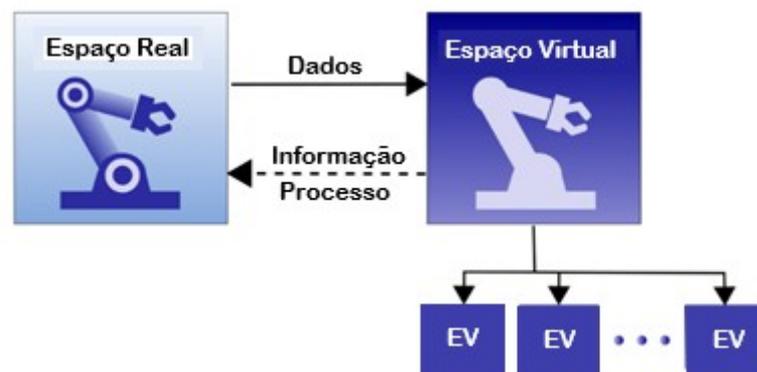
A temática de Digital Twin foi apresentada pela primeira vez em 2002 por Grieves e Vickers na Universidade do Michigan, em sua apresentação sobre gerenciamento do ciclo de vida de um produto, a partir da motivação de transcender a utilização de manuais para tratamento das informações de produtos para um modelo digital, intercalando conceitos de Internet das Coisas (IoT) e Sistemas Ciber-Físicos (Batty, 2018; Errandonea *et al.*, 2020;

Grieves; Vickers, 2017; Haag; Anderl, 2018; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

O modelo proposto, denominado “Modelo de Ambientes Espelhados”, consiste em três componentes principais: um ambiente real (produto físico), um ambiente virtual (representação) e mecanismos de conexão para o fluxo de dados e informações entre ambos (Grieves; Vickers, 2017; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Em 2006, o nome do modelo foi alterado para *Modelo de Informações Espelhadas*, ressaltando a utilização de mecanismos de conexão de troca mútua entre os dois espaços, além da presença de vários espaços virtuais (EV) para um espaço real (ER), permitindo a implementação de layouts de interação distintos para cada aplicação (Grieves; Vickers, 2017). Apesar disso, devido a limitações tecnológicas, como a capacidade computacional, a implementação do modelo era inviável (Singh et al., 2021). A figura 2 apresenta uma representação desses modelos.

Figura 2 - Modelo de Ambientes/Informações Espelhados

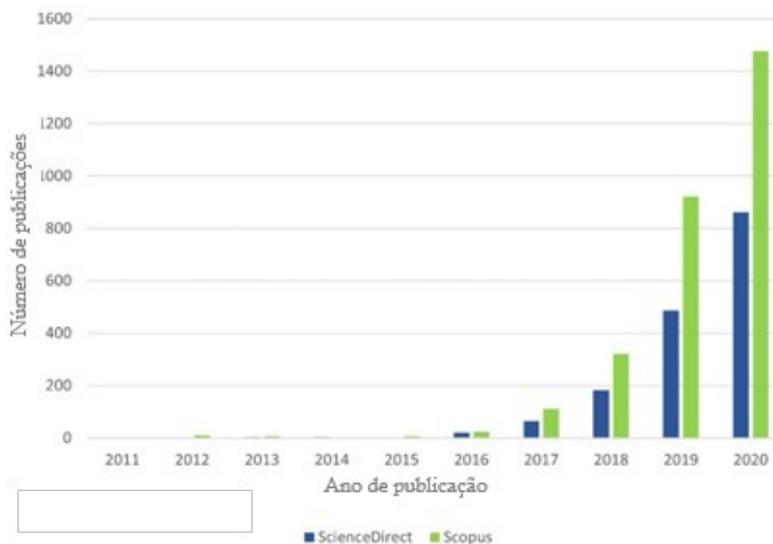


Fonte: Singh et al. (2021)

A concepção literal de Digital Twin, foi apresentada pela primeira vez pela NASA em 2010, através de seu roteiro tecnológico, tratada como Líder de Frota Digital Virtual (Errandonea et al., 2020; Singh et al., 2021). Desde então, devido à sua abrangência e complexidade, diferentes autores apresentaram uma variedade de definições para a palavra na literatura, muitas delas divergentes, criando desavenças quando se faz necessário abordar precisamente o tema (VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Nos últimos anos, publicações relacionadas aos Digital Twin cresceram exponencialmente, conforme apresentado na figura 3, trazendo atuações da tecnologia em diferentes aplicações no mercado de trabalho, principalmente industriais (Singh et al., 2021). As aplicações se expandem desde análises fundamentalistas e pesquisas até o desenvolvimento técnico de linhas que se utilizam do espelhamento da realidade para simular e compreender processos.

Figura 3 - Número de publicações relacionadas ao Digital Twin por ano, de 2011 a 2020.



Fonte: Singh et al. (2021)

Apesar do crescimento acelerado, conforme indicado anteriormente, há grande divergência entre as definições presentes na leitura acerca da tecnologia. Os conceitos são utilizados a partir de caracterizações específicas com base no(s) caso(s) de uso que estão sendo abordados na pesquisa, trazendo interpretações incoerentes caso tratado de forma generalizada. Portanto, a confusão se concentra na variedade de descrições utilizadas para definir um Digital Twin (Batty, 2018).

A fim de apresentar essas visões, houve um levantamento de 46 publicações que trabalham com a definição de Digital Twin (VanDerHorn; Mahadevan, 2021). A partir disso, foram selecionados um conjunto de 22 publicações, conforme apresentadas pelo quadro 2, ressaltando que todas as traduções são de autoria própria:

Quadro 2 - Definições de Digital Twin.

(continua)

Autor	Definição
Abramovici et al. (2017)	Um gêmeo virtual é um modelo que integra modelos de produtos virtuais interdisciplinares (mecânica, eletrônica, software e serviços) e dados relacionados em tempo real de uma instância de produto (gêmeo físico). Um gêmeo virtual pode ser gerado dinamicamente a partir de um modelo e espaço de dados para cumprir uma tarefa específica (por exemplo, reconfiguração dinâmica de um produto inteligente durante sua fase de uso).
Alam e El Saddik (2017)	O gêmeo digital é uma cópia cibernética exata de um sistema físico que representa verdadeiramente todas as suas funcionalidades.
Banerjee et al. (2017)	Clones computadorizados de ativos físicos que podem ser usados para análises aprofundadas.
Bazilevs et al. (2015)	Modelo estrutural de alta fidelidade que incorpora danos por fadiga e apresenta uma contrapartida digital bastante completa do sistema estrutural real de interesse.

Quadro 2 - Definições de Gêmeo Digital.

(continuação)

Bielefeldt et al. (2015)	Modelos computacionais multi-físicos ultra-realistas associados a cada aeronave única e combinados com históricos de voo conhecidos.
Boschert et al. (2018)	Descrição física e funcional abrangente de um componente, produto ou sistema juntamente com todos os dados operacionais disponíveis.
Bruynseels et al. (2018)	Modelo digital que reflete dinamicamente o status de um artefato.
Demkovich et al. (2018)	Um Digital Twin de um sistema de produção é um layout digital multinível que descreve o produto, processos e recursos no ambiente de seu funcionamento, ou seja, permitindo simular os processos que ocorrem no sistema real, bem como coletar e exibir em real dados de tempo sobre o estado dos objetos obtidos do CLP e dos sensores instalados no sistema de produção tanto nos equipamentos industriais quanto em seu ambiente.
Gabor et al. (2016)	A simulação do próprio objeto físico para prever estados futuros do sistema.
Glaessgen e Stargel (2012)	Um Gêmeo Digital é uma simulação probabilística multifísica, multiescala e integrada de um veículo ou sistema construído que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico da frota, etc., para espelhar a vida de seu gêmeo voador correspondente. O Digital Twin é ultra-realista e pode considerar um ou mais sistemas importantes e interdependentes do veículo, incluindo fuselagem, propulsão e armazenamento de energia, suporte de vida, aviônicos, proteção térmica, etc.[sic]
Grievies e Vickers (2017)	Gêmeo Digital é um conjunto de construções de informações virtuais que descreve completamente um produto fabricado físico potencial ou real, desde o nível micro atômico até o nível macro geométrico. Na melhor das hipóteses, qualquer informação que possa ser obtida através da inspeção de um produto físico fabricado pode ser obtida em seu Gêmeo Digital.
Lee et al. (2013)	Modelo acoplado da máquina real que opera na plataforma em nuvem e simula a condição de saúde com um conhecimento integrado de algoritmos analíticos baseados em dados e outros conhecimentos físicos disponíveis.
Liu et al. (2018)	O gêmeo digital é, na verdade, um modelo vivo do ativo ou sistema físico, que se adapta continuamente às mudanças operacionais com base nos dados e informações on-line coletadas e pode prever o futuro da contraparte física correspondente.
Majumdar et al. (2013)	Modelo estrutural que inclui dados quantitativos de características de nível de material com alta sensibilidade.
Rosen et al. (2015)	Modelos muito realistas do estado atual do processo e do seu comportamento em interação com o ambiente no mundo real.

Quadro 2 - Definições de Gêmeo Digital.

(conclusão)

Schluse e Rossman (2016)	Substitutos virtuais de objetos do mundo real que consistem em representações virtuais e capacidades de comunicação que constituem objetos inteligentes que atuam como nós inteligentes dentro da Internet de coisas e serviços.
Schroeder et al. (2016)	Representação virtual de um produto real no contexto de sistemas ciberfísicos.
Talkhestani et al. (2018)	Digital Twin é um modelo virtual de um ativo físico capaz de espelhar totalmente suas características e funcionalidades durante todo o seu ciclo de vida. É uma abordagem para gerenciar todos os dados digitais gerados de um componente ou sistema ao longo de seu ciclo de vida e recuperá-los conforme necessário por funções de simulação ou otimização para enfrentar quaisquer desafios que ocorram.
Tuegel (2012)	Um modelo completo da capacidade da estrutura de uma aeronave de atender aos requisitos da missão, incluindo submodelos da eletrônica, dos controles de voo, do sistema de propulsão e outros subsistemas.
Vachalek et al. (2017)	Sistema funcional de otimização contínua de processos formado pela cooperação de linhas de produção físicas com cópia digital.
Zheng et al. (2018)	Um Gêmeo Digital é um conjunto de informações virtuais que descreve completamente uma produção física potencial ou real, desde o nível micro atômico até o nível macro geométrico.

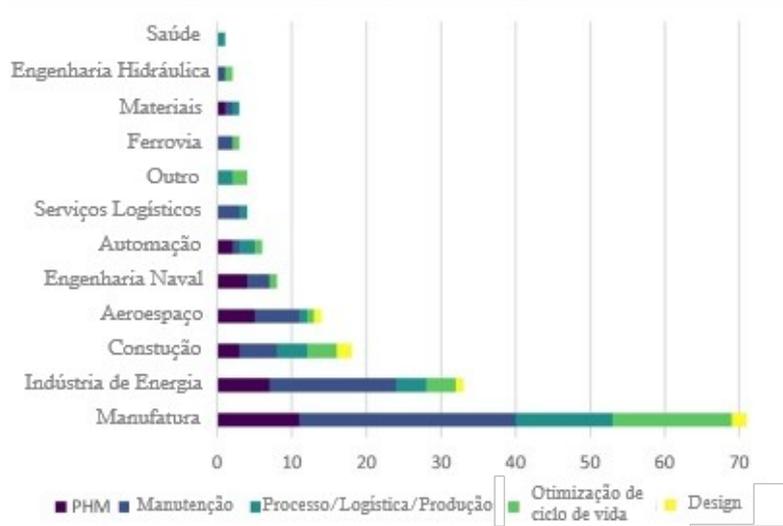
Fonte: Autor (2024)

A partir disso, é possível observar que grande parte das definições apresentam divergências quanto ao seu foco de atuação, enquanto outras corroboram entre si. As definições na literatura têm se referido aos Digital Twin como um ‘modelo digital ou virtual’, ‘réplicas’, ‘clones’, ‘contrapartes’, ‘representações’, ‘software análogo’ e ‘simulação de contrapartes físicas’ (Singh et al., 2021; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Inicialmente, o principal objetivo das definições acerca de DT era desenvolver simulações de processos para avaliar possíveis soluções de estruturas mecânicas, ciência dos materiais e previsão da performance de dispositivos no decorrer do tempo para a indústria aeroespacial/aeronáutica (Errandonea et al., 2020). No entanto, com a ascensão da Indústria 4.0 o olhar sobre a tecnologia se alterou para a manufatura e IoT (Batty, 2018).

Relacionado a isso, pesquisas desenvolvidas na área de Digital Twin e Manufatura apresentaram um grande salto nos últimos anos, conforme a figura 4. Por esta razão, palavras utilizadas na definição de DT, como ‘aeronave’, ‘veículo’, ‘fuselagem’, foram substituídas por ‘sistema’, ‘máquina’, ‘produto’, ‘objeto’, ‘entidade’, ‘ativo’, ‘dispositivo’ ou ‘processo’ (Singh et al., 2021).

Figura 4 - Aplicações de Digital Twin.



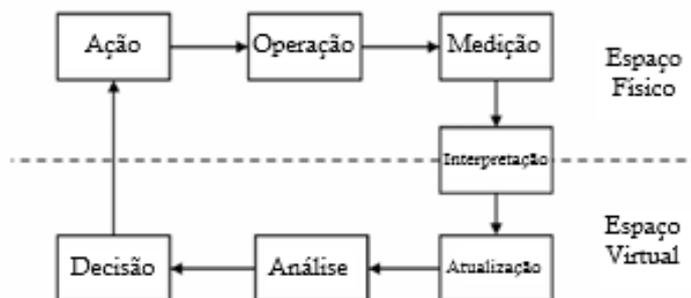
Fonte: Errandonea et al. (2020)

Sendo assim, com base nas definições da literatura, é apresentada uma definição generalizada e consolidada para o termo Digital Twin como sendo uma representação virtual dinâmica de um sistema físico (associado ao ambiente e processos) que é atualizado através do compartilhamento e armazenamento de dados e informações em tempo real entre os sistemas físico e virtual (VanDerHorn; Mahadevan, 2021). Tal definição é suficiente para englobar grande parte das abordagens citadas e auxilia no entendimento das aplicações essenciais que envolvem DT.

### 3.2.1 Características do DT

Para o funcionamento de um Digital Twin, são necessário requisitos mínimos que se baseiam na realidade física daquilo que está sendo tratado, na representação virtual a partir da realidade física e a conexão entre ambas as partes, permitindo uma troca mútua de informações, conforme apresentado na figura 5. Cada componente da representação é responsável por receber, interpretar e enviar os dados compartilhados de acordo com sua programação, criando uma rede complexa de transmissão e recepção de dados (Errandonea et al., 2020; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Figura 5 - Componentes de um Digital Twin e seus processamentos.



Fonte: VanDerHorn e Mahadevan (2021)

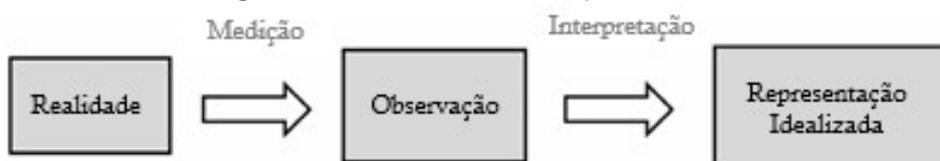
A realidade física de um Digital Twin é formada pela integração de sistemas, ambientes e processos físicos que formam uma representação generalizada daquilo que se propõe a modelar, compreendendo a totalidade do ambiente físico, conhecido e desconhecido (Grieves; Vickers, 2017). Os sistemas físicos são retratados como o conjunto de entidades relacionadas que interagem entre si, formando um todo unificado, geralmente determinado e descrito pela estrutura, finalidade e limites espaciais e temporais dos componentes que formam a realidade física (Singh et al., 2021).

Os ambientes físicos correspondem a todo o entorno que incorpora e exerce influência sobre os sistemas físicos, que interagem e sofrem mudanças através dos processos físicos (Haag; Anderl, 2018). A resposta expressada pelas interações e mudanças sofridas pelos sistemas físicos é denominada como processo físico, o qual atua como um mecanismo para mudanças de estado nas entidades do sistema. A fronteira entre os sistemas físicos e os ambientes físicos geralmente é definida a partir do contexto de cada aplicação do DT (Errandonea et al., 2020).

A representação virtual busca replicar uma realidade física ideal, representando seu sistema, ambiente e processo físico perfeitamente, onde qualquer alteração é acompanhada virtualmente pela máquina. No entanto, devido à capacidade computacional limitada de softwares e hardwares, faz com que seja necessário adotar uma idealização da realidade baseada em um certo nível de abstração (Batty, 2018; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Geralmente, a idealização é feita através de modelos de dados ou modelos comportamentais (matemáticos ou computacionais). Um modelo de dados é tratado como uma estrutura de dados que armazena todas as variáveis que descrevem a realidade de acordo com o nível de abstração determinado (VanDerHorn; Mahadevan, 2021). Um modelo comportamental descreve como as variáveis de interesse se relacionam entre si (Errandonea et al., 2020). Estes modelos servem como meios para uma representação idealizada da realidade, onde as variáveis do modelo assumem valores estabelecidos a partir da interpretação dos dados coletados a partir da realidade física, conforme a figura 6.

Figura 6 - Processo de abstração de dados.



Fonte: VanDerHorn e Mahadevan (2021)

Portanto, a representação virtual busca representar situações reais que ocorrem na realidade física, pode ser segregada em sistemas, ambientes e processos virtuais que buscam formar uma idealização precisa das entidades que pertencem ao cenário físico. Os sistemas virtuais possuem todo o conjunto de dados e modelos das estruturas de interesse do sistema físico, integrando-as dentro dos parâmetros de abstração estabelecidos. Um sistema virtual pode ser formado por um número diversificado de modelos do sistema físico que interagem ou não entre si, de acordo com a necessidade do Digital Twin que se propõe a criar (Singh et al., 2021; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Os ambientes virtuais, como o nome já diz, é a representação virtual do ambiente físico, buscando englobar variáveis capazes de influenciar os sistemas virtuais (Errandonea et al., 2020). As influências sofridas geram sinais de resposta que são tratados por processos virtuais, responsáveis por descrever a reação dos sistemas virtuais para cada situação, dentro do nível de abstração escolhido. Geralmente, são utilizados modelos computacionais para os processos virtuais, que induzem estados de teste para relatar como o sistema físico responde

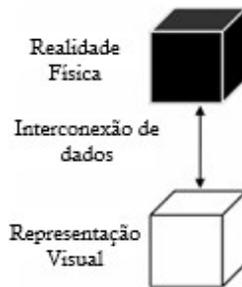
para as situações de interesse (Singh et al., 2021).

Na esfera dos Digital Twin, os processos virtuais possuem um papel integral, servindo como estrutura para aplicações que dependem de simulações de estados futuros, projetando cenários possíveis para cada situação em vez de apenas espelhar o estado atual do sistema. Esta abordagem permite ao usuário criar hipóteses e prever o comportamento da contraparte física frente às condições análogas, facilitando uma interpretação detalhada que serve de auxílio para a tomada de decisões.

A análise viabiliza o estudo e a comparação dos resultados obtidos com os resultados esperados, criando a possibilidade do usuário poder determinar o curso de ação mais adequado para atingir seus objetivos (Errandonea et al., 2020; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

No entanto, para garantir a funcionalidade e todo o potencial de um digital twin, é necessário garantir a comunicação entre a realidade física e a representação virtual através de uma conexão de duas vias, onde os dados e informações fluem entre ambos (Singh et al., 2021). A figura 7 apresenta uma representação da comunicação entre os componentes de um DT.

Figura 7 -  
Comunicação entre os  
componentes de um  
Digital Twin.



Fonte: VanDerHorn e Mahadevan (2021)

O fluxo de dados que parte da realidade física até a representação virtual permite a transferência de dados reais para atualizar os estados presentes na esfera virtual, garantindo que esta reflita as condições atuais. A conexão físico-virtual faz com que seja necessário a realização de uma coleta de informações pertinentes, uma interpretação dos dados coletados e uma transformação destes para o nível de abstração do modelo, para assim atualizar os processos que utilizam os resultados para alterar os estados da representação virtual, mantendo sincronismo com a parte física (VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Para completar o ciclo de comunicação do DT, ocorre a transferência de informações da representação virtual até a realidade física, possibilitando a tomada de decisões derivadas do estudo das respostas fornecidas pelo modelo virtual para serem aplicadas no sistema físico ou para a coleta de informações adicionais para refinar ainda mais a representação virtual.

A integração entre os componentes da rede é vital para a acurácia e eficácia do Digital Twin, onde ocorre uma alimentação constante da rede de comunicação e permite uma sincronização dos componentes e um estado de evolução constante, promovendo um modelo virtual dinâmico e responsivo às alterações de suas contra-partes.

Desta forma, diferentes aplicações dos DT podem trazer características distintas para a rede de comunicação entre os dados, criando um modelo que depende da complexidade e cenário da realidade física e da representação virtual. Apesar disso, aplicações complexas costumam apresentar atributos em comum, como a alta fidelidade, a dinâmica, a auto-

evolução, a identificabilidade, a multi-escala e multi-físico, a multidisciplinaridade e a hierarquia (Singh et al., 2021).

A alta fidelidade corresponde à necessidade da representação virtual ser uma cópia quase idêntica à realidade física da aplicação, especialmente em termos de aparência, conteúdos e funcionalidade. A fidelidade do modelo é definida a partir da precisão da representação (Errandonea et al., 2020). Uma representação virtual super-realista auxilia o DT a imitar qualquer aspecto de seu gêmeo físico, onde o grau de fidelidade extrema é definido quando as simulações e previsões do Digital Twin tendem a ser confiáveis quando postas em ação frente a um conjunto de ações e cenários alternativos.

A dinâmica determina o grau de capacidade do DT em acompanhar as mudanças ocorridas na realidade física (Haag; Anderl, 2018). Está relacionado à conexão e ao compartilhamento contínuo de dados em tempo real entre os componentes da rede. Os dados podem ser classificados como estáticos, em caso de dados históricos e descritivos, ou dinâmicos, para dados em tempo real. Um Digital Twin dinâmico é capaz de espelhar o comportamento realístico de seu gêmeo físico.

A auto-evolução representa uma atualização constante do Digital Twin a partir de mudanças na realidade física que está sendo tratada, durante todo o seu ciclo de vida. Qualquer alteração que houver no meio físico ou no DT é refletida na sua contraparte, criando um ciclo de feedback fechado na rede. A representação virtual é atualizada e otimizada automaticamente a partir dos dados coletados e transmitidos em tempo real pelo gêmeo físico, amadurecendo todo o modelo com base nos dados utilizados.

A identificabilidade diz que a representação virtual deve ser dedicada à representação física (VanDerHorn; Mahadevan, 2021). Desta forma, um DT pode ser identificado exclusivamente com base na realidade física, já que é abrangida a última versão do ciclo de vida do produto, com todos os dados evoluídos.

Além do mais, a representação virtual da realidade física, necessita absorver as características do gêmeo físico em multi-escalas. Portanto, o modelo virtual no DT é construído com base em características geométricas macroscópicas da realidade física, tais como sua forma, dimensões e tolerância, bem como em características microscópicas, como a rugosidade superficial (VanDerHorn; Mahadevan, 2021). Ele integra informações desde o nível microscópico atômico até o nível macroscópico geométrico.

Assim como o DT é multi-físico, pois além das características geométricas mencionadas anteriormente, o modelo também incorpora as propriedades físicas do gêmeo físico (Singh et al., 2021). Isso inclui modelos de dinâmica estrutural, modelos termodinâmicos, modelos de análise de tensão, modelos de fadiga e danos, bem como propriedades materiais, como rigidez, resistência, dureza e resistência à fadiga.

A multidisciplinaridade requer que o DT seja capaz de abordar todos os conceitos presentes na realidade física, como informática, mecânica, elétrica, eletrônica, metalurgia e automação. Assim como a hierarquia faz com que seja necessário que todos os componentes presentes na realidade física estejam presentes no DT correspondente, permitindo que o modelo possa ser interpretado como uma série de submodelos integrados (Glaessgen; Stargel, 2012).

### **3.3 FLEXSIM**

O FlexSim é um software orientado por objetos, desenvolvido pela FlexSim Software Products, Inc. e caracterizado como uma ferramenta avançada de modelagem e análise de simulações 3D, utilizado para representar, modelar, simular, visualizar e monitorar atividades e sistemas de processo de fluxo dinâmico, através de tecnologias de Digital Twin (FlexSim, 2024; Luściński; Ivanov, 2020). Desenvolvido para facilitar a simulação, o

FlexSim é um conjunto inteiro de ferramentas de desenvolvimento para elaborar e compilar aplicações a uma variedade de indústrias.

Atuando como uma ferramenta de projeto e avaliação auxiliada por computador para sistemas flexíveis de manufatura (FMS), tem como objetivo fornecer uma visão dinâmica e tridimensional dos processos, permitindo o teste de cenários hipotéticos em um ambiente virtual, auxiliando no estudo de sistemas aplicados em ambientes reais (Gelenbe; Guennouni, 1991; Zhu et al., 2014). Para seu funcionamento, é criada uma relação de interdependência entre o modelo de representação de banco de dados para um sistema FMS e seu modelo de simulação.

Baseado em tecnologias de processamento de imagens tridimensionais computadorizadas, técnicas de simulação, realidade virtual e manipulação de dados, o software trabalha com um conjunto de dados avançado que permite a criação de modelos fiéis à realidade. Utilizado para aplicações de manufatura, cadeia de suprimentos, estoque, sistemas de saúde, mineração e logística, fornece informações relevantes para a realização de simulações e possibilidades de otimização do sistema (Medan, 2021).

A simulação com o FlexSim oferece uma visão dinâmica e tridimensional dos processos, permitindo aos usuários visualizar claramente o fluxo de trabalho, identificar gargalos e testar mudanças antes de implementá-las fisicamente (Nordgren, 2003). Além disso, o FlexSim atua como uma ferramenta valiosa para visualizar e apoiar iniciativas de manufatura enxuta, permitindo simulações detalhadas que podem revelar oportunidades de melhoria contínua.

A utilização correta da ferramenta é capaz de garantir que os custos associados ao tempo, equipamentos e investimentos sejam minimizados. Através da simulação, é possível realizar experimentos em um ambiente controlado, ajustar parâmetros e obter resultados rápidos, o que ajuda a evitar desperdícios e reduzir custos. O software também é capaz de fornecer análises detalhadas e relatórios que podem ser usados para confirmar decisões estratégicas e operacionais (Luściński; Ivanov, 2020).

O funcionamento do software é baseado em uma arquitetura formada por sistemas físicos, sistemas de controle e bancos de dados que atuam através de compiladores e fluxos dinâmicos de dados, que formam um ambiente que integra todos esses componentes (Medan, 2021). Sendo assim, os sistemas considerados FMS são compostos por um conjunto de áreas de trabalho e um sistema de transporte com a função de processar cada parte individualmente.

A implementação de modelos no FlexSim é permitida através dos sistemas físicos, onde cada estação de trabalho consiste em máquinas ou ferramentas controladas por computador, onde são armazenados dados das ferramentas e o mecanismo de funcionamento dos recursos que pertencem ao sistema (Gelenbe; Guennouni, 1991). A comunicação entre cada estação de trabalho é realizada por sistemas de transporte, que transportam as propriedades de cada recurso entre as áreas, podendo ser unidirecional ou bidirecional.

Um sistema de controle atua como um processador principal do sistema integrado dentro de uma rede de comunicação local, criando um fluxo dinâmico que se utiliza dos sistemas físicos e de transporte para controlar o compartilhamento de elementos ou informações entre os componentes do modelo, criando rotas alternativas e direcionando um conjunto de dados para outro espaço de trabalho em caso de problemas, como um gargalo (Nordgren, 2003; Gelenbe; Guennouni, 1991).

Intrinsecamente ao conjunto de sistemas, há um desenvolvedor de aplicativos que permite aos usuários desenvolver novas simulações e incluir interfaces gráficas distintas, bibliotecas de objetos e um menu de estruturas para cada tipo de nicho que mercado em que se pretende realizar a modelação (Gelenbe; Guennouni, 1991). Tendo o desenvolvimento finalizado, o usuário pode compilar todos os objetos, interfaces, indústrias específicas desenvolvidas e mecanismos de simulação para um produto final através do compilador ou

incluir em outro modelo em expansão.

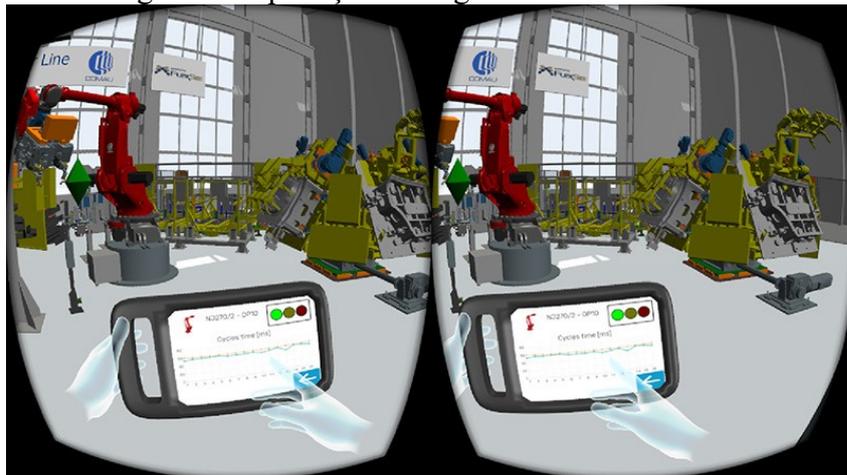
A aplicação do FlexSim se expande para áreas de manufatura, indústria 4.0, robótica, automação, mecânica, saúde, logística e acadêmicas, criando um cenário propício para um acolhimento geral do software em diferentes mercados de trabalho, auxiliando no estudo de processos, inovações e aprimoramento, validando cenários para implementações fiéis à realidade (FlexSim, 2024).

Em resumo, o FlexSim é uma solução de simulação que permite às organizações entenderem melhor seus sistemas e processos, experimentarem mudanças em um ambiente seguro e basearem suas decisões em dados concretos e análises precisas. É uma ferramenta que transforma a complexidade dos sistemas em modelos compreensíveis e interativos, facilitando a tomada de decisões e a busca por eficiência e eficácia operacional.

### 3.3.1 Digital Twin FlexSim

A ferramenta de Digital Twin do FlexSim representa um avanço significativo na simulação e modelagem de sistemas complexos. Com a capacidade de criar uma réplica virtual precisa de processos físicos, como apresentado na figura 8. O Digital Twin do FlexSim permite que os usuários testem e otimizem operações em um ambiente seguro e controlado.

Figura 8 - Aplicação de Digital Twin no FlexSim.

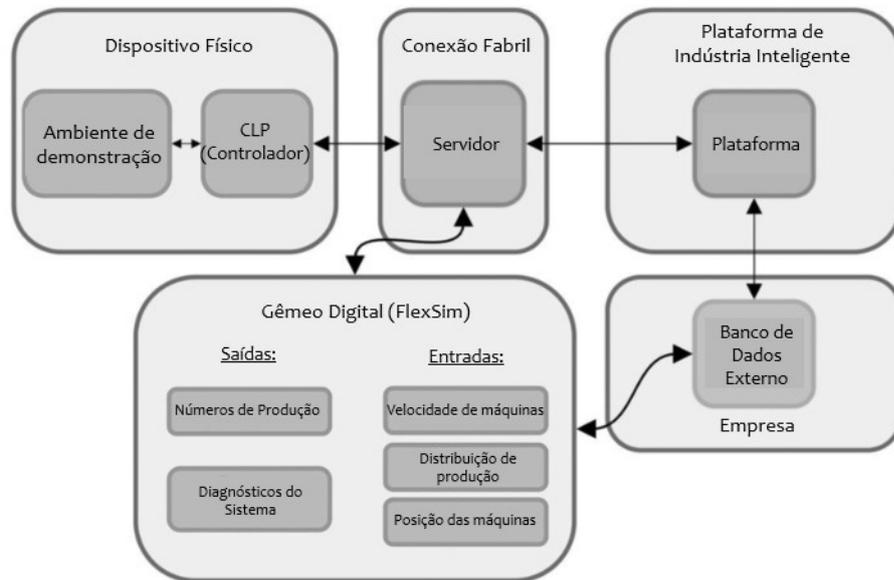


Fonte: FlexSim (2024)

O software possui recursos robustos de conectividade com bancos de dados, facilitando a importação e exportação de dados que serão processados pelo DT. A ferramenta também suporta comunicação avançada, incluindo uma API RESTful HTTPS, interface de servidor web e extensibilidade ilimitada por meio de DLLs e um SDK de módulo (Cueva, 2016; Luściński; Ivanov, 2020). Outro aspecto inovador é o suporte a inteligência artificial e aprendizado de máquina, incluindo uma ferramenta para treinar algoritmos de aprendizado por reforço (FlexSim, 2024).

Um exemplo para aplicações industriais de um DT que utiliza o FlexSim é apresentado na figura 9, onde é criada uma rede de compartilhamento de dados avançados formadas por dispositivos físicos, conexões de rede e plataformas de dados internas e externas que são responsáveis por tratar os dados recebidos a partir de cada interação com o sistema físico de cada componente e transmiti-los para as demais partes de acordo com a programação do modelo para o funcionamento adequado da simulação.

Figura 9 - Aplicação do FlexSim como Digital Twin na Indústria.



Fonte: Eyring et al. (2022)

A capacidade de visualizar modelos de simulação em realidade virtual com controles de toque é uma das principais características do FlexSim, proporcionando uma imersão e compreensão mais profundas do sistema modelado. Isso, combinado com a possibilidade de realizar simulações automáticas em intervalos regulares ou mesmo em tempo real, coloca o FlexSim à frente no desenvolvimento de aplicações de Digital Twin.

### 3.4 Diretrizes de Design para Ferramentas de Autoria

O progresso tecnológico ocorrido nos últimos anos trouxe grandes mudanças na vida moderna e no cenário comercial de sistemas de informação. A adoção exponencial de tecnologias e o surgimento de equipamentos capazes de processar dados cada vez mais rápidos, trazem a necessidade do usuário atualizar-se constantemente para uma utilização eficaz daquilo que é disponibilizado. Shneidermann (2006) apresenta em seu livro *O Laptop de Leonardo*, a necessidade de desenvolver aplicações voltadas para a utilização do usuário.

Através de investimentos, indústrias ao redor do mundo inteiro têm buscado desenvolver estudos para explorar o potencial de trazer soluções tecnológicas e analisar os benefícios para seus negócios, incluindo mudanças das operações de negócio, produtos, processos, estruturas e conceitos administrativos (Chamusca, 2023). A transformação cibernética tem afetado diretamente a forma como organizações e pessoas abordam questões de suas vidas pessoais, de trabalho e comunicação.

A partir disso, a modernização digital se destaca pela adoção de soluções tecnológicas disruptivas, como inteligência artificial e realidade virtual para aumento da produtividade e alterando a forma como as pessoas interagem com ela, profissionalmente ou não (Chamusca, 2023). Os benefícios se expandem desde diagnósticos mais precisos até a escalabilidade de serviços que criam redes inteligentes capazes de receber e transmitir uma infinidade de informações em tempo real.

Dentro do desenvolvimento de produtos, a realidade virtual busca substituir produtos físicos ou interações no mundo real por virtuais, auxiliando na implantação de processos sustentáveis que reduzem a emissão de carbono e em uma diminuição dos gastos envolvidos na construção de modelos de simulação físicos (Netto et al., 1998).

Dentro desse cenário, se encontram as ferramentas de autoria, caracterizadas como aplicações de software que permitem aos usuários criar conteúdo multimídia interativo e envolvente, possibilitando a criação eficiente de materiais por meio de mudanças mínimas. O termo ferramentas de autoria tange a estruturas de software que englobam um conjunto de ferramentas e recursos considerados fundamentais para a criação de conteúdo, além de permitir uma manutenção do produto acelerada e eficaz (Chamusca, 2023).

O principal objetivo dessas ferramentas é simplificar o processo de desenvolvimento, apresentando requisitos de habilidades de acordo com aquilo que se deseja implementar, podendo ser caracterizado como autoria de baixa fidelidade, que requer habilidades de programação básicas, e autoria de alta fidelidade, que necessita de habilidades avançadas de programação.

Desta forma, devido à natureza complexa de tecnologias imersivas, são necessários conhecimentos avançados de profissionais para trabalharem em cima de sistemas com essas características, incluindo conhecimento técnico em programação e modelagem 3D. Isso se deve ao fato de ferramentas de autoria servirem como validadores de modelos e não como uma área para desenvolvimento de ideias e inovações. Com isso, cria-se uma dificuldade para aplicação de múltiplos usuários para este tipo de software, caracterizando uma falta de maturidade da tecnologia, trazendo grandes divergências quanto à utilização de processos padronizados, linguagem comum, falta de interoperabilidade e falta de práticas recomendadas.

Geralmente, as ferramentas de autoria são pré-programadas e oferecem uma interface pronta para uso, completa com modelos, mídias, ferramentas, interações e testes que o usuário pode organizar e manipular facilmente (Chamusca, 2023). Sendo assim, produtos de alta tecnologia devem apresentar boa usabilidade, que se refere a uma medida qualitativa da facilidade com que um ser humano pode empregar as funções e recursos oferecidos.

Desta forma, o conjunto de inovações surgidas não apenas remodelou indústrias e economias, mas também influenciou profundamente a sociedade e a cultura. A maneira como as pessoas se comunicam, aprendem, trabalham e se divertem foi reinventada. No entanto, a importância da adaptação de tais tecnologias para uma utilização universal e intuitiva do usuário se faz primordial para um uso efetivo das ferramentas.

Um passo importante para a presente geração tecnológica é promover o acesso universal aos serviços de informação e comunicação, havendo uma harmonia entre a tecnologia e as necessidades do usuário (Shneidermann, 2006). A elaboração de designs centrados nos usuários, permitem uma utilização proveitosa daquilo que é disponibilizado, auxiliando o crescimento e diminuindo drasticamente os gastos no ciclo vital do software (Landauer, 1995).

Para a proposição de um design centrado no usuário, se faz necessário o estabelecimento de uma gama de requisitos mínimos, capazes de classificar cada software de acordo com sua fidelidade a cada tópico determinado, denominados diretrizes de design (Shneidermann, 2006). As diretrizes de design atuam como um intermediário entre as necessidades do cliente e o desenvolvimento do software por empresas, auxiliando no modelamento do produto para um melhor resultado (Chamusca, 2023).

As diretrizes classificam aquilo que é necessário para ferramentas serem consideradas intuitivas, ajudando os desenvolvedores de software a selecionar e criar os recursos e requisitos necessários para satisfazer cada diretriz, conforme apresentado pela figura 10. Dentro da realidade virtual, as diretrizes de design promovem o desenvolvimento de experiências mais realistas e imersivas, mescladas a uma utilização intuitiva da ferramenta.

De forma geral, podem incentivar o desenvolvimento de plataformas de uma forma facilitada, evitando problemas futuros relacionados à dificuldade de utilização da interface da ferramenta, democratizando a tecnologia e aumentando sua maturidade, trazendo uma adoção descomplicada de todo o sistema (Chamusca, 2023).

Figura 10 - Aplicação de Diretrizes de Design em Ferramentas de Autoria.



Fonte: Chamusca (2023)

As diretrizes utilizadas neste presente artigo se baseiam na dissertação de mestrado *Design guidelines for intuitive virtual reality authoring tools*, desenvolvida pela discente Iolanda Lima Chamusca, a qual busca reunir um conjunto de diretrizes, com base em um conjunto de referências, com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento e a avaliação de ferramentas de autoria que utilizam realidade virtual (Chamusca, 2023).

No total são utilizadas catorze diretrizes, sendo a Adaptação e Comunalidade; Automação; Customização; Democratização; Metaforização; Liberdade de movimento; Otimização e balanço de diversidade; Documentação e tutoriais; Criação imersiva; Feedback imersivo; Feedback em tempo real; Reutilização; Compartilhamento e colaboração; Programação visual (Chamusca, 2023).

A adaptação e comunalidade se refere à interoperabilidade da ferramenta, permitindo uma compatibilidade e interação com diferentes fontes de fornecimento de dados, adaptáveis para cada caso e propósito. A comunicação entre os equipamentos conectados à ferramenta de autoria e a própria ferramenta deve ser eficaz em âmbitos de hardware e/ou software. De forma geral, para um compartilhamento eficaz, a troca de informações deve ser padronizada e normalizada dentro de um conceito padrão, permitindo uma estrutura padrão capaz de interpretar os dados.

A automação diz respeito ao processamento automatizado de atividades que naturalmente exigiram a interferência humana, auxiliando na leitura e adaptando-se com base na interpretação do modelo, onde algoritmos complementam a atividade humana para evitar atividades improdutivas. Os algoritmos são capazes de analisar detalhadamente cada parte que compõem a ferramenta e, com base no objetivo da implementação, aprimorar o processo a partir de sutis mudanças, como a diminuição de excesso desnecessário de material em uma peça. Além disso, permite utilizar a criação intuitiva de funcionalidades interativas adicionais configuráveis com base na realidade analisada.

A customização é definida pela liberdade dada ao usuário para realizar as mudanças que preferir com o sistema. Nas ferramentas de autoria, é buscado trazer uma customização não somente na alteração da aparência do software e dos componentes, mas também na implementação de conteúdos tridimensionais e de realidade virtual que podem ser configurados enquanto a programação estiver sendo executada, definindo o comportamento dos objetos existentes no modelo.

A democratização representa o fornecimento de conhecimentos técnicos de maneira simplificada. A democratização é apresentada na forma de bibliotecas e expansões no software, permitindo a implementação de lógicas de funcionamento simplificadas. Em muitos casos, o próprio software apresenta uma estrutura de código aberto que permite aos pesquisadores desenvolverem ferramentas em cima da camada inicial do funcionamento do sistema. A utilização do software não deve necessitar de conhecimentos avançados ou qualquer formação extensa e dispendiosa.

A metaforização se refere em transformar conceitos abstratos em ferramentas tangíveis. Por exemplo, a representação de recursos visuais e gestos para replicar ações do mundo físico em um mundo virtual, aumentando a imersão do usuário. Os usuários do software podem acessar o mundo em miniatura e experimentá-lo em escala real para fazer alterações no conteúdo. A aplicação da metaforização deve apresentar uma lógica genérica para a construção de tarefas que devem ser compreensíveis para usuários sem conhecimento técnico.

A liberdade de movimento é definida pela imitação dos movimentos corporais e interações através da realidade virtual, criando um ambiente imersivo com base nas ações realizadas pelo usuário no mundo real. O modelo virtual pode ser influenciado diretamente pelo usuário, alterando a posição, orientação e escala dos componentes, além de interagir com ferramentas que podem ser agarradas e manipuladas, fornecendo um ambiente totalmente interativo.

A otimização e balanço de diversidade é definida pela facilitação da implementação de experiências autorais sem limitar qualquer concretização de ideias. O processamento computacional é economizado com a redução da complexidade do sistema, sem impedir qualquer desenvolvimento do usuário ou funcionamento de ferramentas. Geralmente, pode ser obtido com a utilização de outras diretrizes, como automação, programação visual e reutilização.

A documentação e tutoriais, como o nome já diz, representa a presença de documentos que abrangem informações capazes de educar o usuário quanto à utilização da ferramenta, apresentando demonstrações passo a passo de processos. Podem ser acessados facilmente através de menus ou dinamicamente durante o desenvolvimento do modelo, apresentando informações relevantes e simples para o usuário.

A criação imersiva diz respeito à qualidade do design utilizado na estruturação do ambiente virtual, apresentando um processamento gráfico detalhado e acelerado, evitando a utilização de figuras 2D ou projeções. A diretriz abrange aplicações onde múltiplas atividades podem ser performadas simultaneamente à simulação da realidade virtual e utilizá-las para aumentar a experiência de imersão do usuário. As experiências devem conter conteúdos multissensoriais e ferramentas capazes de interagir com o ambiente virtual.

O feedback imersivo correlaciona o fluxo de dados fornecido pelo software de acordo com as ações visuais e físicas do usuário com dispositivos de hardware externos ao sistema, que se comunicam entre si e atuam de acordo com a programação. Os dispositivos externos podem ser displays, controladores e vestimentas que servem de fonte extra de informação para a imersão do usuário. Em aplicações de realidade virtual, as respostas transmitidas por cada componente do sistema podem adquirir características térmicas, vibrotátil e fluxos de ar direcionados, garantindo um suporte multisensorial do modelo.

O feedback em tempo real caracteriza a resposta dada pelo software na forma de uma visualização ou percepção física fornecida no mesmo instante que é realizada no modelo virtual. Para o funcionamento da resposta instantânea, são envolvidos sistemas de edição 3D, programação gráfica, compiladores de código, visualização de animações ou configurações de hardware específicas para cada cena. O software pode trabalhar separadamente, permitindo a atuação de partes distintas do modelo individualmente e garantindo uma visualização prévia

em tempo real da simulação, auxiliando na avaliação dos parâmetros utilizados.

A reutilização diz respeito à otimização do tempo através da recuperação de elementos relevantes de uma coleção ou biblioteca do software, podem ser arquivos de projetos 2D ou 3D, áudios, programações anteriores de comportamentos e interações entre os componentes, animações e configurações de interface. A reciclagem dos elementos permite ao usuário não precisar ter conhecimentos avançados de cada área que compõe cada coleção ou biblioteca, facilitando a implementação de modelos completos.

O compartilhamento e colaboração é relacionado à criação e manipulação do ambiente virtual por meio de correntes de colaboração entre diferentes usuários que pertencem ao mesmo grupo de trabalho, onde cada um pode colaborar para o desenvolvimento da simulação, trabalhando com imersões multisensoriais de uma rede local ou remota. Qualquer alteração ou ação realizada por algum usuário pode ser observada em tempo real por outros presentes no compartilhamento, promovendo uma colaboração entre diferentes profissionais capazes de agregar seus conhecimentos e experiências ao modelo. Os usuários podem ser identificados por seus respectivos nomes ou a utilização de avatares personalizados.

A programação visual é definida pela programação realizada por meio do fluxo de dados ao invés da programação padrão, que utiliza linhas de código, para criar comportamentos e reações para cada componente, personagem e objeto do modelo, reduzindo o número de variáveis de texto e beneficiando a visualização do funcionamento do programa. É representada na forma de blocos dinâmicos distintos para cada cenário do modelo, podendo incluir gráficos de eventos que auxiliam usuários sem conhecimentos avançados em programação.

A partir disso, o quadro 3 apresenta um agregado de todas essas definições, que serão utilizadas para a pesquisa quantitativa.

Quadro 3: Definições de cada diretriz de design

(continua)

<b>Conceito</b>	<b>Definição</b>
Adaptação e Comunalidade	A adaptação e comunalidade se refere à interoperabilidade da ferramenta, permitindo uma compatibilidade e interação com diferentes fontes de fornecimento de dados, adaptáveis para cada caso e propósito.
Automação	A automação diz respeito ao processamento automatizado de atividades que naturalmente exigiram a interferência humana, auxiliando na leitura e adaptando-se com base na interpretação do modelo, onde algoritmos complementam a atividade humana para evitar atividades improdutivas.
Customização	A customização é definida pela liberdade dada ao usuário para realizar as mudanças que preferir com o sistema.
Democratização	A democratização representa o fornecimento de conhecimentos técnicos de maneira simplificada. A democratização é apresentada na forma de bibliotecas e expansões no software, permitindo a implementação de lógicas de funcionamento simplificadas.
Metaforização	A metaforização se refere em transformar conceitos abstratos em ferramentas tangíveis. Por exemplo, a representação de recursos visuais e gestos para replicar ações do mundo físico em um mundo virtual, aumentando a imersão do usuário.

Quadro 3: Definições de cada diretriz de design

(conclusão)

Liberdade de Movimento	A liberdade de movimento é definida pela imitação dos movimentos corporais e interações através da realidade virtual, criando um ambiente imersivo com base nas ações realizadas pelo usuário no mundo real.
Otimização e Balanço de Diversidade	A otimização e balanço de diversidade é definida pela facilitação da implementação de experiências autorais sem limitar qualquer concretização de ideias.
Documentação e Tutoriais	A documentação e tutoriais, como o nome já diz, representa a presença de documentos que abrangem informações capazes de educar o usuário quanto à utilização da ferramenta, apresentando demonstrações passo a passo de processos.
Criação Imersiva	A criação imersiva diz respeito à qualidade do design utilizado na estruturação do ambiente virtual, apresentando um processamento gráfico detalhado e acelerado, evitando a utilização de figuras 2D ou projeções.
Feedback Imersivo	O feedback imersivo correlaciona o fluxo de dados fornecido pelo software de acordo com as ações visuais e físicas do usuário com dispositivos de hardware externos ao sistema, que se comunicam entre si e atuam de acordo com a programação.
Feedback em Tempo Real	O feedback em tempo real caracteriza a resposta dada pelo software na forma de uma visualização ou percepção física fornecida no mesmo instante que é realizada no modelo virtual.
Reutilização	A reutilização diz respeito à otimização do tempo através da recuperação de elementos relevantes de uma coleção ou biblioteca do software, podem ser arquivos de projetos 2D ou 3D, áudios, programações anteriores de comportamentos e interações entre os componentes, animações e configurações de interface.
Compartilhamento e Colaboração	O compartilhamento e colaboração é relacionado à criação e manipulação do ambiente virtual por meio de correntes de colaboração entre diferentes usuários que pertencem ao mesmo grupo de trabalho, onde cada um pode colaborar para o desenvolvimento da simulação, trabalhando com imersões multisensoriais de uma rede local ou remota.
Programação Visual	A programação visual é definida pela programação realizada por meio do fluxo de dados ao invés da programação padrão, que utiliza linhas de código, para criar comportamentos e reações para cada componente, personagem e objeto do modelo, reduzindo o número de variáveis de texto e beneficiando a visualização do funcionamento do programa.

Fonte: Autor (2024)

Portanto, as diretrizes de design representam um conjunto de requisitos que devem ser considerados durante o desenvolvimento de um software, auxiliando na criação ou

aprimoração de ferramentas de autoria, já que buscam valorizar qualidades que facilitam a utilização do usuário e, conseqüentemente, uma utilização e adoção eficaz da ferramenta.

#### 4 AVALIAÇÃO DO FLEXSIM UTILIZANDO DIRETRIZES DE DESIGN

As ferramentas de autoria podem ser caracterizadas através da presença de ativos em comum, como a presença da possibilidade de modelamento 3D através de esboços imersivos utilizando RV, edição de componentes 3D e seus respectivos comportamentos no modelo, criação de agentes que interagem com o modelo através de RV, controle flexível dos espaços de trabalho, permitindo a análise de dados específicos em determinado momento da simulação ou até mesmo a implementação de programações visuais para reproduzir cenários de treinamento gamificados (Chamusca, 2023).

Portanto, o FlexSim atuando como um software inovador que apresenta uma gama de ferramentas com o objetivo de criar análises e modelos em 3D com base na tecnologia de Digital Twin, pode ser classificado como uma ferramenta de autoria, destacando sua flexibilidade no manuseio dos dados e a liberdade de executar atividades dinâmicas dentro de cada modelo, incluindo a presença de RV e seus respectivos ambientes físicos e digitais.

Com isso, é possível avaliar o FlexSim com base nas diretrizes de design determinadas anteriormente e comparar com os resultados obtidos através da pesquisa quantitativa, que obteve um total de sete respostas.

##### 4.1.1 Adaptação e Comunalidade

O FlexSim é amplamente reconhecido por sua capacidade de integração com uma variedade de fontes de dados e sistemas. Ele suporta a importação e exportação de dados em formatos comuns como CSV, Excel e XML, o que facilita a integração com bancos de dados corporativos e outros sistemas de gerenciamento de informações. Além disso, o FlexSim oferece suporte a interfaces ODBC (Open Database Connectivity), permitindo a conexão com diferentes bases de dados de forma eficiente e segura, como arquivos SQL (FlexSim, 2024).

Além disso, demonstra uma forte capacidade de se conectar a outros sistemas, como ERPs (Enterprise Resource Planning), MES (Manufacturing Execution Systems) e WMS (Warehouse Management Systems) (FlexSim, 2024). Essa conectividade é essencial para garantir que os dados utilizados nas simulações sejam precisos e atualizados, refletindo a realidade operacional das empresas.

O software também apresenta suporte a múltiplos protocolos e padrões, como TCP/IP, que permitem a interação com uma ampla gama de dispositivos e sistemas. Isso é particularmente útil em ambientes de manufatura e logística onde a integração de hardware e software é fundamental para operações eficientes.

A adaptação da ferramenta está relacionada ao desenvolvimento de diferentes programações através do FlexScript, onde é possível controlar e combinar comportamentos a cada objeto do modelo (FlexSim, 2024). A partir do código, é possível exportar e importar bancos de dados ou até mesmo se comunicar com outros aparelhos configurados e conectados na mesma rede, ajustando o modelo de acordo com as necessidades.

No entanto, a utilização dessas ferramentas demandam um conhecimento avançado, apresentando uma curva de aprendizado íngreme para usuários sem experiência prévia, devido a programações e configurações de sistemas avançadas e complexas. Embora o software ofereça muitas opções de personalização, muitas vezes a interface acaba não atuando de forma rápida e simplificada.

Para melhorar a adaptação e comunalidade, o FlexSim poderia investir em mais interfaces de usuário intuitivas e ferramentas de configuração que não exijam programação.

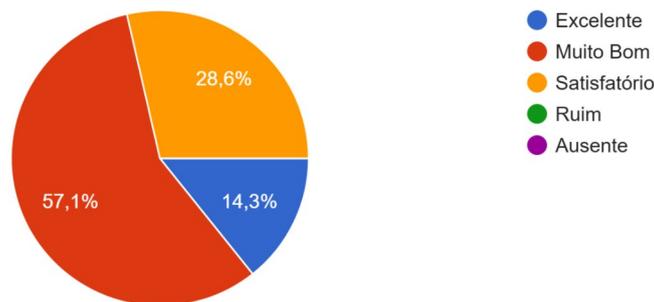
Além disso, a expansão de suporte para mais formatos de dados e protocolos emergentes pode aumentar ainda mais a interoperabilidade do software.

A pesquisa quantitativa realizada, apresentada na figura 11, apontou que a maioria dos respondentes classificou o nível de adaptação e comunalidade do FlexSim como *Muito Bom* ou *Satisfatório*, com algumas avaliações de *Excelente*.

Figura 11 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Adaptação e Comunalidade do FlexSim.

Qual o nível de Adaptação e Comunalidade do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.2 Automação

No que diz respeito à automação, o FlexSim oferece ferramentas robustas para a construção de modelos que podem ser parcialmente ou totalmente automatizados. Disponibilizando um conjunto de bibliotecas extensivas de objetos pré-definidos, os usuários podem arrastar e soltar componentes para criar modelos complexos rapidamente. Os objetos vêm com comportamentos incorporados que automatizam diversas atividades, como movimentação de materiais, processos de fabricação e logística interna.

O software incorpora algoritmos de otimização que permitem simulações dinâmicas e adaptativas (FlexSim, 2024). Por exemplo, os algoritmos de roteamento de materiais e alocação de recursos podem ser configurados para tomar decisões automaticamente com base em parâmetros definidos pelo usuário. Isso significa que, durante uma simulação, a ferramenta pode ajustar o fluxo de trabalho e a distribuição de recursos em tempo real, sem a necessidade de intervenção humana contínua.

Relacionado à adaptação e comunalidade, o sistema é capaz de realizar a integração com outros sistemas de controle industrial, permitindo que o FlexSim receba dados em tempo real do ambiente de produção, ajustando automaticamente o modelo de simulação para refletir as condições atuais. Além disso, a comunicação bidirecional entre o FlexSim e os sistemas de controle pode automatizar a tomada de decisões no chão de fábrica, ajustando parâmetros de produção em resposta a eventos e condições variáveis.

Além disso, o programa suporta a criação de scripts e macros usando linguagens de programação de baixo nível, como C++ e que serve de base para o FlexScript (FlexSim, 2024). Isso permite a automação de tarefas complexas e a personalização de comportamentos dos modelos, auxiliando na automatização da coleta de dados, a geração de relatórios, a execução de simulações em lote e a análise de resultados.

O FlexSim inclui ferramentas para a geração automática de relatórios detalhados e visualizações gráficas dos resultados da simulação. Esses relatórios podem ser configurados

para serem produzidos ao final de cada execução de simulação, fornecendo insights imediatos sobre o desempenho do sistema modelado. Isso reduz a necessidade de análise manual dos dados, tornando o processo mais eficiente.

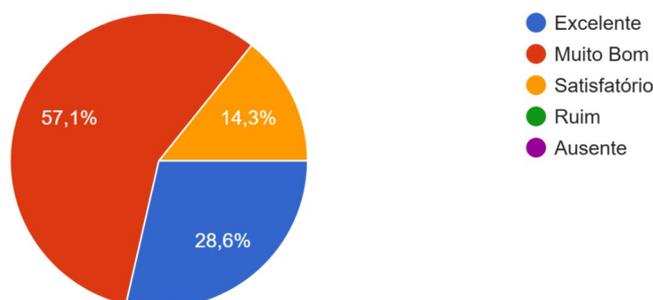
Assim como no tópico anterior, a complexidade envolvida no desenvolvimento destas operações é alta, exigindo conhecimentos técnicos avançados do usuário. Para mais, a configuração inicial de modelos complexos ainda requer uma quantidade significativa de intervenção humana, carecendo de uma interface intuitiva.

De acordo com a pesquisa quantitativa, mostrada na figura 12, os níveis de automação do FlexSim foram avaliados predominantemente como *Muito Bom* e *Excelente*, com nível *Satisfatório*.

Figura 12 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Automação do FlexSim

Qual o nível de Automação do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.3 Customização

O FlexSim oferece uma interface amigável e intuitiva que facilita a personalização de modelos. Os usuários podem arrastar e soltar objetos de uma biblioteca extensa e configurar suas propriedades conforme necessário. Cada objeto no FlexSim possui parâmetros configuráveis, permitindo ajustes detalhados para atender a diferentes requisitos de simulação (FlexSim, 2024). Além disso, o software permite a criação de objetos personalizados, que podem ser reutilizados em diferentes modelos, promovendo eficiência e consistência.

A geração de relatórios e visualizações é altamente customizável no FlexSim. Os usuários podem escolher quais dados são coletados durante a simulação e como esses dados são apresentados. Para mais, permite a criação de gráficos, tabelas e dashboards que ajudam na análise e interpretação dos resultados da simulação. Essa flexibilidade é essencial para adaptar a visualização dos resultados às necessidades específicas de diferentes stakeholders.

Conforme apresentado anteriormente, o FlexScript permite que os usuários escrevam códigos personalizados para definir comportamentos específicos dos elementos de simulação (FlexSim, 2024). Com isso, é possível ajustar detalhes precisos do modelo de simulação, criar lógicas complexas e desenvolver funcionalidades que não estão disponíveis nas opções padrão do software. Essa capacidade de script fornece uma liberdade significativa para os usuários avançados que desejam um controle total sobre suas simulações.

A capacidade de customização do FlexSim também se estende à integração com outros sistemas e dados externos. Os usuários podem configurar o software para importar dados de diversas fontes, como apresentado na adaptação e comunalidade, permitindo que os

modelos de simulação sejam atualizados com dados reais e relevantes, melhorando a precisão e a relevância das simulações.

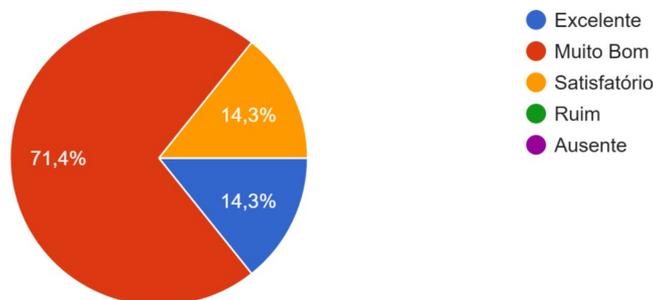
Desta forma, a ferramenta investe em uma UI (Interface de Usuário) e UX (Experiência de Usuário) que facilita a personalização, proporcionando uma experiência fluida e eficiente. Os usuários podem modificar layouts, adicionar painéis personalizados e ajustar a aparência geral do ambiente de trabalho (FlexSim, 2024). Essas opções de customização da interface permitem que cada usuário configure o ambiente de simulação de acordo com suas preferências e necessidades operacionais, aumentando a produtividade e o conforto no uso do software.

Apesar das robustas capacidades de customização, o FlexSim apresenta algumas limitações, especialmente para usuários menos experientes. A extensa gama de opções e a complexidade da linguagem FlexScript podem ser intimidadoras para novos usuários ou aqueles sem conhecimento técnico avançado. Há também a questão da documentação e suporte, que pode ser melhorada para oferecer guias mais detalhados e exemplos práticos que facilitem a curva de aprendizado.

A pesquisa quantitativa considerou a customização amplamente como *Muito Bom*, com algumas avaliações de *Excelente* e *Satisfatório*. Os resultados são apresentados na figura 13.

Figura 13 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Customização do FlexSim.

Qual o nível de Customização do FlexSim?  
7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.4 Democratização

Uma das principais formas pelas quais o FlexSim promove a democratização é através de suas bibliotecas de objetos e componentes pré-configurados. O software vem com uma extensa biblioteca de objetos, como máquinas, transportadores e armazéns, que podem ser facilmente arrastados e soltos no ambiente de simulação (FlexSim, 2024). Esses objetos já possuem lógicas básicas de funcionamento incorporadas, permitindo que usuários iniciantes criem modelos funcionais rapidamente sem a necessidade de programação.

Além disso, a interface gráfica do FlexSim facilita a criação e modificação de modelos de simulação. A interface baseada em arrastar e soltar, junto com menus contextuais e assistentes passo a passo, permite que usuários com pouca experiência técnica possam configurar simulações com os componentes padrões de maneira simplificada. Este foco na usabilidade reduz a barreira de entrada, tornando a ferramenta mais acessível a um público mais amplo.

A capacidade de analisar visualmente os resultados da simulação é outra forma pela qual o FlexSim promove a democratização. Através da automação, ferramentas de visualização como gráficos de desempenho, mapas de calor e dashboards interativos permitem que os usuários interpretem os dados de simulação de forma clara e intuitiva (FlexSim, 2024).

O software também oferece suporte a expansões e plugins que podem adicionar funcionalidades e simplificar processos específicos. Essas expansões podem incluir novos tipos de objetos, lógicas de simulação otimizadas e integrações com outros softwares (FlexSim, 2024). Ao permitir a adição de funcionalidades através de expansões, é oferecida uma maneira modular de aumentar a capacidade do software sem sobrecarregar o usuário com complexidade desnecessária.

São fornecidas uma ampla gama de documentação e recursos educacionais que suportam a democratização do conhecimento técnico. Isso inclui tutoriais em vídeo, manuais detalhados, exemplos de modelos e fóruns de usuários onde dúvidas podem ser esclarecidas. No entanto, muitas vezes dúvidas específicas relacionadas ao funcionamento global do sistema podem ser difíceis de serem encontradas, já que a documentação foca individualmente em cada componente que forma o modelo. Além disso, parte da documentação pode não ser útil para aplicações distintas, onde não abrangem informações específicas de cada item.

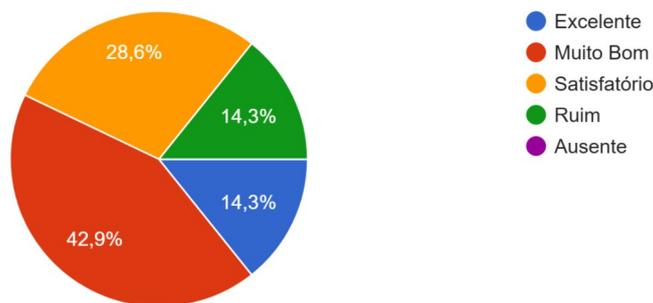
Embora o FlexSim ofereça muitas ferramentas para simplificar o uso do software, ainda existem áreas que poderiam ser melhoradas para aumentar a democratização. Aprimorar a facilidade de uso do scripting e fornecer mais exemplos específicos da indústria pode ampliar ainda mais essa acessibilidade, garantindo que todos os usuários possam maximizar o potencial do FlexSim.

A pesquisa quantitativa realizada apresentou que as avaliações variaram entre *Satisfatório* e *Muito Bom*, com alguns considerando *Excelente* e *Ruim*, como mostrado na figura 14.

Figura 14 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Democratização do FlexSim.

Qual o nível de Democratização do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.5 Metaforização

A metaforização é apresentada no FlexSim na forma de uma representação visual de processos complexos através de modelos gráficos. Os elementos do sistema, como máquinas, transportadores e armazéns, são representados por ícones e objetos gráficos que os usuários podem manipular diretamente. Isso transforma conceitos abstratos de fluxo de materiais e

processos logísticos em representações visuais claras e intuitivas, facilitando a compreensão e o design de modelos de simulação.

A ferramenta utiliza uma interface de arrastar e soltar para a construção de modelos de simulação (FlexSim, 2024). Esse recurso permite que os usuários criem e configurem seus modelos da forma que preferirem, arrastando objetos da biblioteca e posicioná-los na área de trabalho. Essa metáfora de construção tangível simplifica a tarefa de montagem de modelos complexos, tornando-a acessível mesmo para aqueles sem experiência em simulação ou programação. Além disso, durante a simulação os componentes presentes no modelo são animados e os movimentos dos objetos representam a operação real do sistema simulado.

Para mais, o usuário é capaz de interagir com os objetos mesmo durante a simulação, inclusive dentro daquelas que utilizam óculos de realidade virtual, tornando o conceito abstrato em algo tangível, transformando todo o ambiente dinâmico e de fácil utilização.

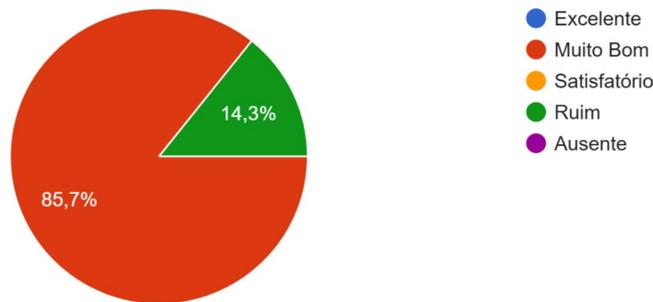
São fornecidos dashboards e widgets que permitem aos usuários monitorar e analisar dados em tempo real (FlexSim, 2024). Esses elementos gráficos transformam dados numéricos e métricas abstratas em representações visuais tangíveis, como gráficos de barras, diagramas de fluxo e mapas de calor, facilitando a interpretação dos resultados da simulação e a tomada de decisões baseada em dados.

Embora o FlexSim seja eficaz na utilização de metaforização, existem áreas que poderiam ser aprimoradas para tornar os conceitos ainda mais acessíveis, conforme validado pela pesquisa quantitativa apresentada na figura 15. Por exemplo, a complexidade de algumas representações gráficas e a necessidade de ajustar parâmetros detalhados podem ser desafiadoras para usuários iniciantes. Melhorar a intuitividade das interfaces de configuração e fornecer mais exemplos visuais e tutoriais interativos poderia ajudar a superar essas barreiras.

Figura 15 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Metaforização do FlexSim.

Qual o nível de Metaforização do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.6 Liberdade de Movimento

O FlexSim oferece suporte à realidade virtual, permitindo que os usuários visualizem e interajam com seus modelos de simulação em um ambiente imersivo. Através de headsets RV, como o Oculus Rift ou HTC Vive, os usuários podem entrar no modelo de simulação e observar os processos de uma perspectiva em primeira pessoa (FlexSim, 2024). Isso transforma a visualização tradicional em uma experiência mais envolvente, proporcionando uma melhor compreensão espacial e permitindo a identificação de problemas que poderiam

ser difíceis de perceber em uma visualização 2D.

Na RV, o software permite que os usuários usem controladores manuais para interagir com os objetos no ambiente de simulação. Esses controladores imitam os movimentos das mãos do usuário, permitindo que ele pegue, mova e manipule objetos de forma natural. Essa liberdade de movimento é crucial para simulações que envolvem layouts de fábrica, fluxos de trabalho logísticos e outras aplicações onde a interação física com o ambiente é importante. A visualização imersiva oferecida pelo FlexSim em ambientes de RV permite que os usuários recebam feedback instantâneo sobre as mudanças que fazem no modelo.

Essa capacidade de experimentar e ajustar em tempo real aumenta a eficiência da simulação e facilita a tomada de decisões informadas. A liberdade de movimento no FlexSim também é utilizada em aplicações de treinamento e educação. Simulações em RV permitem que trabalhadores e estudantes pratiquem operações em um ambiente seguro e controlado, imitando ações do mundo real sem riscos associados. A realidade virtual proporciona um meio eficaz para aprender e praticar procedimentos, melhorando a retenção de conhecimento e a competência prática.

Apesar das vantagens oferecidas pela liberdade de movimento no FlexSim, a implementação de RV requer hardware especializado, que pode ser caro e não acessível a todos os usuários. Além disso, a qualidade da experiência de RV depende muito da capacidade gráfica do computador e da precisão dos controladores de movimento, o que pode limitar a acessibilidade para algumas organizações.

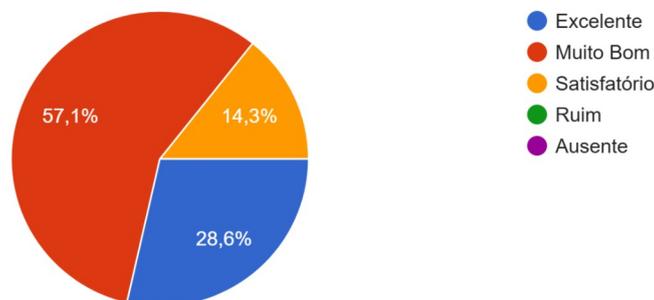
Para aprimorar a liberdade de movimento, o FlexSim poderia investir em otimizações de software para funcionar em uma gama mais ampla de hardware, tornando a RV mais acessível. Além disso, a integração de tecnologias de realidade aumentada poderia complementar a experiência de realidade virtual, permitindo que os usuários visualizem e interajam com modelos de simulação sobrepostos ao ambiente real, aumentando ainda mais a imersão e a utilidade prática.

De acordo com a pesquisa quantitativa, apresentada na figura 16, a maioria das respostas indicou *Excelente* e *Muito Bom*, com algumas avaliações de *Satisfatório*.

Figura 16 - Pesquisa Quantitativa sobre Nível de Liberdade de Movimento do FlexSim.

Qual o nível da Liberdade de Movimento do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.7 Otimização e Balanço da Diversidade

O FlexSim apresenta uma flexibilidade e capacidade de customização, permitindo que os usuários criem simulações altamente personalizadas. Através do uso de FlexScript, os usuários podem programar comportamentos específicos e implementar lógicas complexas que refletem suas necessidades únicas (FlexSim, 2024). Esta flexibilidade é essencial para suportar uma ampla gama de aplicações, desde manufatura e logística até saúde e serviços.

É possível realizar a modelagem de diversos cenários, o que é fundamental para o balanço da diversidade. Os usuários podem criar e comparar múltiplos cenários de simulação para testar diferentes estratégias e identificar a melhor abordagem para seus objetivos específicos. A capacidade de ajustar parâmetros dinamicamente e observar os impactos dessas mudanças em tempo real facilita a experimentação e a inovação.

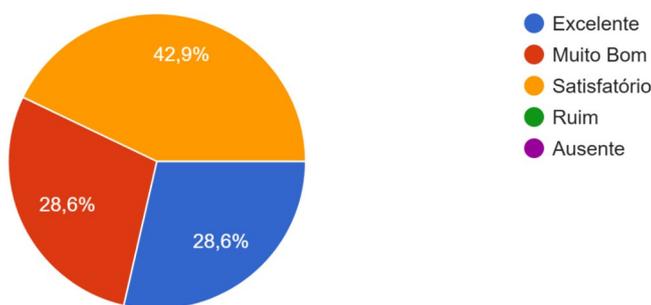
O FlexSim integra ferramentas de otimização que ajudam os usuários a encontrar soluções eficientes para seus problemas de simulação (FlexSim, 2024). Estas ferramentas utilizam algoritmos avançados para explorar diferentes configurações do modelo e identificar aquelas que potencializam ou não métricas específicas, como tempo de ciclo, custos operacionais ou utilização de recursos. A ferramenta oferece bibliotecas de objetos e templates específicos para cada indústria, permitindo que os usuários adaptem o software às suas necessidades particulares sem grandes dificuldades.

Apesar das robustas capacidades de otimização e balanço de diversidade do FlexSim, a complexidade do FlexScript e a necessidade ocasional de conhecimentos avançados em programação podem ser barreiras para alguns usuários. Melhorar a documentação e fornecer mais exemplos práticos e tutoriais interativos poderia ajudar a superar essas barreiras. A necessidade da realização de melhorias na diretriz é refletida no resultado da pesquisa quantitativa realizada, onde os resultados foram majoritariamente *Satisfatório*, com os demais variando entre *Muito Bom* e *Excelente*, conforme apresentado pela figura 17.

Figura 17 - Pesquisa Quantitativa sobre Otimização e Balanço de Diversidade do FlexSim

Qual o nível de Otimização e Balanço de Diversidade do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.8 Documentação e Tutoriais

O FlexSim oferece uma documentação extensa que cobre uma ampla gama de tópicos, desde a instalação do software até a criação de simulações complexas. A documentação é bem estruturada, facilitando a navegação pelos diferentes temas e a localização de informações específicas. A maioria dos componentes e funcionalidades do software são descritos em detalhes, com explicações claras sobre suas aplicações e configurações.

O FlexSim complementa sua documentação escrita com um conjunto de tutoriais em vídeo que demonstram processos e funcionalidades em tempo real. Os tutoriais cobrem uma boa parte dos conceitos básicos até algumas técnicas avançadas, ajudando a garantir que todos os usuários, independentemente de seu nível de habilidade, possam aproveitar a ferramenta.

Para ajudar os usuários a aplicar os conceitos aprendidos, o FlexSim fornece exemplos práticos e modelos padrão que podem ser utilizados como ponto de partida para simulações específicas. Além disso, os modelos padrão servem como templates que os usuários podem modificar conforme suas necessidades, economizando tempo e esforço na criação de simulações do zero.

Também, são mantidos fóruns de discussão onde os usuários podem fazer perguntas, compartilhar experiências e obter ajuda de outros membros da comunidade. Esses fóruns são um recurso valioso, pois permitem que os usuários aprendam uns com os outros e resolvam problemas específicos que podem não estar cobertos na documentação oficial. A comunidade ativa também contribui com scripts personalizados, dicas e soluções alternativas que podem enriquecer o uso do software.

Embora a documentação e os tutoriais do FlexSim sejam abrangentes, há áreas que poderiam ser melhoradas. Ainda há poucos vídeos disponibilizados e a documentação não abrange detalhadamente erros comuns que podem ocorrer durante as simulações. A complexidade do FlexScript e a necessidade de programação avançada para algumas funcionalidades podem ser desafiadoras para usuários menos experientes. Melhorar a clareza e a acessibilidade dos guias, talvez com exemplos mais básicos e interativos, poderia ajudar a reduzir essa barreira.

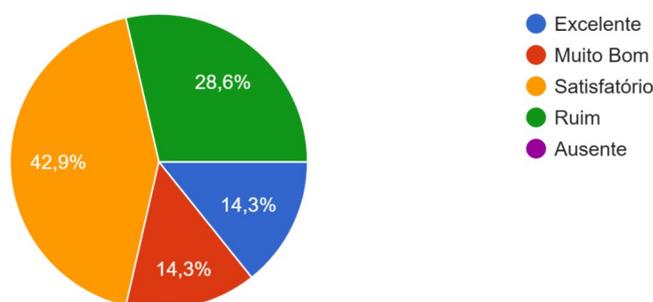
Além disso, a criação de tutoriais interativos dentro do próprio software, onde os usuários possam seguir os passos e receber feedback em tempo real, poderia aprimorar ainda mais a experiência de aprendizado. Os tutoriais interativos poderiam incluir exercícios práticos que ajudassem os usuários a aplicar imediatamente o que aprenderam, solidificando seu conhecimento.

O resultado da pesquisa quantitativa, mostrado na figura 18, apresentou uma divergência nos resultados, classificando majoritariamente a documentação e tutoriais do software como *Satisfatório*, mas também como *Ruim*, *Muito bom* e *Excelente*.

Figura 18 - Pesquisa Quantitativa sobre Documentação e Tutoriais do FlexSim.

Qual o nível da Documentação e Tutoriais do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.9 Criação Imersiva

O FlexSim se destaca pelo uso de gráficos 3D de alta qualidade, permitindo que os usuários criem simulações realistas e detalhadas. Cada objeto dentro do ambiente de simulação é renderizado em 3D, proporcionando uma visualização precisa e clara dos processos. Isso é fundamental para a criação de simulações que refletem fielmente o ambiente físico que está sendo modelado, seja uma linha de produção, um armazém logístico ou um hospital.

É utilizado um processamento gráfico acelerado para garantir que as simulações rodem suavemente, mesmo quando modelos complexos estão sendo utilizados. A capacidade de processar gráficos rapidamente é crucial para manter a interatividade e a fluidez da simulação, permitindo que os usuários façam ajustes em tempo real e observem os resultados instantaneamente.

O software proporciona um ambiente de simulação altamente interativo, onde os usuários podem navegar livremente, ajustar parâmetros, e manipular objetos em tempo real (FlexSim, 2024). A interface intuitiva de arrastar e soltar, combinada com a capacidade de zoom e rotação livre da câmera, permite que os usuários explorem e modifiquem a simulação de maneira natural e envolvente. Esta interatividade é um componente chave para uma criação imersiva eficaz.

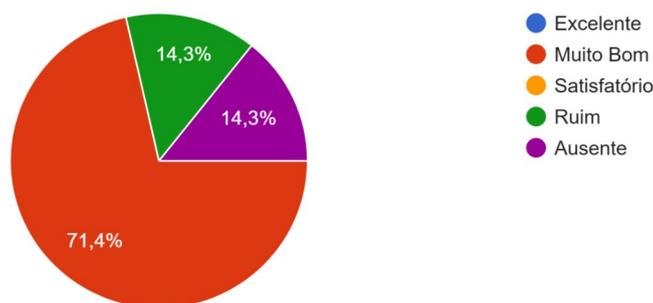
Apesar disso, aprimorar os detalhes gráficos e as texturas dos objetos pode elevar ainda mais a qualidade visual da simulação. A inclusão de sombras dinâmicas, reflexões e outros efeitos visuais avançados poderia contribuir para uma experiência ainda mais realista e envolvente.

A pesquisa quantitativa apresentou resultados predominantemente *Muito Bom*, mas com algumas avaliações negativas *Ausente* e *Ruim*, como apontado na figura 19.

Figura 19 - Pesquisa Quantitativa sobre Criação Imersiva do FlexSim.

Qual o nível da Criação Imersiva do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.10 Feedback Imersivo

O FlexSim oferece suporte para a integração com dispositivos de hardware externos, permitindo que os usuários interajam com a simulação de forma mais imersiva (FlexSim, 2024). Por exemplo, é possível conectar sensores de movimento, controladores de realidade virtual (VR), ou mesmo dispositivos de automação física, como esteiras transportadoras ou robôs industriais, ao software. Essa integração permite que as ações físicas do usuário sejam refletidas no ambiente virtual da simulação, proporcionando um feedback imersivo e realista.

A capacidade do software de correlacionar o fluxo de dados com as ações do usuário

permite a simulação de cenários realistas e dinâmicos. Além disso, oferece opções avançadas de personalização e configuração de feedback, permitindo que os usuários ajustem os parâmetros de acordo com suas necessidades específicas. Isso inclui a definição de triggers e eventos que acionam determinadas ações dentro da simulação em resposta às interações do usuário (FlexSim, 2024). Essa flexibilidade permite que os usuários adaptem o feedback imersivo de acordo com os requisitos de seus projetos e experimentos.

A integração do FlexSim com tecnologias de realidade virtual e realidade aumentada é um dos aspectos mais poderosos em termos de feedback imersivo, permitindo que os usuários experimentem a simulação de forma mais imersiva, interagindo com o ambiente virtual através de dispositivos como headsets RV ou dispositivos RA.

Apesar dos pontos fortes do FlexSim em termos de feedback imersivo, a integração com dispositivos de hardware externos pode ser complexa e requer conhecimentos técnicos especializados. Melhorar a documentação e fornecer exemplos práticos de integração poderia ajudar a superar essa limitação.

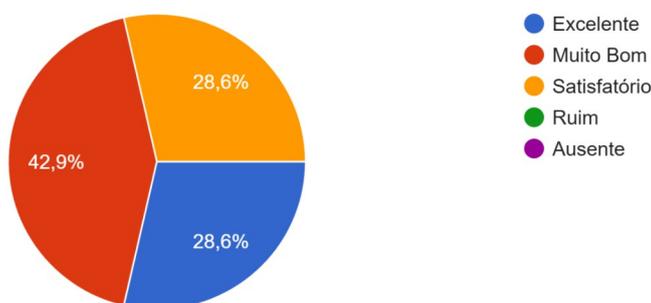
Além disso, a otimização do desempenho para suportar experiências mais imersivas, especialmente em ambientes de realidade virtual, pode ser uma área de foco para o aprimoramento contínuo do FlexSim. Garantir que a simulação seja executada suavemente, mesmo em configurações de hardware menos potentes, pode ampliar o acesso a essas tecnologias e tornar a experiência do usuário mais satisfatória.

Segundo a pesquisa quantitativa, mostrada na figura 20, as avaliações foram majoritariamente *Muito bom*, com as demais sendo *Satisfatório* e *Excelente*.

Figura 20 - Pesquisa Quantitativa sobre Feedback Imersivo do FlexSim.

Qual o nível de Feedback Imersivo do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.11 Feedback em Tempo Real

O FlexSim oferece uma atualização instantânea da visualização do modelo em resposta às ações realizadas pelo usuário. Isso significa que qualquer modificação feita no modelo, como mover um objeto, alterar um parâmetro ou iniciar uma simulação, é refletida imediatamente na interface do usuário (FlexSim, 2024). Essa resposta rápida e em tempo real permite que os usuários avaliem o impacto de suas ações sem atrasos perceptíveis, facilitando a compreensão do comportamento do sistema e a identificação de problemas potenciais.

O FlexSim fornece feedback visual claro e conciso para informar os usuários sobre o estado atual do modelo e as consequências de suas ações. Isso pode incluir indicadores visuais, como mudanças de cor, ícones ou animações, que destacam áreas críticas, eventos

importantes ou anomalias detectadas durante a simulação. Esse tipo de feedback ajuda os usuários a identificar rapidamente áreas de interesse e tomar medidas adequadas para resolver quaisquer problemas que surjam.

A interação bidirecional permite que os usuários experimentem diferentes cenários e observem instantaneamente como o modelo responde a suas entradas. Essa capacidade de interação direta facilita o processo de modelagem e permite que os usuários se iterem rapidamente sobre o design do modelo.

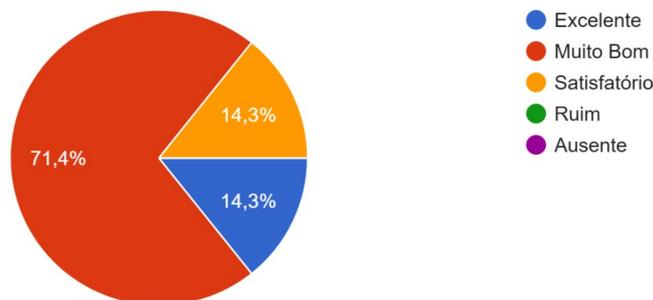
Em certos casos, o software pode fornecer feedback físico ou sensorial em tempo real, especialmente quando integrado com dispositivos de hardware externos. Isso pode incluir vibrações, sons ou outras formas de feedback físico que ajudam os usuários a entender melhor o comportamento do sistema.

Embora o FlexSim ofereça um forte suporte ao feedback em tempo real, em simulações extremamente complexas ou em cenários onde a atualização em tempo real é especialmente exigente, pode ocorrer uma degradação no desempenho do software. Melhorias na otimização do código e na eficiência dos algoritmos de simulação poderiam ajudar a minimizar esses problemas e garantir uma resposta rápida e confiável em todas as situações.

A pesquisa quantitativa apresentou avaliações consistentes de *Muito Bom*, com outras de *Excelente* e *Satisfatório*, apresentadas na figura 21.

Figura 21 - Pesquisa Quantitativa sobre Feedback em Tempo Real do FlexSim.

Qual o nível de Feedback em Tempo Real do FlexSim?  
7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.12 Reutilização

O FlexSim oferece uma ampla variedade de bibliotecas de objetos e templates que podem ser reutilizados em diferentes projetos. Essas bibliotecas incluem uma vasta gama de componentes comumente utilizados em simulações, como equipamentos industriais, veículos, trabalhadores e móveis de escritório (FlexSim, 2024). Além disso, os usuários podem criar seus próprios templates personalizados, capturando configurações específicas, comportamentos e interações entre os componentes para reutilização em projetos futuros.

Conforme apresentado, são fornecidos modelos padrão e exemplos práticos que podem ser utilizados como ponto de partida para novos projetos, abrangendo uma variedade de setores e aplicações. Ao utilizar esses modelos como base, os usuários podem economizar tempo e esforço na criação de simulações do zero, adaptando os modelos existentes para atender às suas necessidades específicas.

O FlexSim permite que os usuários salvem e restaurem configurações e preferências

personalizadas, garantindo consistência e eficiência em múltiplos projetos (FlexSim, 2024). Isso inclui configurações de interface, como layouts de janelas, cores e atalhos de teclado, bem como preferências de simulação, como taxas de atualização, configurações de gráficos e opções de relatório. Ao reutilizar essas configurações personalizadas, pode-se manter um ambiente de trabalho adaptado às suas preferências individuais. Além disso, o software permite a reutilização de scripts e programações anteriores para automatizar tarefas repetitivas ou implementar comportamentos complexos em seus modelos.

A ferramenta permite a integração de recursos multimídia, como áudios e animações, para enriquecer a experiência de simulação e comunicar informações de forma mais eficaz (FlexSim, 2024). Os usuários podem reutilizar áudios para simular sons de máquinas, alertas ou comunicações entre trabalhadores. Da mesma forma, animações podem ser utilizadas para visualizar processos complexos, fluxos de trabalho ou cenários específicos. Ao reutilizar esses recursos multimídia, os usuários podem criar simulações mais envolventes e realistas.

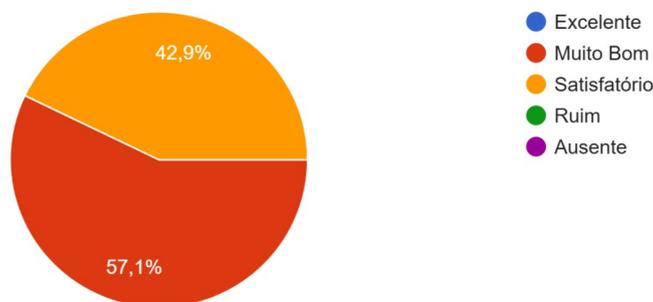
Embora o FlexSim ofereça a organização e a categorização das bibliotecas de objetos e templates podem ser melhoradas para facilitar a localização e o acesso aos recursos desejados. Além disso, a criação de uma plataforma online onde os usuários possam compartilhar e baixar modelos, scripts e outros recursos reutilizáveis poderia ampliar ainda mais as possibilidades de reutilização e colaboração entre a comunidade de usuários.

A partir da pesquisa quantitativa, os resultados se apresentaram predominantemente como *Muito Bom*, com as demais avaliações de *Satisfatório*, conforme apontado na figura 22.

Figura 22 - Pesquisa Quantitativa sobre Reutilização do FlexSim.

Qual o nível de Reutilização do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.13 Compartilhamento e Colaboração

O FlexSim oferece recursos para colaboração em tempo real, permitindo que múltiplos usuários trabalhem simultaneamente em uma simulação. Através da introdução do suporte para o formato OpenUSD e um conector para NVIDIA Omniverse, os usuários podem visualizar as mudanças feitas por outros membros da equipe em tempo real, facilitando a comunicação e a tomada de decisões colaborativas (Cueva, 2023).

Apesar disso, o software não permite que os administradores controlem o acesso aos projetos e atribuam permissões específicas a cada usuário. No entanto, ele oferece uma ferramenta chamada "User Commands" que permite adicionar, excluir e editar comandos personalizados em seu modelo (FlexSim, 2024). O controle de acesso é crucial para proteger a integridade dos dados e garantir que cada membro da equipe tenha as permissões adequadas

para realizar suas tarefas.

De forma geral, para auxílio na utilização da ferramenta, o FlexSim oferece suporte técnico e de modelagem que pode ajudar com questões específicas de construção de modelos, licenciamento e instalação (FlexSim, 2024). Isso inclui suporte por e-mail, telefone e baseado na web, onde você pode interagir diretamente com um engenheiro de suporte.

Além disso, é oferecida uma base de conhecimento de perguntas e respostas, FlexSim Answers, que cresceu em um vasto banco de dados pesquisável de conhecimento de simulação que beneficia e auxilia na solução de dúvidas dos usuários frente a problemas, apresentando recursos para compartilhar modelos e capturas de tela para suporte mais rápido.

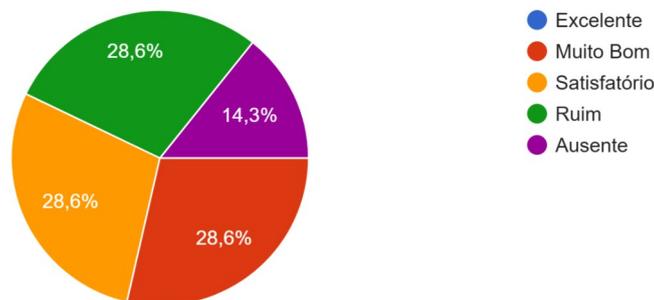
Apesar dos pontos fortes do FlexSim em termos de compartilhamento e colaboração, existem áreas que poderiam ser melhoradas. Por exemplo, a integração com ferramentas de comunicação e colaboração dentro do próprio software, como chats integrados, videoconferência ou comentários em tempo real, poderia facilitar ainda mais a comunicação entre os membros da equipe durante o processo de colaboração.

A pesquisa quantitativa, apresentada na figura 23, demonstrou que as respostas variaram bastante, com avaliações de *Ausente a Muito Bom*, apontando para uma área de potencial melhoria no FlexSim.

Figura 23 - Pesquisa Quantitativa sobre Compartilhamento e Colaboração do FlexSim.

Qual o nível de Compartilhamento e Colaboração do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

#### 4.1.14 Programação Visual

O FlexSim oferece um ambiente de programação visual integrado que permite aos usuários criar comportamentos e reações para os componentes do modelo por meio do fluxo de dados. Isso é realizado por meio de uma interface gráfica intuitiva, onde os usuários podem arrastar e soltar blocos de construção pré-definidos e conectá-los para definir a lógica do sistema. Essa abordagem simplificada torna a programação mais acessível para uma variedade de usuários, independentemente do nível de habilidade em programação convencional.

É fornecida uma ampla biblioteca de blocos de construção pré-definidos que cobrem uma variedade de funções e comportamentos comumente utilizados em simulações (FlexSim, 2024). Esses blocos de construção incluem operadores lógicos, operações matemáticas, controle de fluxo e interação com o ambiente de simulação. Além disso, o software utiliza um modelo de fluxo de dados e conexões visuais para representar a lógica do sistema de forma clara e intuitiva. Os usuários podem visualizar facilmente como os dados fluem através dos diferentes blocos de construção e como as conexões entre eles afetam o comportamento do

modelo.

Para o desenvolvimento do programa, existem recursos avançados de depuração visual e análise de dados que permitem aos usuários monitorar o fluxo de dados e analisar o comportamento do modelo durante a execução da simulação (FlexSim, 2024). Isso inclui a capacidade de visualizar o valor de cada variável em tempo real, monitorar o estado dos blocos de construção e identificar quaisquer gargalos ou pontos problemáticos na lógica da simulação. Essa abordagem de depuração visual facilita a identificação e correção de erros, garantindo a precisão e confiabilidade do modelo.

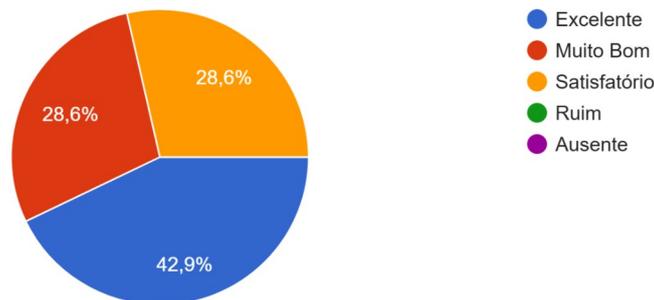
Embora o FlexSim ofereça uma sólida capacidade de programação visual, ainda existem áreas que poderiam ser aprimoradas. Por exemplo, a expansão da biblioteca de blocos de construção pré-definidos poderia aumentar a flexibilidade e a aplicabilidade da programação visual em uma variedade de cenários de simulação. Além disso, a melhoria na documentação e tutoriais relacionados à programação visual poderia ajudar os usuários na criação de simulações complexas de forma intuitiva e eficaz.

De acordo com a pesquisa quantitativa, mostrada na figura 24, foram apresentadas avaliações de *Excelente*, *Muito Bom* e *Satisfatório*.

Figura 24 - Pesquisa Quantitativa sobre Programação Visual do FlexSim.

Qual o nível de Programação Visual do FlexSim?

7 respostas



Fonte: Autor (2024)

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O FlexSim foi classificado de acordo com uma pesquisa conduzida que envolveu sete participantes, cujo objetivo foi avaliar o software FlexSim através de diretrizes de design específicas. Os resultados obtidos refletem uma diversidade de percepções sobre a usabilidade e as funcionalidades do software. Alguns aspectos positivos foram identificados, como a capacidade de adaptação e a customização, que permitem aos usuários ajustar o software conforme suas necessidades específicas. No entanto, foram também evidenciadas limitações significativas, especialmente na documentação e nos tutoriais, que são essenciais para facilitar a curva de aprendizado de novos usuários.

A figura 25 apresenta um agregado dos resultados obtidos:

Figura 25: Agregado dos Resultados da Pesquisa Quantitativa

Adaptação e Comunalidade	Democratização	Otimização e Balanço de Diversidade	Feedback Imersivo	Compartilhamento e Colaboração
Excelente: 14,3 % Muito bom: 57,1 % Satisfatório: 28,6 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 14,3 % Muito bom: 42,9 % Satisfatório: 28,6 % Ruim: 14,3 % Ausente: 0 %	Excelente: 28,6 % Muito bom: 28,6 % Satisfatório: 42,9 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 28,6 % Muito bom: 42,9 % Satisfatório: 28,6 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 0 % Muito bom: 28,6 % Satisfatório: 28,6 % Ruim: 28,6 % Ausente: 14,3 %
Automação	Metaforização	Documentação e Tutoriais	Feedback em Tempo Real	Programação Visual
Excelente: 28,6 % Muito bom: 57,1 % Satisfatório: 14,3 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 0 % Muito bom: 85,7 % Satisfatório: 0 % Ruim: 14,3 % Ausente: 0 %	Excelente: 14,3 % Muito bom: 14,3 % Satisfatório: 42,9 % Ruim: 28,9 % Ausente: 0 %	Excelente: 14,3 % Muito bom: 71,4 % Satisfatório: 14,3 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 42,9 % Muito bom: 28,6 % Satisfatório: 28,6 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %
Customização	Liberdade de Movimento	Criação Imersiva	Reutilização	
Excelente: 14,3 % Muito bom: 71,4 % Satisfatório: 14,3 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 28,6 % Muito bom: 57,1 % Satisfatório: 14,3 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	Excelente: 0 % Muito bom: 71,4 % Satisfatório: 0 % Ruim: 14,3 % Ausente: 14,3 %	Excelente: 0 % Muito bom: 57,1 % Satisfatório: 42,9 % Ruim: 0 % Ausente: 0 %	

Fonte: Autor (2024)

A análise dos dados revelou uma variação nos níveis de satisfação entre os participantes, destacando tanto pontos fortes quanto áreas que necessitam de melhorias. Aspectos como a liberdade de movimento, a criação imersiva e o feedback em tempo real receberam avaliações mistas, sugerindo que, embora o FlexSim ofereça funcionalidades avançadas, sua aplicação prática ainda enfrenta desafios. A inclusão de exemplos práticos e a melhoria no suporte ao usuário foram identificadas como necessidades cruciais para aumentar a eficiência e a adoção do software em contextos industriais.

Embora os resultados forneçam uma visão inicial sobre a usabilidade do FlexSim, a base de dados limitada impede conclusões definitivas sobre a eficácia geral do software, assim como para a sugestão de melhorias. Para validar de forma mais consistente as capacidades e limitações do FlexSim, é necessário um número maior de participantes e uma base de dados mais robusta.

## 5 CONSIDERAÇÃO FINAL

O presente estudo teve como objetivo avaliar a usabilidade do software FlexSim, utilizando diretrizes de design específicas e métodos quantitativos para analisar a experiência dos usuários. Através de uma revisão sistemática da literatura e a aplicação de um questionário detalhado, foi possível identificar uma visão acerca do desenvolvimento do FlexSim em diferentes áreas para sua utilização em simulações 3D.

As contribuições teóricas deste trabalho incluem a aplicação de diretrizes de design para avaliação de ferramentas de realidade virtual, proporcionando uma estrutura que poderá ser utilizada em pesquisas futuras. Além disso, a pesquisa busca reforçar a importância da usabilidade como critério essencial para a adoção de novas tecnologias em ambientes industriais.

A avaliação contou com a utilização de diretrizes de design apresentadas na dissertação *Design guidelines for intuitive virtual reality authoring tool*, que aborda o desenvolvimento de ferramentas de autoria de RV para que sejam intuitivas e acessíveis para profissionais sem habilidades avançadas em programação e modelagem 3D (Chamusca, 2023).

De forma geral, os resultados mostraram diferentes características avaliadas pelos usuários do FlexSim,. A Metaforização apresentou o resultado mais unânime de todos, com

87,5% dos votos como sendo *Muito bom*. O compartilhamento e colaboração indicou uma maior distribuição das classificações, indicando opiniões diferentes em cima dessa diretriz.

Os resultados mostraram que o FlexSim apresenta uma interface robusta e flexível, capaz de integrar diferentes fontes de dados e sistemas, facilitando a criação e a análise de modelos complexos. No entanto, foram identificadas algumas limitações, como a necessidade de aprimoramento na documentação e suporte ao usuário, especialmente em relação a aplicações específicas e avanços no scripting para tornar a ferramenta ainda mais acessível.

A pesquisa quantitativa revelou uma boa aceitação do software entre os participantes, que reconheceram a utilidade e a eficiência do FlexSim em seus processos de simulação. A avaliação das diretrizes de design confirmou que o software atende em grande parte aos requisitos de usabilidade, embora haja espaço para melhorias contínuas.

É importante notar que o número de participantes da pesquisa, sendo apenas sete, não é suficiente para obter resultados concretos e generalizáveis sobre a usabilidade e a eficácia do FlexSim. A amostra limitada impede uma análise abrangente e robusta, o que significa que as conclusões devem ser interpretadas com cautela. Para obter resultados mais precisos e confiáveis, seria necessário realizar estudos com um número maior de participantes, abrangendo uma gama mais ampla de cenários e aplicações.

Conclui-se, portanto, que o FlexSim é uma ferramenta de autoria utilizada para a simulação de processos industriais, proporcionando um ambiente de modelagem eficiente e intuitivo. A adoção de uma evolução constante do desenvolvimento do software pode contribuir significativamente para a inovação e eficiência na indústria. Além disso, a aplicação de diretrizes de design intuitivas é fundamental para garantir que as ferramentas de simulação atendam às necessidades dos usuários e promovam avanços significativos na gestão de ferramentas de autoria que utilizam realidade virtual.

Por fim, este estudo abre várias possibilidades de pesquisa futura. Estudos longitudinais seriam benéficos para acompanhar a implementação das melhorias sugeridas e avaliar seu impacto na usabilidade e adoção do FlexSim. Futuras pesquisas podem ampliar a amostra e refinar as diretrizes de avaliação, permitindo uma análise mais detalhada e conclusiva sobre a utilidade do FlexSim em ambientes industriais. Para mais, também podem explorar a aplicação das diretrizes de design em outras ferramentas de simulação e modelagem, comparando seus resultados com os deste estudo. A integração do FlexSim com tecnologias emergentes, como inteligência artificial e internet das coisas, pode expandir suas capacidades e aplicações, adaptando suas funcionalidades para diferentes setores industriais.

## REFERÊNCIAS

ABRAMOVICI, M.; GÖBEL, J. C.; SAVARINO, P. Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins. **CIRP Annals**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 165–168, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.042>. Acesso em: 16 jun. 2024.

ALAM, K. M.; EL SADDIK, A. C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems. **IEEE Access**, [s. l.], v. 5, p. 2050–2062, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2017.2657006>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BANERJEE, A. *et al.* Generating Digital Twin models using Knowledge Graphs for Industrial Production Lines. **mdsoar.org**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3091478.3162383>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BATTY, M. Digital twins. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 817–820, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1177/2399808318796416>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BAZILEVS, Y. *et al.* Isogeometric Fatigue Damage Prediction in Large-Scale Composite Structures Driven by Dynamic Sensor Data. **Journal of Applied Mechanics**, [s. l.], v. 82, n. 9, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.4030795>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BELLO, L. H. A. **Modelagem em experimentos mistura-processo para otimização de processos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BIELEFELDT, B. R.; HOCHHALTER, J. D.; HARTL, D. J. Shape memory alloy sensory particles for damage detection: Experiments, analysis, and design studies. **Structural Health Monitoring**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 777–814, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1475921717721194>. Acesso em: 16 jun. 2024.

BOSCHERT, S.; ROSEN, R. Digital Twin—The Simulation Aspect. **Mechatronic Futures**, [s. l.], p. 59–74, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5). Acesso em: 16 jun. 2024.

BRUYNSEELS, K.; SANTONI DE SIO, F.; VAN DEN HOVEN, J. Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering Paradigm. **Frontiers in Genetics**, [s. l.], v. 9, p. 31, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>. Acesso em: 16 jun. 2024.

CARVALHO, M. Z. **Otimização de Processos Industriais Utilizando Padrões de Comportamento e Algoritmos Genéticos**. Tese (Mestrado em Engenharia da Informação), Universidade Federal do ABC, Santo André, 2012.

CHAMUSCA, I. L. **Design guidelines for intuitive virtual reality authoring tools**. SENAI CIMATEC, [s. l.], 2023. Disponível em: <http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/1833>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total no Estilo Japonês**. In: Biblioteca da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1992. p. 1-347.

CONCEIÇÃO, S. A. H., OLIVEIRA, F. A., JUNIOR, A. G. B. **O Fenômeno “Metaverso” e suas Implicações sobre a Educação: Uma Revisão Sistemática da Literatura e Análise Documental**. In: Scielo Preprints, 2023.

CUEVA, M. **FlexSim Introduces OpenUSD + NVIDIA Omniverse Support**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.flexsim.com/pt/geral/flexsim-introduces-usd-nvidia-omniverse-support/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

CUEVA, M. **Modelagem em Simulação agora totalmente imerso em realidade virtual com o Oculus Rift**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.flexsim.com/pt/geral/simulation-modeling-meets-virtual-reality-oculus-rift/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

CUNNINGHAM, T. C. **Marching toward the metaverse: strategic communication through the new media**. Leavenworth, United States of America: Army Command and General Staff Coll Fort Leavenworth KS School of Advanced Military Studies, 2010.

DEMKOVICH, N. A.; YABLOCHNIKOV, E. I.; ABAEV, G. E. Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems. **IEEE Ind. Cyber-Physical Syst.**, [s. l.],

2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icphys.2018.8387674>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- DIGITAL TWIN. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.flexsim.com/pt/digital-twin/>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- DIGITAL TWIN – AVEVA. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.aveva.com/en/solutions/digital-transformation/digital-twin/>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- DING, H. *et al.* Implementation of Digital Twin in Actual Production: Intelligent Assembly Paradigm for Large-Scale Industrial Equipment. **Machines**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1031–1031, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines11111031>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; VALLE, A. **Design Science Research**. [S. l.]: Bookman Editora, 2020.
- ELSEVIER. **Scopus**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/home.uri>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- ECHEVESTE, M. E. S. **Planejamento da Otimização Experimental de Processos Industriais**. 1997. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- ERRANDONEA, I.; BELTRÁN, S.; ARRIZABALAGA, S. Digital Twin for maintenance: A literature review. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 123, n. 0166-3615, p. 103316, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- EYRING, A. *et al.* Analysis of a closed-loop digital twin using discrete event simulation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 123, n. 1-2, p. 245–258, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10176-5>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- GABOR, T. *et al.* **A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICAC.2016.29>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- GELENBE, E.; GUENNOUNI, H. FLEXSIM: A flexible manufacturing system simulator. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 149–165, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90131-e](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90131-e). Acesso em: 16 jun. 2024.
- GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. **The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems**, [s. l.], p. 85–113, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- HAAG, S.; ANDERL, R. Digital twin – Proof of concept. **Manufacturing Letters**, [s. l.], v. 15, n. 2213-8463, p. 64–66, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>. Acesso em: 16 jun. 2024.
- HEHENBERGER, P.; BRADLEY, D. **Mechatronic Futures Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers**. [S. l.]: Cham Springer International Publishing, 2016.

HILLYER, M. Fórum Econômico Mundial- WEF. **How has technology changed- and changed us- in the past 20 years?** 2020. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2020/11/heres-how-technology-has-changed-and-changed-us-over-the-past-20-years/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

IBÁÑEZ, M.-B.; DELGADO-KLOOS, C. Augmented reality for STEM learning: A systematic review. **Computers & Education**, [s. l.], v. 123, p. 109–123, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>. Acesso em: 16 jun. 2024.

J. RÍOS *et al.* Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft. **ISPE CE**, [s. l.], p. 657–666, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>. Acesso em: 16 jun. 2024.

JOAN SOL ROO *et al.* Understanding Users' Capability to Transfer Information between Mixed and Virtual Reality. **HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)**, [s. l.], v. 363, n. 978-145035621-3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173937>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LEE, J. *et al.* Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. **Manufacturing Letters**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 38–41, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LIAO, T.; SHE, J. HOW DOES VIRTUAL REALITY (VR) FACILITATE DESIGN? A REVIEW OF VR USAGE IN EARLY-STAGE ENGINEERING DESIGN. **Proceedings of the Design Society**, [s. l.], v. 3, n. 2732527X, p. 2115–2124, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/pds.2023.212>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LIU, Y. *et al.* A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model. **Advanced engineering informatics**, [s. l.], v. 62, n. 14740346, p. 102592–102592, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102592>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LIU, Z.; MEYENDORF, N.; MRAD, N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5031520>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LUŚCIŃSKI, S.; IVANOV, V. A simulation study of Industry 4.0 factories based on the ontology on flexibility with using FlexSim® software. **Management and Production Engineering Review**, [s. l.], v. Vol. 11, No. 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/mper.2020.134934>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MAJUMDAR, P. K.; FAISALHAIDER, M.; REIFSNIDER, K. Multi-physics Response of Structural Composites and Framework for Modeling Using Material Geometry. **54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference**, [s. l.], 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2013-1577>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MEDAN, N. Modelling and Simulating a Technological Flow Using the FlexSim Application. **Scientific Bulletin Serie C**, [s. l.], v. 2021, n. 1224-3264, 2021. Disponível em: [https://nordtech.ubm.ro/issues/2021/BSSC\\_v2021\\_issXXXV\\_62to66\(1\).pdf](https://nordtech.ubm.ro/issues/2021/BSSC_v2021_issXXXV_62to66(1).pdf). Acesso em: 16 jun. 2024.

MENG, Z. *et al.* Task-Oriented Metaverse Design in the 6G Era. **IEEE wireless**

**communications**, [s. l.], p. 1–7, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/mwc.019.2200605>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MILGRAM, P. *et al.* Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. **Telemanipulator and Telepresence Technologies**, [s. l.], v. 2351, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.197321>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MYSTAKIDIS, S. Metaverse. **Encyclopedia**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 486–497, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NARİNN. G. A Content Analysis of the Metaverse Articles. **Journal of Metaverse**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 17–24, 2021. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jmv/issue/67581/1051382>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NETTO, A. V. *et al.* **Realidade Virtual e suas Aplicações na Área de Manufatura, Treinamento, Simulação e Desenvolvimento de Produto**. [S. l.: s. n.], 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/Brbwf88KLGqyn977t97JNtf/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NING, H. *et al.* A Survey on the Metaverse: The State-of-the-Art, Technologies, Applications, and Challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, [s. l.], v. 10, n. 16, p. 1–1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3278329>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NORDGREN, W. B. FlexSim simulation environment. **IEEE Xplore**, [s. l.], v. 1, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/wsc.2003.1261424>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NUNES, M. *et al.* VR Virtual Prototyping Application for Airplane Cockpit: A Human-centred Design Validation. **SciTePress**, [s. l.], n. 2184-4321, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5220/0011658800003417>. Acesso em: 16 jun. 2024.

PADA, G. **AVEVA - Global Leader in Industrial Software**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://engage.aveva.com/rs/986-YIS-805/images/Whitepaper%20Engineering%20better%20relationships%20and%20more%20sustainable%20capital%20projects.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

PAGE, M. J. *et al.* The prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BioMed Central**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2021.

PAUL, R. **A Translator for Converting JT Models to Second Life**. [S. l.], 2009. Disponível em: [https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb\\_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10\\_accession\\_num=ucin1236966950](https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd/etd/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ucin1236966950). Acesso em: 16 jun. 2024.

PELLAS, N.; MYSTAKIDIS, S.; CHRISTOPOULOS, A. A Systematic Literature Review on the User Experience Design for Game-Based Interventions via 3D Virtual Worlds in K-12 Education. **Multimodal Technologies and Interaction**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 28, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mti5060028>. Acesso em: 16 jun. 2024.

POH, E.; LIONG, K.; JEANNIE. Mixed Reality for Mechanical Design and Assembly Planning. **Communications in computer and information science**, [s. l.], v. 1654, n. 978-3-031-19679-9, p. 572–579, 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-19679-9\\_72](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19679-9_72). Acesso em: 16 jun. 2024.

ROSEN, R. *et al.* About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 567–572, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. **IEEE International Symposium on Systems Engineering**, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/syseng.2016.7753162>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SHNEIDERMAN, Ben, 2006. **O Laptop de Leonardo**. Nova Fronteira, São Paulo

SCHROEDER, G. N. *et al.* Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 49, n. 30, p. 12–17, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.115>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SIMULAÇÃO EM MANUFATURA. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.flexsim.com/pt/simula%C3%A7%C3%A3o-de-fabrica%C3%A7%C3%A3o/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SINGH, M. *et al.* Digital Twin: Origin to Future. **Applied System Innovation**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 36, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/asi4020036>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SLATER, M. *et al.* The Ethics of Realism in Virtual and Augmented Reality. **Frontiers in Virtual Reality**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.00001>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SOUTO, E. J. F. **Otimização de Processos Industriais com Emprego de Ferramentas da Qualidade**: Estudo de Caso no Processo de Montagem de uma Montadora de Motocicletas do Polo Industrial de Manaus. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.

SPEICHER, M.; HALL, B. D.; NEBELING, M. What is Mixed Reality? **Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**, [s. l.], p. 1–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>. Acesso em: 16 jun. 2024.

STARK, R. **Virtual Product Creation in Industry**. [S. l.]: Springer Nature, 2022.

STEPHENSON, N. **Snow Crash**. United States of America: Bantam Books, 1992.

STINGHEN, A. O. **Estratégias de Otimização de Processos**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

TALKHESTANI, B. A. *et al.* Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 72, p. 159–164, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.166>. Acesso em: 16 jun. 2024.

TERRACE, J. **Content Conditioning and Distribution for Dynamic Virtual Worlds**. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.cs.princeton.edu/techreports/2012/941.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

TOIVONEN, V. *et al.* The FMS Training Center - a versatile learning environment for engineering education. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 23, n. 23519789, p. 135–140, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.006>. Acesso em: 16 jun. 2024.

TUEGEL, E. The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization. **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference****20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference****14th AIAA**, [s. l.], 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1812>. Acesso em: 16 jun. 2024.

VACHÁLEK, J. *et al.* **The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PC.2017.7976223>. Acesso em: 16 jun. 2024.

VANDERHORN, E.; MAHADEVAN, S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. **Decision Support Systems**, [s. l.], v. 145, n. 0167-9236, p. 113524, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WEI, X.; JIN, X.; FAN, M. Communication in Immersive Social Virtual Reality: A Systematic Review of 10 Years' Studies. **ACM International Conference Proceeding Series**, [s. l.], n. 978-145039869-5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3565698.3565767>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WOLFARTSBERGER, J. Analyzing the potential of Virtual Reality for engineering design review. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 104, n. 09265805, p. 27–37, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.018>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WANG X. *et al.* Real-time process-level digital twin for collaborative human-robot constructionwork. *In: 37TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION*, 2020, Japão. **From Demonstration to Practical Use - To New Stage of Construction Robot**. Japão: Elsevier, 2020. p. 1528–1535.

YIGITBAS, E.; KLAUKE, J.; GOTTSCHALK, S.; ENGELS, G. **Vreud-an end-user development tool to simplify the creation of interactive vr scenes**. *In: IEEE. 2021 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC)*. [S.l.], 2021. p. 1–10.

ZHANG, J.; ZONG, M.; LI, W. A Truthful Mechanism for Multibase Station Resource Allocation in Metaverse Digital Twin Framework. **Processes**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 2601, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10122601>. Acesso em: 16 jun. 2024.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 1141–1153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>. Acesso em: 16 jun. 2024.

ZHU, X. *et al.* A Flexsim-based Optimization for the Operation Process of Cold-Chain Logistics Distribution Centre. **Journal of Applied Research and Technology**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 270–278, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s1665-6423\(14\)72343-0](https://doi.org/10.1016/s1665-6423(14)72343-0). Acesso em: 16 jun. 2024.

ZWOLIŃSKI, G. *et al.* Vibrating Tilt Platform Enhancing Immersive Experience in VR. **Electronics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 462, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics11030462>. Acesso em: 16 jun. 2024.

## ANEXOS

URL para acesso à pesquisa quantitativa: <https://forms.gle/5J8a7RKzampLGjp6>