

REVISÃO SISTEMÁTICA DO USO DA NORMA ISO 9241 PARA AVALIAÇÃO DE USABILIDADE EM AMBIENTES VIRTUAIS 3D

Fernando Uchôa do Rêgo Barros Filho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)

Av. Prof. Luciano Gualberto, 380, São Paulo, Brasil

fernandouchoa@usp.br

Abstract:

In the Industry 4.0 landscape, the integration of Virtual Reality (VR) and Augmented Reality (AR) is reshaping industrial processes. Three-dimensional (3D) virtual environments play a pivotal role in revolutionizing conception, simulation, and collaboration. Usability is critical for success, with ISO 9241 providing guidelines for interactive system evaluation.

Effectiveness, efficiency, and satisfaction are key usability factors. Effectiveness involves users achieving goals accurately and completely, efficiency addresses resource consumption, and satisfaction gauges the overall user experience. This article proposes a Systematic Review (SR) of Usability Evaluation Methods in 3D Virtual Environments, specifically focusing on ISO 9241. The review aims to analyze how ISO 9241 guidelines are applied, identifying gaps and opportunities for enhancing effectiveness and efficiency in 3D environments while ensuring a satisfactory user experience.

Keywords: Usability Evaluation - 3D Virtual Environments - ISO 9241

I. Introdução

No cenário atual da Indústria 4.0, testemunhamos uma crescente integração de tecnologias imersivas como Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) nos processos de produção e design industrial. Este influxo de ambientes virtuais tridimensionais (3D) destaca-se como uma peça fundamental na revolução industrial em curso, conferindo novas perspectivas à concepção, simulação e colaboração. A relevância do 3D na indústria torna-se evidente não apenas como uma ferramenta de visualização, mas como um meio integral para a tomada de decisões e a execução eficiente de tarefas complexas.

Nesse contexto, a usabilidade emerge como um fator crítico para o sucesso desses ambientes 3D. A capacidade de interação intuitiva e eficaz dos usuários com as interfaces

virtuais torna-se determinante para otimizar a eficácia, a eficiência e a satisfação no uso dessas tecnologias. É neste ponto que a **Norma ISO 9241** assume um papel central, fornecendo diretrizes fundamentais para a avaliação da usabilidade em sistemas interativos.

Para compreendermos a eficácia, eficiência e satisfação no contexto da usabilidade, é crucial definir esses termos. Neste estudo, a **eficácia** refere-se à precisão e completude com que os usuários alcançam seus objetivos no sistema, a **eficiência** aborda o consumo de recursos, como tempo e esforço, necessários para realizar tarefas específicas, enquanto a **satisfação** avalia a experiência global do usuário e seu contentamento com o sistema.

Diante dessa interseção complexa entre tecnologia, usabilidade e normativas, este artigo propõe conduzir uma **Revisão Sistemática (RS) dos Métodos de Avaliação de Usabilidade em Ambientes Virtuais 3D**, com foco na aplicação da **Norma ISO 9241**. Esta revisão buscará analisar criticamente como as diretrizes da ISO 9241 são empregadas na avaliação de usabilidade em ambientes 3D, identificando lacunas e oportunidades para aprimorar a eficácia e eficiência desses ambientes, ao mesmo tempo em que promove uma experiência de usuário mais satisfatória.

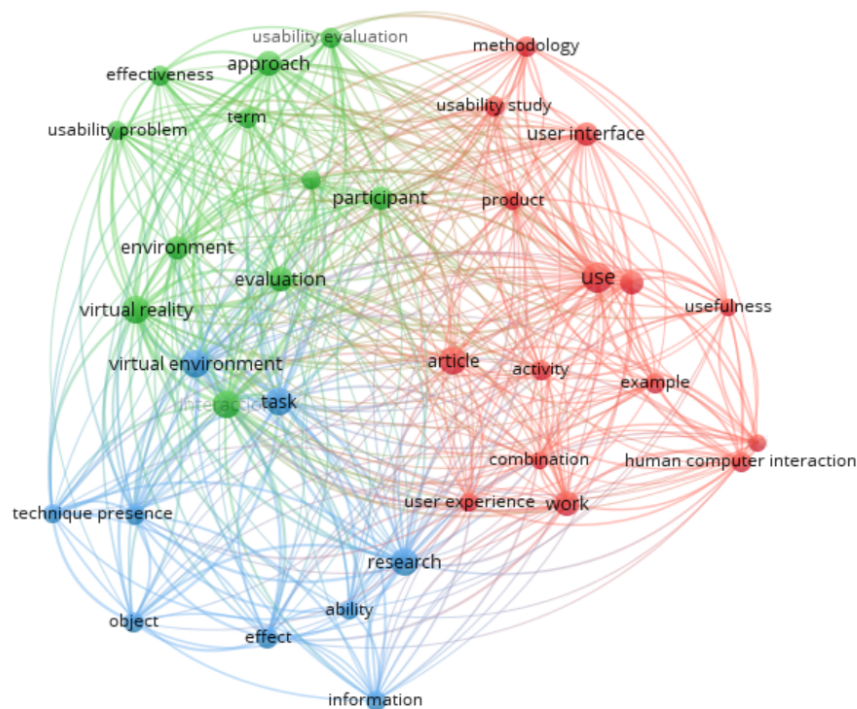


Figura 1 - Rede de relações entre trabalhos

II. Conceitos Teóricos

A. Ambientes Virtuais 3D

A Realidade Virtual (RV) e a Realidade Aumentada (RA) são conceitos que descrevem experiências imersivas em ambientes digitais, cada uma com suas características distintas.

A RV refere-se a um ambiente simulado digitalmente que proporciona aos usuários uma experiência sensorial e interativa, frequentemente utilizando dispositivos como óculos de realidade virtual, luvas ou sensores de movimento. Na RV, os usuários são totalmente imersos em um ambiente virtual, muitas vezes tridimensional, que pode ser fictício ou uma representação simulada da realidade. A interação é geralmente controlada por meio de dispositivos de entrada, como controles de movimento ou teclados. A RV busca criar uma sensação de presença, transportando os usuários para um espaço digital convincente Sherman e Craig (2003).

Diferentemente da RV, a RA combina elementos do ambiente digital com o ambiente real, sobrepondo informações virtuais à visão do mundo físico. Isso é frequentemente alcançado por meio de dispositivos como smartphones, tablets ou óculos inteligentes, que usam câmeras e sensores para capturar o ambiente real e incorporar elementos virtuais em tempo real. A RA tem aplicações variadas, desde fornecer informações contextuais sobre objetos do mundo real até criar experiências interativas que mesclam digital e físico. Milgram e Kishino (1994) introduziram o conceito de "Realidade Misturada", situando a RA como parte de um espectro que varia da realidade totalmente virtual à realidade totalmente real.

B. Norma ISO 9241

A Norma ISO 9241-11, intitulada "Ergonomia de interfaces homem-sistema - Parte 11: Orientações sobre usabilidade", é uma norma internacional desenvolvida pela International Organization for Standardization (ISO). Essa norma faz parte da série de normas ISO 9241, que aborda os aspectos ergonômicos da interação entre humanos e sistemas.

A ISO 9241-11 fornece diretrizes e recomendações sobre usabilidade, focando na forma como os sistemas interativos devem ser projetados para atender às necessidades e expectativas dos usuários. O objetivo principal da norma é garantir que os produtos, especialmente interfaces de usuário, sejam fáceis de usar e eficazes, resultando em uma experiência de usuário positiva.

Portanto, o resultado de um produto em ambiente virtual 3D desenvolvido deve se ancorar na Norma ISO 9241/11 que propõe que, para se realizar uma avaliação de usabilidade, precisamos identificar os objetivos e, a partir deles, extrair eficácia, eficiência e satisfação através de atributos mensuráveis. Portanto, é através dessa análise de usabilidade que vamos avaliar se cada sistema de RV e RA desenvolvido corresponde ao objetivo determinado focado no usuário.

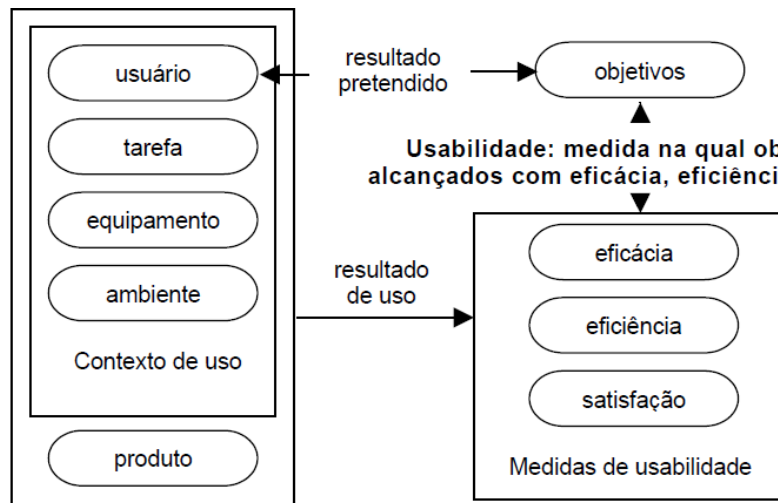


Figura 2 - Estrutura de Usabilidade - Norma ISO 9241/11

Além disso, a norma ISO 9241-210 tem como objetivo fornecer diretrizes e recomendações para o processo de projeto e desenvolvimento de sistemas interativos. Ela enfatiza a importância de adotar uma abordagem sistemática e centrada no usuário para garantir a qualidade da interação entre os usuários e os sistemas.

Sendo assim, para que seja alcançado o objetivo de entregar um produto centrado no usuário, através da avaliação que a parte 11 da norma propõe, é recomendado seguir as diretrizes das normas inclusive em ambientes virtuais 3D:

1. **Compreensão do contexto de uso:** A norma destaca a importância de compreender o contexto em que o sistema será utilizado. Isso envolve a identificação dos usuários-alvo, suas necessidades, tarefas e ambiente de trabalho. Para tal, são utilizadas pesquisas e entrevistas com usuários para entendimento. Essa compreensão é crucial para projetar um sistema que seja adequado ao seu contexto de uso específico.

2. **Definição de requisitos de usabilidade:** A norma enfatiza a necessidade de estabelecer requisitos claros de usabilidade para o sistema. Isso envolve identificar os critérios de desempenho desejados, como eficiência, eficácia, facilidade de aprendizado e satisfação do usuário. A definição adequada desses requisitos é essencial para orientar o processo de design e avaliação do sistema.

3. **Iteração e prototipação:** A norma recomenda a utilização de iterações e prototipação durante o processo de design. Isso permite que os designers obtenham *feedback* dos usuários em estágios iniciais do desenvolvimento e façam ajustes iterativos com base nesse *feedback*. A prototipação também ajuda a validar as soluções propostas antes da implementação final do sistema.

4. **Avaliação da usabilidade:** A norma destaca a importância da avaliação contínua da usabilidade durante o processo de desenvolvimento. Isso envolve a realização de testes de usabilidade, avaliações especializadas e outras técnicas de avaliação para identificar problemas de usabilidade e oportunidades de melhoria. A avaliação da usabilidade ao longo do processo permite que os problemas sejam corrigidos de forma mais eficaz e econômica.

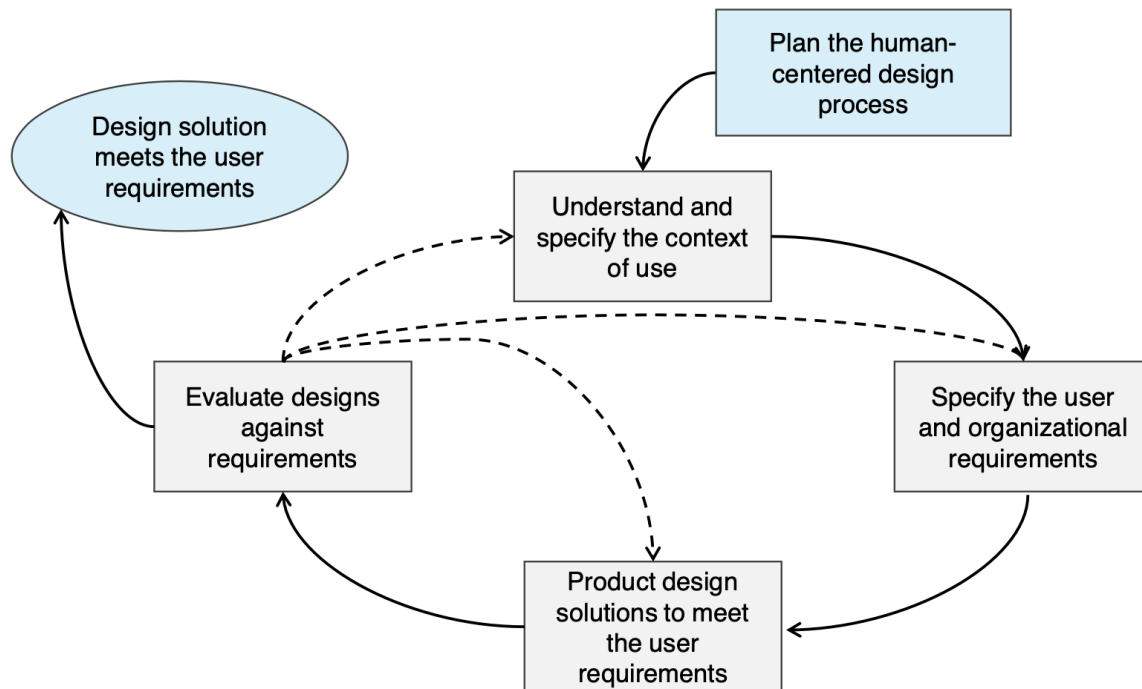


Figura 3 - Design centrado no usuário - Norma ISO 9241/210

III. Revisão Sistemática de Literatura

Ao viabilizar uma síntese clara e explícita de todos os estudos relacionados a uma intervenção específica, uma Revisão Sistemática (RS) emerge como uma ferramenta poderosa, capaz de ampliar significativamente o espectro de resultados relevantes. Em contrapartida à abordagem restrita de conclusões baseadas na leitura de apenas alguns artigos, a RS permite uma compreensão abrangente e aprofundada do estado atual do conhecimento.

A condução desta revisão seguiu um processo em três fases distintas. Inicialmente, a fase de planejamento demandou uma análise exploratória, culminando na elaboração de um protocolo para orientar a execução da RS. Essa etapa inicial não apenas proporcionou uma estrutura sólida, mas também delineou os critérios para a inclusão e exclusão dos estudos, garantindo a seleção de trabalhos alinhados aos objetivos específicos da revisão.

A segunda fase, de condução, representou o cerne do processo, onde os estudos pertinentes foram identificados e criteriosamente selecionados conforme os parâmetros estabelecidos no protocolo. Essa etapa crucial assegurou a integridade e a representatividade da amostra, fundamentais para a confiabilidade dos resultados obtidos ao final da revisão.

Por fim, a fase de extração de dados permitiu a coleta minuciosa de informações contidas nos artigos incluídos, viabilizando uma análise aprofundada e crítica dos resultados apresentados.

A. Planejamento

Para orientar o desenvolvimento e a execução desta Revisão Sistemática (RS), foi elaborado um protocolo de pesquisa abrangente. A etapa inicial consistiu em realizar uma

Análise Exploratória para estabelecer critérios de inclusão e exclusão, bem como definir as bases de dados a serem exploradas e as strings de busca a serem utilizadas.

No intuito de incorporar uma variedade de fontes confiáveis, os locais de busca foram criteriosamente selecionados, abrangendo plataformas reconhecidas por sua amplitude em publicações relacionadas à tecnologia e interação humano-computador, como IEEE Xplore e ACM.

As questões de pesquisa orientadoras foram formuladas com o intuito de aprofundar a compreensão do tema em questão:

i. Metodologia Utilizada: Explorar as atividades, métricas e técnicas empregadas para a avaliação de usabilidade nos Ambientes Virtuais Tridimensionais (AVs 3D).

ii. Conformidade com a Norma ISO 9241: Investigar se o método adotado está alinhado com as diretrizes propostas pela Norma ISO 9241.

iii. Uso dos Conceitos de Eficácia, Eficiência e Satisfação: Analisar de que maneira os conceitos de eficácia, eficiência e satisfação foram incorporados no processo de avaliação.

Os critérios de inclusão e exclusão, derivados da Análise Exploratória, foram meticulosamente definidos para garantir a seleção de estudos relevantes e apropriados ao escopo da RS:

- (I) Inclusão: Trabalhos que realizam avaliação de usabilidade em Ambientes Virtuais Tridimensionais (AVs 3D).
- (E) Exclusão: Trabalhos que não conduzem testes com usuários.
- (E) Exclusão: Trabalhos que não apresentam Ambientes Virtuais Tridimensionais (AVs 3D).
- (E) Exclusão: Trabalhos não integralmente disponíveis online.
- (E) Exclusão: Trabalhos não publicados em periódicos.
- (E) Exclusão: Trabalhos publicados há mais de 10 anos.

Este protocolo de pesquisa visa assegurar a abrangência e a confiabilidade da Revisão Sistemática, contribuindo para uma análise aprofundada e fundamentada sobre métodos de avaliação de usabilidade em AVs 3D.

B. Condução da RS

Com o objetivo de atender às questões de pesquisa, uma estratégia específica de busca foi elaborada, culminando na seguinte string de busca:

String de busca: (“abstract”: “usability” OR “user evaluation”) AND (“abstract”: “virtual “reality” OR “augmented reality”)

Essa string foi aplicada nas fontes selecionadas, sendo elas a IEEE Xplore e a ACM Digital Library. O foco da busca recaiu sobre os resumos e abstracts dos trabalhos disponíveis nessas plataformas.

O processo resultou na identificação de um total de 250 artigos. Esses foram distribuídos entre as fontes da seguinte maneira:

- IEEE Xplore: 76% (190 artigos)
- ACM Digital Library: 24% (60 artigos)

No entanto, antes de prosseguir com a fase de extração de dados, foi necessário realizar uma triagem rigorosa, conforme os critérios de exclusão predefinidos. Foram excluídos 317 artigos, com a seguinte distribuição de motivos para exclusão:

- Trabalhos que não apresentaram avaliação de usabilidade: 47%
- Trabalhos que não documentaram testes com usuários: 24%
 - Trabalhos com mais de 10 anos: 11%
- Trabalhos que não apresentam ambientes virtuais 3D: 9%
- Trabalhos não disponíveis online na íntegra: 1%
- Duplicados: 8%

Após a aplicação rigorosa dos critérios de exclusão, restaram 135 artigos considerados elegíveis para a próxima etapa da revisão sistemática. Destes, 103 foram identificados na IEEE Xplore e 32 na ACM Digital Library. Esses artigos foram selecionados para uma análise mais aprofundada, envolvendo a leitura integral e extração de dados, conforme os critérios de inclusão e extração definidos na seção III-A do protocolo de pesquisa. Essa fase permitirá uma análise detalhada dos métodos de avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D presentes na literatura especializada.

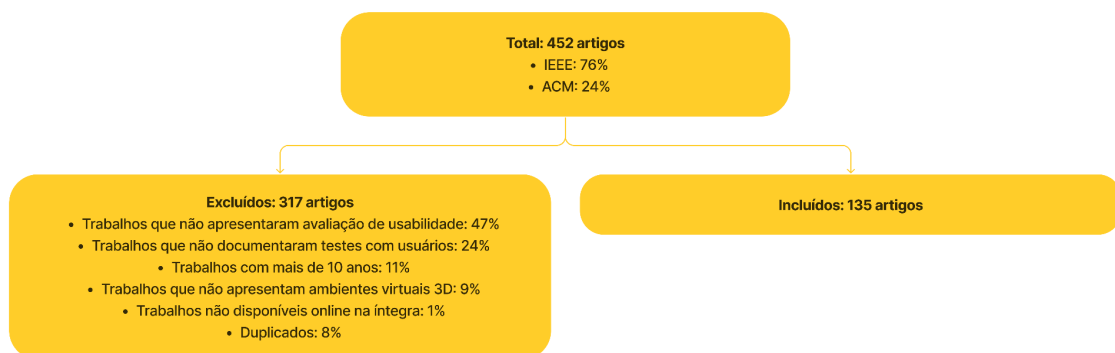


Figura 4 - Diagrama Filtragem de Trabalhos

C. Classificação

Cada trabalho foi examinado para identificar sua abordagem em relação à avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D. As metodologias utilizadas, métricas empregadas e resultados obtidos foram cuidadosamente registrados, proporcionando uma visão abrangente das práticas atuais nesse domínio.

Uma categorização clara foi estabelecida para diferenciar os trabalhos que focaram em Realidade Virtual (RV) daqueles que exploraram a Realidade Aumentada (RA). Essa classificação permitiu uma análise específica das práticas de avaliação de usabilidade em cada contexto, considerando as particularidades de cada tecnologia.

i. *Features* do Produto:

A análise das características específicas dos produtos em ambientes virtuais 3D de Realidade Virtual (RV) e/ou Realidade Aumentada (RA) revelou uma variedade de elementos essenciais considerados pelos estudos na avaliação da usabilidade. Entre as *features* identificadas, destacam-se:

- *Sombra Dinâmica*: Implementação de sombras que se ajustam em tempo real às mudanças na iluminação do ambiente virtual, proporcionando maior realismo visual.
- *Profundidade e Dimensão*: Representação tridimensional realista de objetos, proporcionando aos usuários uma percepção de profundidade e dimensão no espaço virtual.
- *Áudio Espacial*: Incorporação de efeitos sonoros posicionais, permitindo aos usuários identificar a direção e a proximidade de fontes sonoras no ambiente virtual.
- *Presença Virtual*: Tecnologias que promovem a sensação de presença, como feedback tátil, vibrações ou outras interações sensoriais que aumentam a imersão do usuário.
- *Reconhecimento de Fala*: Integração de sistemas de reconhecimento de fala para interação natural do usuário com o ambiente virtual, possibilitando comandos de voz e diálogos.
- *Interação com Objetos Virtuais*: Capacidade de manipular e interagir com objetos virtuais de forma intuitiva, por meio de gestos, toques ou outros controles específicos.
- *Realismo Gráfico Avançado*: Utilização de texturas, iluminação avançada e renderização realista para criar ambientes visuais de alta qualidade e detalhamento.
- *Personalização do Ambiente*: Oferta de opções para os usuários personalizarem elementos do ambiente virtual, como aparência do avatar, configurações de interface e preferências de experiência.
- *Feedback Háptico*: Integração de feedback tátil para simular sensações físicas, como toque, resistência ou vibração, proporcionando uma experiência mais sensorial.
- *Integração de Dispositivos Externos*: Suporte para a integração de dispositivos externos, como sensores de movimento, controladores específicos ou outros periféricos que ampliam as opções de interação.



Figura 5 - Classificação das features do produto dos trabalhos

ii. Contexto de Uso:

A associação de cada trabalho a um contexto de uso específico proporcionou uma compreensão mais profunda de como as práticas de usabilidade variam de acordo com os propósitos e demandas de diversos cenários de aplicação. Alguns exemplos significativos de contextos de uso em sistemas virtuais 3D de Realidade Virtual (RV) e/ou Realidade Aumentada (RA) incluem:

- *Treinamento Profissional:* Desenvolvimento de ambientes virtuais para simulação de situações profissionais, permitindo treinamento e aprimoramento de habilidades em áreas como medicina, aviação ou manutenção industrial.
- *Educação a Distância:* Criação de experiências educativas imersivas, possibilitando a aprendizagem em ambientes virtuais tridimensionais, seja em disciplinas específicas, visitas virtuais a museus ou exploração de conceitos complexos.
- *Entretenimento e Jogos:* Desenvolvimento de jogos e experiências de entretenimento imersivas, oferecendo aos usuários a oportunidade de explorar mundos virtuais, participar de narrativas interativas e interagir com personagens virtuais.
- *Colaboração Remota:* Facilitação da colaboração entre equipes geograficamente dispersas por meio de ambientes virtuais compartilhados, onde os participantes podem interagir como se estivessem no mesmo espaço físico.
- *Turismo Virtual:* Oferta de experiências turísticas virtuais que permitem aos usuários explorar locais históricos, culturais ou geográficos sem sair de casa, proporcionando uma experiência imersiva.
- *Saúde Mental e Bem-Estar:* Desenvolvimento de aplicações voltadas para a promoção da saúde mental, como terapias virtuais, relaxamento guiado e ambientes virtuais terapêuticos.

- *Design e Arquitetura*: Utilização de ambientes virtuais para visualização de projetos arquitetônicos, design de interiores e simulação de espaços antes da construção física.
- *Simulações Científicas*: Desenvolvimento de ambientes virtuais para simulações científicas complexas, como estudos de fenômenos naturais, modelagem molecular ou simulações ambientais.
- *Experiências Sociais Virtuais*: Criação de plataformas que possibilitam encontros e interações sociais em ambientes virtuais, simulando a presença física para eventos, conferências ou simples convívio.

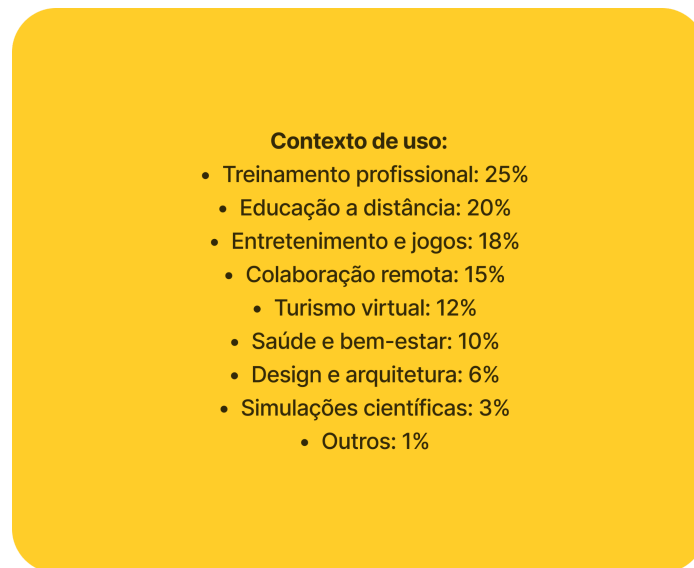


Figura 6 - Classificação do contexto de uso

iii. Equipamento de RV ou RA:

A categorização do equipamento utilizado em sistemas virtuais 3D de RV ou RA proporcionou uma visão abrangente de como as características do hardware podem influenciar as práticas de usabilidade. Diversos tipos de equipamentos foram identificados, refletindo a variedade de dispositivos disponíveis para a experiência imersiva. Alguns exemplos incluem:

- *Óculos de Realidade Virtual (RV)*: Óculos VR de imersão total, como Oculus Rift, HTC Vive, e dispositivos de RV autônomos, como Oculus Quest.
- *Óculos de Realidade Aumentada (RA)*: Dispositivos que sobrepoem elementos virtuais ao ambiente real, como Microsoft HoloLens, Google Glass e Magic Leap.
- *Dispositivos Móveis com RV/RA*: Aplicativos de RV/RA em smartphones ou tablets, usando a câmera do dispositivo para sobrepor elementos virtuais à realidade.
- *Sistemas Computacionais Específicos*: Computadores pessoais ou workstations dedicadas, muitas vezes conectados a óculos de RV de alta performance.
- *Controladores e Dispositivos de Entrada*: Dispositivos de controle, como controles VR, luvas sensorizadas, joysticks ou teclados específicos para interação no ambiente virtual.

- *Vestíveis de Rastreamento de Movimento*: Sensores corporais ou vestíveis que rastreiam os movimentos do usuário, proporcionando uma experiência mais imersiva, como os sensores de corpo inteiro.
- *Simuladores de Movimento*: Equipamentos que reproduzem movimentos físicos para simular experiências realistas, frequentemente utilizados em ambientes de treinamento ou jogos.
- *Dispositivos Hápticos*: Tecnologias que oferecem feedback tátil, como luvas hápticas, coletes vibratórios ou dispositivos de retorno de força.
- *Dispositivos de Rastreamento Ocular*: Sensores que monitoram os movimentos dos olhos, permitindo interações mais naturais e aprimorando a sensação de presença.
- *Dispositivos de Captura de Movimento*: Sistemas que capturam os movimentos do corpo do usuário para replicá-los no ambiente virtual, como câmeras de captura de movimento.
- *Dispositivos de Áudio Específicos*: Fones de ouvido de alta fidelidade ou sistemas de áudio espacial para uma experiência sonora imersiva.

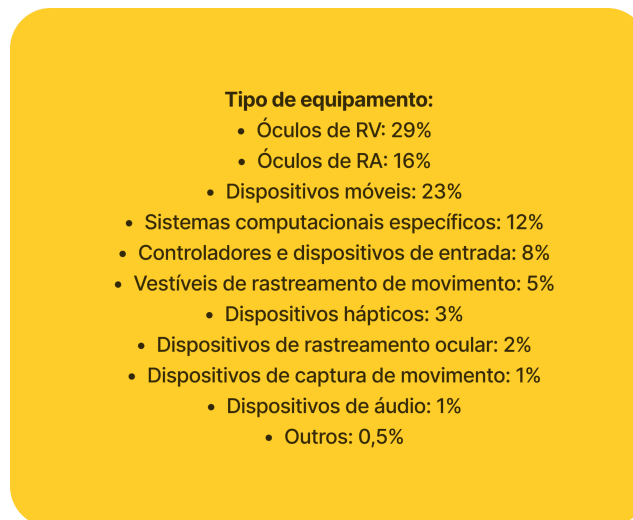


Figura 7 - Classificação do tipo de equipamento

iv. Perfil do Usuário:

A classificação dos estudos de acordo com o perfil dos usuários revelou uma ampla gama de abordagens de usabilidade, levando em consideração diferentes grupos demográficos e níveis de habilidade. Diversos perfis de usuários foram identificados em sistemas virtuais 3D de Realidade Virtual (RV) ou Realidade Aumentada (RA). Alguns exemplos de grupos demográficos e perfis de usuários incluem:

- *Usuários Novatos*: Indivíduos sem experiência prévia em ambientes virtuais 3D, que estão sendo introduzidos pela primeira vez a dispositivos de RV ou RA.
- *Usuários Experientes em Jogos*: Pessoas familiarizadas com jogos eletrônicos, que possuem habilidades de interação e navegação aprimoradas em ambientes virtuais.

- *Profissionais da Saúde:* Médicos, enfermeiros e profissionais de saúde envolvidos em simulações médicas ou treinamentos em ambientes virtuais para aprimorar habilidades específicas.
- *Estudantes e Acadêmicos:* Alunos envolvidos em experiências educacionais virtuais, laboratórios virtuais ou simulações para fins de aprendizado.
- *Idosos:* Indivíduos da terceira idade, cujas necessidades e capacidades podem variar, influenciando a usabilidade de acordo com a acessibilidade e compreensão.
- *Trabalhadores Industriais:* Profissionais envolvidos em treinamento para operações industriais, manutenção de equipamentos ou simulações de ambientes de trabalho específicos.
- *Crianças:* Crianças e adolescentes, cujas experiências e desafios de usabilidade podem ser distintos, exigindo interfaces mais intuitivas e adequadas à faixa etária.
- *Usuários com Necessidades Especiais:* Indivíduos com deficiências físicas ou cognitivas, cujas necessidades específicas devem ser consideradas para garantir a acessibilidade e inclusão.
- *Designers e Arquitetos:* Profissionais de design e arquitetura que utilizam ambientes virtuais 3D para visualização de projetos e simulações.
- *Consumidores Gerais:* Usuários comuns que buscam entretenimento, compras virtuais ou outras experiências em ambientes 3D de RV ou RA.

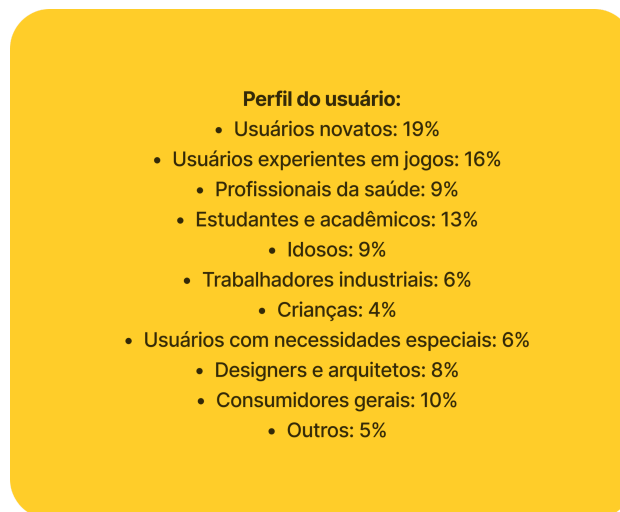


Figura 8 - Classificação do perfil do usuário

v. Identificação dos Parâmetros da Norma ISO 9241:

Dentro do escopo da análise de usabilidade, a identificação e registro dos parâmetros da Norma ISO 9241 enfocaram eficácia, eficiência e satisfação do usuário. A seguir, são apresentados exemplos de tipos de avaliação associados a cada um desses parâmetros em sistemas 3D de Realidade Virtual (RV) e/ou Aumentada (RA):

- *Eficácia:*
 - *Taxa de Sucesso na Tarefa:* Medição da capacidade do usuário de realizar com sucesso uma tarefa específica no ambiente 3D, indicando a eficácia das interações.

- *Precisão na Execução*: Avaliação da precisão com que o usuário realiza ações ou manipula objetos virtuais, destacando a eficácia na execução de tarefas.
- *Taxa de Erros*: Registro e análise da frequência e natureza dos erros cometidos pelo usuário durante as interações no ambiente virtual.
- *Eficiência*:
 - *Tempo de Execução da Tarefa*: Medição do tempo necessário para que o usuário conclua uma tarefa específica, indicando a eficiência das interações.
 - *Número de Cliques ou Comandos*: Contagem do número de cliques, gestos ou comandos necessários para realizar uma ação ou completar uma tarefa, evidenciando a eficiência do sistema.
 - *Carga Cognitiva*: Avaliação do esforço mental exigido do usuário para realizar tarefas, considerando a eficiência das interações no ambiente 3D.
- *Satisfação do Usuário*:
 - *Escala de Avaliação Subjetiva*: Aplicação de questionários com escalas de satisfação, permitindo que os usuários expressem seu nível de contentamento em relação à experiência no sistema.
 - *Entrevistas Pós-Tarefa*: Realização de entrevistas estruturadas ou semi-estruturadas para obter feedback qualitativo sobre a satisfação do usuário após a conclusão de tarefas específicas.
 - *Usabilidade Percebida*: Utilização de questionários padronizados, como o System Usability Scale (SUS), para medir a percepção global de usabilidade e satisfação do usuário.

Uma análise criteriosa dos resultados será conduzida na seção III-D, a fim de proporcionar uma visão aprofundada das práticas de avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D, destacando padrões, variabilidades e tendências significativas no uso da Norma ISO 9241 como referência central.

D. Resultados:

i. Features do Produto:

- *Sombra Dinâmica*:

A avaliação da eficácia da sombra dinâmica é realizada, em alguns trabalhos, por meio de testes de percepção visual, onde os usuários são submetidos a ambientes virtuais com variações na iluminação. A capacidade de identificar com precisão a direção e a intensidade das sombras pode ser medida quantitativamente, observando a taxa de acertos e o tempo necessário para reconhecimento. Para avaliar a eficiência, o tempo necessário para os usuários reconhecerem as mudanças nas sombras, por exemplo, foi considerado. Além disso, feedbacks qualitativos através de entrevistas pós-tarefa podem revelar a satisfação do usuário em relação à naturalidade e realismo das sombras dinâmicas.

- *Profundidade e Dimensão*:

Já a eficácia da representação tridimensional é avaliada por meio de testes de percepção de profundidade. Utilizando ambientes virtuais com objetos dispostos em diferentes planos, os usuários foram desafiados a avaliar a precisão da profundidade percebida. Métricas como erro de estimativa de distância e tempo de reação foram usados em trabalhos para fornecer indicadores quantitativos de eficácia, enquanto a eficiência foi avaliada pelo tempo que os usuários levam para completar tarefas relacionadas à percepção de profundidade. Novamente, a satisfação do usuário em relação à sensação de imersão e realismo pode ser capturada por meio de escalas de avaliação subjetiva.

- *Áudio Espacial:*

Para avaliar a eficácia do áudio espacial, testes de localização sonora foram sempre utilizados nos trabalhos. A precisão nas respostas indica a eficácia, enquanto a eficiência foi medida pelo tempo necessário para os usuários identificarem a direção das fontes sonoras. A satisfação foi explorada por questionários sobre a naturalidade do áudio espacial.

- *Presença Virtual:*

A eficácia das tecnologias de presença virtual foi medida por meio de testes de interação social. Observou-se a naturalidade e eficácia das interações sociais, para medir a eficácia percebida. Para avaliar a eficiência, novamente a dimensão de o tempo gasto pelos usuários em interações sociais foi considerada. Entrevistas pós-tarefa exploraram a satisfação do usuário quanto à imersão e à sensação de presença.

- *Reconhecimento de Fala:*

A eficácia do reconhecimento de fala foi avaliada por testes específicos. A taxa de sucesso na interpretação dos comandos e a precisão na execução indicaram a eficácia, enquanto a eficiência foi medida pelo tempo necessário para os usuários completarem tarefas por meio de comandos de voz. Questionários de satisfação exploraram a facilidade de uso e a naturalidade da interação por voz.

- *Interação com Objetos Virtuais:*

A eficácia da interação com objetos virtuais foi medida por meio de testes de desempenho. Novamente, métricas como tempo de conclusão da tarefa e número de erros indicaram a eficácia, enquanto a eficiência foi avaliada observando o esforço necessário para realizar as interações. Escalas de avaliação subjetiva exploraram a satisfação do usuário com a experiência de interação.

- *Realismo Gráfico Avançado:*

A eficácia do realismo gráfico avançado foi avaliada por testes de percepção visual. A identificação precisa de texturas e renderização realista indicaram a eficácia, enquanto a eficiência pôde ser medida pelo tempo necessário para os usuários reconhecerem detalhes gráficos. Questionários pós-tarefa exploraram a satisfação do usuário com a qualidade visual e imersão.

- *Personalização do Ambiente:*

A eficácia da personalização do ambiente foi avaliada por meio de testes de preferência do usuário. A escolha e adaptação dos usuários às opções indicaram a eficácia, enquanto a eficiência foi medida pelo tempo gasto na personalização. Entrevistas qualitativas exploraram a satisfação do usuário quanto ao controle e à identificação com o ambiente personalizado.

- *Feedback Háptico:*

Testes de feedback háptico podem avaliar a eficácia dessa feature. A precisão nas respostas táteis e a correlação com as ações virtuais indicam a eficácia, enquanto a eficiência foi observada pelo tempo necessário para os usuários reagirem ao feedback tátil. Entrevistas pós-tarefa exploram a satisfação do usuário quanto à sensação tátil e imersão.

- *Integração de Dispositivos Externos:*

A eficácia da integração de dispositivos externos foi avaliada por meio de testes de desempenho. Métricas como tempo de adaptação e taxa de sucesso na utilização desses dispositivos indicaram a eficácia, enquanto a eficiência é avaliada observando a facilidade de uso desses dispositivos. Questionários trouxeram a satisfação do usuário com a contribuição desses dispositivos para a experiência global.

ii. Contexto de uso:

- *Treinamento Profissional:*

Para avaliar a usabilidade em ambientes de treinamento profissional em sistemas 3D de Realidade Virtual (RV) e/ou Realidade Aumentada (RA), é possível realizar testes de eficácia ao verificar a precisão com que os usuários executam tarefas simuladas, como procedimentos médicos ou operações industriais. A eficiência foi medida pelo tempo gasto para completar as simulações, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback qualitativo sobre a realidade e utilidade percebidas das simulações para o treinamento.

- *Educação a Distância:*

Em contextos educacionais virtuais, a eficácia foi avaliada por meio de testes de aprendizado, medindo o quão bem os alunos absorveram e aplicaram conceitos apresentados em ambientes 3D. A eficiência pode ser medida pelo tempo necessário para completar

atividades educativas, enquanto a satisfação foi obtida por meio de avaliações subjetivas sobre a experiência de aprendizado e a utilidade percebida dos ambientes virtuais.

- *Entretenimento e Jogos:*

A avaliação de usabilidade em jogos e experiências de entretenimento 3D pode incluir testes de eficácia para medir o desempenho dos jogadores em desafios virtuais. A eficiência, por sua vez, pode ser medida pelo tempo de conclusão de níveis ou missões, enquanto a satisfação pode ser avaliada por meio de questionários sobre a experiência emocional, a imersão no jogo e a facilidade de interação.

- *Colaboração Remota:*

Em ambientes de colaboração remota, a eficácia foi medida pela precisão na execução de tarefas colaborativas à distância. Já a eficiência foi avaliada pelo tempo gasto na conclusão de projetos ou atividades colaborativas, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a eficácia da comunicação e da sensação de presença virtual.

- *Turismo Virtual:*

Para avaliar a usabilidade em experiências de turismo virtual, a eficácia pode ser medida pelo engajamento do usuário na exploração de locais virtuais e pela compreensão das informações fornecidas. A eficiência pode ser avaliada pelo tempo gasto na navegação pelos destinos, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de questionários sobre a experiência turística, a imersão e a facilidade de uso.

- *Saúde Mental e Bem-Estar:*

Em aplicações voltadas para a saúde mental, a eficácia pode ser avaliada pela eficácia percebida das terapias virtuais e exercícios de relaxamento. A eficiência pode ser medida pelo tempo dedicado às atividades de bem-estar, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de avaliações sobre a utilidade percebida e o impacto positivo na saúde mental.

- *Design e Arquitetura:*

A eficácia em ambientes virtuais utilizados para design e arquitetura pode ser avaliada pela precisão na visualização e compreensão dos projetos. A eficiência pode ser medida pelo tempo gasto na revisão e modificação de designs virtuais, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a utilidade percebida na fase de design.

- *Simulações Científicas:*

Em simulações científicas, a eficácia pode ser avaliada pela precisão e compreensão dos resultados obtidos virtualmente. A eficiência pode ser medida pelo tempo gasto na realização de simulações, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a utilidade percebida das simulações para fins científicos.

- *Experiências Sociais Virtuais:*

Em plataformas de experiências sociais virtuais, a eficácia pode ser avaliada pela qualidade da interação social virtual. A eficiência pode ser medida pelo tempo gasto em

interações sociais, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de avaliações sobre a sensação de presença e a qualidade das interações sociais virtuais.

iii. Equipamento de RV ou RA:

- *Óculos de Realidade Virtual (RV):*

Para avaliar a usabilidade em óculos de RV, pode-se medir a eficácia observando a precisão nas interações dentro do ambiente virtual, como a capacidade do usuário de realizar tarefas específicas usando os controles dos óculos. A eficiência pode ser avaliada pelo tempo gasto para concluir atividades, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a imersão, qualidade visual e conforto durante a experiência.

- *Óculos de Realidade Aumentada (RA):*

Em óculos de RA, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na sobreposição de elementos virtuais ao ambiente real, observando a capacidade do usuário de interagir efetivamente com esses elementos. A eficiência pode ser medida pelo tempo necessário para concluir tarefas de RA, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a utilidade percebida das informações sobrepostas e a experiência geral de integração entre o virtual e o real.

- *Dispositivos Móveis com RV/RA:*

Para dispositivos móveis, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na detecção de elementos virtuais usando a câmera do dispositivo e pela facilidade de interação através da tela sensível ao toque. A eficiência pode ser medida pelo consumo de recursos do dispositivo e pelo tempo de resposta às interações, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de avaliações sobre a portabilidade e a praticidade do uso móvel.

- *Sistemas Computacionais Específicos:*

Em sistemas conectados a computadores pessoais ou workstations dedicadas, a eficácia pode ser avaliada pela precisão nas representações visuais e interações no ambiente 3D. A eficiência pode ser medida pelo desempenho do sistema e pela taxa de quadros durante a experiência, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a qualidade visual e a fluidez das interações.

- *Controladores e Dispositivos de Entrada:*

A eficácia na utilização de controladores e dispositivos de entrada pode ser avaliada pela precisão e responsividade durante as interações virtuais. A eficiência pode ser medida pela facilidade de aprendizado e utilização desses dispositivos, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a naturalidade e conforto nas interações.

- *Vestíveis de Rastreamento de Movimento:*

Para vestíveis de rastreamento de movimento, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na captura e reprodução dos movimentos do usuário. A eficiência pode ser medida pela facilidade de configuração e calibração desses dispositivos, enquanto a satisfação pode

ser obtida por meio de feedback sobre a naturalidade e realismo na reprodução dos movimentos.

- *Simuladores de Movimento:*

Em simuladores de movimento, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na reprodução de movimentos físicos e pela sincronização com a experiência virtual. A eficiência pode ser medida pelo desempenho do simulador e pela facilidade de ajuste às preferências do usuário, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a imersão e realismo proporcionados.

- *Dispositivos Hápticos:*

A eficácia em dispositivos hápticos pode ser avaliada pela precisão na entrega de feedback tátil, destacando a capacidade do dispositivo de simular sensações físicas de forma realista. A eficiência pode ser medida pela resposta imediata e pela calibração do feedback tátil, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a imersão tátil e a contribuição para a experiência global.

- *Dispositivos de Rastreamento Ocular:*

Em dispositivos de rastreamento ocular, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na detecção dos movimentos oculares e pela integração efetiva dessas informações no ambiente virtual. A eficiência pode ser medida pela facilidade de calibração e pela resposta em tempo real, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a naturalidade e utilidade das interações oculares.

- *Dispositivos de Captura de Movimento:*

Para dispositivos de captura de movimento, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na reprodução dos movimentos do corpo do usuário no ambiente virtual. A eficiência pode ser medida pela facilidade de configuração e pela sincronização precisa dos movimentos capturados, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a fidelidade na replicação dos movimentos.

- *Dispositivos de Áudio Específicos:*

Em fones de ouvido de alta fidelidade ou sistemas de áudio espacial, a eficácia pode ser avaliada pela precisão na reprodução de efeitos sonoros posicionais. A eficiência pode ser medida pelo desempenho do sistema em criar uma experiência sonora imersiva, enquanto a satisfação pode ser obtida por meio de feedback sobre a qualidade do áudio e a contribuição para a sensação de presença no ambiente virtual.

IV. Framework consolidado

A. Contexto de uso:

O framework consolidado para avaliação de sistemas virtuais 3D abrange uma variedade de contextos de uso, cada um com métricas específicas de eficácia para medir o desempenho e a adequação do sistema. A consolidação cuidadosa desses contextos e métricas proporciona uma estrutura abrangente para avaliação

i. Treinamento ou Educação:

- Métrica de Eficácia: Precisão após Demonstração
- Descrição: Neste contexto, a eficácia é avaliada pela precisão do usuário após receber uma demonstração. Isso implica medir quão precisamente os usuários conseguem aplicar o conhecimento adquirido durante a demonstração, refletindo a capacidade do sistema de facilitar a aprendizagem e a retenção de informações.

ii. Entretenimento e Jogos:

- Métrica de Eficácia: Desempenho em Atividades Previstas
- Descrição: A eficácia é medida pelo desempenho dos usuários nas atividades previstas pelo sistema de entretenimento ou jogo. Isso inclui avaliar a capacidade do sistema de proporcionar uma experiência envolvente e cativante, com os usuários atingindo objetivos ou completando tarefas dentro do ambiente virtual.

iii. Turismo:

- Métrica de Eficácia: Engajamento em % de Atividades Cumpridas
- Descrição: A eficácia neste contexto é quantificada pelo engajamento dos usuários, medido como a percentagem de atividades planejadas que foram cumpridas. Isso reflete a capacidade do sistema de envolver os usuários em uma experiência turística virtual completa.

iv. Saúde e Bem-Estar:

- Métrica de Eficácia: Relato Qualitativo de Percepção de Melhoria
- Descrição: Avalia-se a eficácia neste contexto através de relatos qualitativos dos usuários sobre sua percepção de melhoria na saúde e bem-estar. Essa abordagem qualitativa captura elementos subjetivos, incluindo a sensação geral de benefícios proporcionados pelo sistema em termos de saúde mental e física.

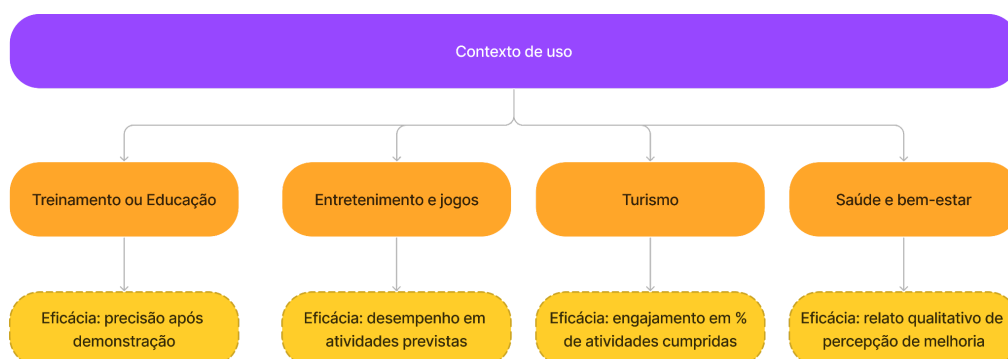


Figura 9 - Consolidação dos contextos de uso

B. Funcionalidades dos sistemas de RV e/ou RA:

Destacou-se as principais funcionalidades dos sistemas estudados e foram propostas diretrizes de avaliação de usabilidade consolidadas

No caso da Sombra Dinâmica, pode ser avaliado em termos de percepção visual, considerando a direção e intensidade. Métricas de avaliação, como taxas de acertos, podem ser aplicadas para mensurar a eficácia dessa funcionalidade. Além disso, o tempo necessário para o reconhecimento e feedback qualitativo pode oferecer insights valiosos sobre a eficiência e a satisfação do usuário em relação à Sombra Dinâmica.

A Profundidade e Dimensão, outra funcionalidade crucial, pode ser submetida a uma avaliação focada na percepção de profundidade. Parâmetros como distância e métricas que avaliem o desvio entre a estimativa do usuário e a distância real são fundamentais para medir a eficácia dessa característica. O tempo de reação pode ser utilizado como medida de eficiência, enquanto o feedback qualitativo contribui para uma avaliação mais abrangente da satisfação do usuário.

No caso do Áudio Espacial, a dimensão de eficácia pode ser relacionada à percepção sonora, onde a localização é um parâmetro crítico. A aplicação de métricas, como taxas de acertos, permite quantificar a eficácia dessa funcionalidade. O tempo necessário para o reconhecimento auditivo e feedback qualitativo são instrumentos valiosos para avaliar a eficiência e a satisfação do usuário em relação ao Áudio Espacial.

Cada funcionalidade do sistema virtual, seja o Reconhecimento de Fala, Interação com Objetos Virtuais ou outras, segue uma abordagem semelhante. A definição de dimensões específicas de eficácia, parâmetros de eficácia mensuráveis, métricas de avaliação quantificáveis, medidas de eficiência e avaliação de satisfação através de feedback qualitativo proporciona um framework abrangente para avaliação de usabilidade em sistemas virtuais 3D. Essa estrutura, fundamentada em critérios claros e mensuráveis, contribui para o desenvolvimento e aprimoramento contínuo dessas tecnologias, visando uma experiência de usuário cada vez mais satisfatória e eficiente.

Abaixo é apresentado um mapa consolidado de métodos para avaliação de usabilidade de acordo com as funcionalidades existentes no sistema.

Funcionalidade do sistema virtual	Dimensão de eficácia	Parâmetros de eficácia	Métricas de avaliação	Medida de eficiência	Avaliação de satisfação
Sombra dinâmica	Percepção visual	Direção e intensidade	Taxas de acertos	Tempo necessário para reconhecimento	Feedback qualitativo
Profundidade e dimensão	Percepção de profundidade	Distância	Desvio entre estimativa do usuário e distância real	Tempo de reação	Feedback qualitativo
Áudio espacial	Percepção sonora	Localização	Taxa de acertos	Tempo necessário para reconhecimento	Feedback qualitativo
Presença virtual	Iteração social	Distância	Desvio entre estimativa do usuário e distância real	Tempo produtivo de engajamento	Feedback qualitativo
Reconhecimento de fala	Interpretação dos comandos	Assertividade	Taxa de acertos	Tempo gasto para comando bem sucedido	Feedback qualitativo
Interação com objetos virtuais ou externos	Testes de desempenho	Desempenho	Taxa de acertos	Tempo de conclusão de tarefas	Feedback qualitativo
Realismo gráfico	Percepção visual	Identificação	Taxa de acertos	Tempo necessário para reconhecimento	Feedback qualitativo
Personalização do ambiente	Testes de preferência do usuário	Adaptabilidade	Taxa de assertividade das ações	Tempo produtivo de engajamento	Feedback qualitativo
Feedback háptico	Testes de feedback háptico	Assertividade	Taxa de acertos	Tempo de adaptação	Feedback qualitativo

Figura 10 - Tabela proposta de Avaliação de Usabilidade em sistemas virtuais 3D

V. Conclusão

Com base na RS realizada neste estudo, podemos concluir que a avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D ainda é um desafio complexo e multifacetado. Embora existam diversas métricas e técnicas disponíveis para medir a efetividade, eficiência e satisfação do usuário em sistemas virtuais 3D, ainda há lacunas significativas na aplicação dessas diretrizes na prática.

Algumas das principais lacunas identificadas incluem a falta de padronização na definição e medição de métricas de usabilidade, a falta de consideração de fatores contextuais e individuais na avaliação de usabilidade, e a falta de integração entre as métricas de usabilidade e as metas de negócio dos sistemas virtuais 3D, pela ausência do amparo em norma técnica como a Norma ISO 9241.

Para superar essas lacunas e melhorar a avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D, propomos algumas diretrizes práticas, ancoradas na Norma ISO 9241, como a adoção de uma abordagem holística e integrada para a avaliação de usabilidade, a definição clara de metas e objetivos de usabilidade específicos para cada sistema virtual 3D, e a consideração cuidadosa de fatores contextuais e individuais na definição e medição de métricas de usabilidade.

Em resumo, a avaliação de usabilidade em ambientes virtuais 3D é um desafio complexo, mas essencial para garantir a efetividade, eficiência e satisfação do usuário em sistemas virtuais 3D. Ao adotar uma abordagem holística e integrada para a avaliação de usabilidade e considerar cuidadosamente os fatores contextuais e individuais, podemos melhorar significativamente a *user evaluation* dos sistemas virtuais 3D e garantir uma experiência de usuário mais satisfatória e eficiente.

VI. Referências

MARTINS, Valéria Farinazzo; DE PAIVA GUIMARÃES, Marcelo; CORREA, Ana Grasielle. Usability test for Augmented Reality applications. In: 2013 XXXIX Latin American Computing Conference (CLEI). IEEE, 2013. p. 1-10.

GUIMARAES, Marcelo De Paiva; MARTINS, Valeria Farinazzo. A checklist to evaluate augmented reality applications. In: 2014 XVI Symposium on Virtual and Augmented Reality. IEEE, 2014. p. 45-52.

ISO 9241-11: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 11 Guidance on usability (1998)

MARSH, Tim. Evaluation of virtual reality systems for usability. In: CHI'99 extended abstracts on Human factors in computing systems. 1999. p. 61-62.

NIELSEN, J. of Usability engineering. Academic Press, 1993.

E SILVA, Sahra Karolina Gomes; CORRÊA, Cléber G.; NUNES, Fátima L.S. Three-dimensionality perception evaluation in stereoscopic virtual environments: A systematic review. In: 2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). IEEE, 2016. p. 198-209.

ČEJKA, Jan et al. Evaluating the potential of augmented reality interfaces for exploring underwater historical sites. IEEE Access, v. 9, p. 45017-45031, 2021.

POLVI, Jarkko et al. Handheld guides in inspection tasks: Augmented reality versus picture. IEEE transactions on visualization and computer graphics, v. 24, n. 7, p. 2118-2128, 2017.

OH, Seungjae; SO, Hyo-Jeong; GAYDOS, Matthew. Hybrid augmented reality for participatory learning: The hidden efficacy of multi-user game-based simulation. IEEE Transactions on Learning Technologies, v. 11, n. 1, p. 115-127, 2017.

W. Chen; Y. Shan; Y. Wu; Z. Yan; X. Li Design and Evaluation of a Distance-Driven User Interface for Asynchronous Collaborative Exhibit Browsing in an Augmented Reality Museum IEEE Access 2021 7394873962

Kwon, H. J.; Kim, K. S.; Kim, C. S. Development and Evaluation of Augmented Reality Learning Content for Pneumatic Flow: Case Study on Brake Operating Unit of Railway Vehicle. IEEE Access, 2023, 46(3), 46173-46184.

Hu, X.; Baena, F. R. y.; Cutolo, F. Head-Mounted Augmented Reality Platform for Markerless Orthopaedic Navigation. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2022, 91, 9, 1092-921.

Feierle, A.; Schlichtherle, F.; Bengler, K. Augmented Reality Head-Up Display: A Visual Support During Malfunctions in Partially Automated Driving? IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 48, 5, 3485-3486.

Oh, J. Y.; Park, J. -H.; Park, J. -M. FingerTouch: Touch Interaction Using a Fingernail-Mounted Sensor on a Head-Mounted Display for Augmented Reality. IEEE Access, 2020, 10, 11921-12008.

Eck, U.; Pankratz, F.; Sandor, C.; Klinker, G.; Laga, H. Precise Haptic Device Co-Location for Visuo-Haptic Augmented Reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2015, 21, 14, 271-1441.

Yu, K.; Eck, U.; Pankratz, F.; Lazarovici, M.; Wilhelm, D.; Navab, N. Duplicated Reality for Co-located Augmented Reality Collaboration. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022, 21, 1, 902-2200.

Wazir, W.; Khattak, H. A.; Almogren, A.; Khan, M. A.; Ud Din, I. Doodle-Based Authentication Technique Using Augmented Reality. *IEEE Access*, 2020, 40, 22403-4034.

Pratticò, F. G.; Lamberti, F.; Cannavò, A.; Morra, L.; Montuschi, P. Comparing State-of-the-Art and Emerging Augmented Reality Interfaces for Autonomous Vehicle-to-Pedestrian Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 11, 57, 1168-1168.

Farooq, S. S.; Rahman, H.; Raza, S. A. N.; Raees, M.; Jung, S. K. Designing Gamified Application: An Effective Integration of Augmented Reality to Support Learning. *IEEE Access*, 2022, 12, 13851-13894.

Meli, L.; Pacchierotti, C.; Salvietti, G.; Chinello, F.; Maisto, M.; De Luca, A.; Prattichizzo, D. Combining Wearable Finger Haptics and Augmented Reality: User Evaluation Using an External Camera and the Microsoft HoloLens. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 4, 2, 297-4304.

Yin, J.; Fu, C.; Zhang, X.; Liu, T. Precise Target Selection Techniques in Handheld Augmented Reality Interfaces. *IEEE Access*, 2019, 17, 663-17674.

Rivera Alvarado, L. A.; López Domínguez, E.; Hernández Velázquez, Y.; Domínguez Isidro, S.; Excelente Toledo, C. B. Layered Software Architecture for the Development of Mobile Learning Objects With Augmented Reality. *IEEE Access*, 2018, 5, 78, 9757-9759.

Yan, Z.; Wu, Y.; Li, Y.; Shan, Y.; Li, X.; Hansen, P. Design Eye-Tracking Augmented Reality Headset to Reduce Cognitive Load in Repetitive Parcel Scanning Task. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2022, 57, 8, 590-590.

Amara, K.; Kerdjadj, O.; Guerroudj, M. A.; Zenati, N.; Djekoune, O. Augmented Reality Visualization and Interaction for COVID-19 CT-Scan NN Automated Segmentation: A Validation Study. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 12, 11412-11423.

Pham, T. a.; Moesgen, T.; Siltanen, S.; Bergström, J.; Xiao, Y. ARiana: Augmented Reality Based In-Situ Annotation of Assembly Videos. *IEEE Access*, 2022, 11, 17041-17124.

Marto, A.; Melo, M.; Gonçalves, A.; Bessa, M. Development and Evaluation of an Outdoor Multisensory AR System for Cultural Heritage. *IEEE Access*, 2021, 16, 419-16434.

Kern, F.; Niebling, F.; Latoschik, M. E. Text Input for Non-Stationary XR Workspaces: Investigating Tap and Word-Gesture Keyboards in Virtual and Augmented Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, 26, 58-2669.

Kim, H.; Gabbard, J. L.; Anon, A. M.; Misu, T. Driver Behavior and Performance with Augmented Reality Pedestrian Collision Warning: An Outdoor User Study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 15, 15, 1515-1524.

Gabbard, J. L.; Smith, M.; Merenda, C.; Burnett, G.; Large, D. R. A Perceptual Color-Matching Method for Examining Color Blending in Augmented Reality Head-Up Display Graphics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2022, 28, 34-2851.

Bai, Z.; Blackwell, A. F.; Coulouris, G. Using Augmented Reality to Elicit Pretend Play for Children with Autism. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2015, 9, 86-110.

Jo, D.; Kim, G. J. ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2016, 33-43.

Strada, F.; Bottino, A.; Lamberti, F.; Mormando, G.; Ingrassia, P. L. Holo-BLSD – A Holographic Tool for Self-training and Self-Evaluation of Emergency Response Skills. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2021, 15, 811-1595.

Hu, S.; Rong, L.; Han, J.; Zhang, D.; Jiang, W. The Effects of Interaction Mode and Individual Differences on Usability and User Experience of Mobile Augmented Reality Navigation. *IEEE Access*, 2023, 41, 7834-1795.

Xie, B.; Zhang, Y.; Huang, H.; Ogawa, E.; You, T.; Yu, L. -F. Exercise Intensity-Driven Level Design. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*

Zhou, Y.; Xu, T.; Yang, H.; Li, S. Improving Spatial Visualization and Mental Rotation Using FORSpatial Through Shapes and Letters in Virtual Environment. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2022, 32, 6, 337-337.

Southworth, M. K.; Silva, J. N. A.; Blume, W. M.; Van Hare, G. F.; Dalal, A. S.; Silva, J. R. Performance Evaluation of Mixed Reality Display for Guidance During Transcatheter Cardiac Mapping and Ablation. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 2020, 11, 0.

Filgueiras Damasceno, E.; Nardi, P. A.; Silva, A. K. A.; Dias Junior, J. B.; Cardoso, A. 3D Virtual Simulation approach in Brazilian Vocational Education for Computers Network Adapted to Student Knowledge. *IEEE Latin America Transactions*, 2017, 19, 19, 1719-1925.

Heinonen, H.; Siltanen, S.; Ahola, P. Information Design for Small Screens: Toward Smart Glass Use in Guidance for Industrial Maintenance. *IEEE Transactions on Professional Communication*, 2021, 40, 7, 426-426.

Young, J.; Pantidi, N.; Wood, M. I Can't See That! Considering the Readability of Small Objects in Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, 25, 67-2574.

Lehman, S. M.; Elezovikj, S.; Ling, H.; Tan, C. C. ARCHIE++ : A Cloud-Enabled Framework for Conducting AR System Testing in the Wild. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, 21, 1, 221-116.

Fortmeier, D.; Mastmeyer, A.; Schröder, J.; Handels, H. A Virtual Reality System for PTCD Simulation Using Direct Visuo-Haptic Rendering of Partially Segmented Image Data. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2016, 35, 5, 366-366.

Rho, E.; Chan, K.; Varoy, E. J.; Giacaman, N. An Experiential Learning Approach to Learning Manual Communication Through a Virtual Reality Environment. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2020, 47, 7, 749-749.

Vankipuram, A.; Khanal, P.; Ashby, A.; Vankipuram, M.; Gupta, A.; DrummGurnee, D.; Josey, K.; Smith, M. Design and Development of a Virtual Reality Simulator for Advanced Cardiac Life Support Training. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2014, 14, 14, 781-1484.

Garcia Gaona, P. A.; Martin Moncunill, D.; Gordillo, K.; Gonzalez Crespo, R. Navigation and Visualization of Knowledge Organization Systems using Virtual Reality Glasses. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 29, 15, 2915-2920.

Zuo, W.; Mu, B.; Fang, H.; Wan, Y. User Experience: A Bibliometric Review of the Literature. *IEEE Access*, 2023, 12, 66-33126.

Ly, Z.; Yin, T.; Zhang, X.; Song, H.; Chen, G. Virtual Reality Smart City Based on WebVRGIS. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 10, 10, 1510-1024.

Han, D. T.; Suhail, M.; Ragan, E. D. Evaluating Remapped Physical Reach for Hand Interactions with Passive Haptics in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 14, 14, 671-1476.

Mayor, J.; Raya, L.; Sanchez, A. A Comparative Study of Virtual Reality Methods of Interaction and Locomotion Based on Presence, Cybersickness, and Usability. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2021, 15, 15, 421-1553.

Salimi, Z.; Ferguson-Pell, M. Development of Three Versions of a Wheelchair Ergometer for Curvilinear Manual Wheelchair Propulsion Using Virtual Reality. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2018, 12, 12, 1512-1222.

Colombo, C.; Blas, N. D.; Gkolias, I.; Lanzi, P. L.; Loiacono, D.; Stella, E. An Educational Experience to Raise Awareness About Space Debris. *IEEE Access*, 2020, 8, 85, 16285-16285178.

Porto Proenca, A.; Miranda, M.; Afonso Lamounier Jr, E.; Cardoso, A.; Notargiacomo, P. Systematic Review on Cognitive Engineering Applied to Critical Systems for Proposition of Evaluation Heuristics for Virtual Reality. *IEEE Latin America Transactions*, 2017, 20, 20, 2420-2429.

Park, S.; Suh, G.; Kim, S. -H.; Yang, H. -J.; Lee, G.; Kim, S. Effect of Auto-Erased Sketch Cue in Multiuser Surgical Planning Virtual Reality Collaboration System

Nwagu, Chukwuemeka, Alaa AlSlaity, Rita Orji. EEG-Based Brain-Computer Interactions in Immersive Virtual and Augmented Reality: A Systematic Review. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, New York, NY, USA, vol. 7, no. EICS, p. 174, June 2023.

Mcgill, Mark, Aidan Kehoe, Euan Freeman, Stephen Brewster. Expanding the Bounds of Seated Virtual Workspaces. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, New York, NY, USA, vol. 27, no. 3, p. 13, May 2020.

Li, Feng, Jiayi Zhao, Huan Yang, Dongxiao Yu, Yuanfeng Zhou, Yiran Shen. VibHead: An Authentication Scheme for Smart Headsets through Vibration. *ACM Trans. Sen. Netw.*, New York, NY, USA, Just Accepted, Aug 2023.

Liu, Zongjian, Jieling He, Jianjiang Feng, Jie Zhou. PrinType: Text Entry via Fingerprint Recognition. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, New York, NY, USA, vol. 6, no. 4, p. 174, Jan 2023.

Tomlein, Matúš, Kaj Grønbaek. Augmented Reality Supported Modeling of Industrial Systems to Infer Software Configuration. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, New York, NY, USA, vol. 2, no. EICS, p. 5, Jun 2018.

Choi, Young Mi. Applying Tangible Augmented Reality for Product Usability Assessment. *J. Usability Studies*, Bloomingdale, IL, vol. 14, no. 4, p. 187-200, Aug 2019.

Chiossi, Francesco, Thomas Kosch, Luca Menghini, Steeven Villa, Sven Mayer. SensCon: Embedding Physiological Sensing into Virtual Reality Controllers. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, New York, NY, USA, vol. 7, no. MHCI, p. 223, Sep 2023.

Speicher, Marco, Sebastian Cucerca, Antonio Krüger. VRShop: A Mobile Interactive Virtual Reality Shopping Environment Combining the Benefits of On- and Offline Shopping. Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., New York, NY, USA, vol. 1, no. 3, p. 102, Sep 2017.

Lee, Lik Hang, Kit Yung Lam, Tong Li, Tristan Braud, Xiang Su, Pan Hui. Quadmetric Optimized Thumb-to-Finger Interaction for Force Assisted One-Handed Text Entry on Mobile Headsets. Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., New York, NY, USA, vol. 3, no. 3, p. 94, Sep 2019.

Gomes, Carlos, Tiago Guedes, Augusto Esteves. A First Exploration on the Use of Head-Mounted Augmented Reality in the Context of the Portuguese Military. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., New York, NY, USA, vol. 7, no. MHCI, p. 192, Sep 2023.

Marques, Bernardo, João Alves, Miguel Neves, Inês Justo, André Santos, Raquel Rainho, Rafael Maio, Dany Costa, Carlos Ferreira, Paulo Dias, Beatriz Sousa Santos. Interaction with Virtual Content Using Augmented Reality: A User Study in Assembly Procedures. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., New York, NY, USA, vol. 4, no. ISS, p. 196, Nov 2020.

Kiaghadi, Ali, Pan Hu, Jeremy Gummesson, Soha Rostaminia, Deepak Ganesan. Continuous Measurement of Interactions with the Physical World with a Wrist-Worn Backscatter Reader. ACM Trans. Internet Things, New York, NY, USA, vol. 1, no. 2, p. 7, May 2020.

Mittmann, Gloria, Adam Barnard, Ina Krammer, Diogo Martins, João Dias. LINA - A Social Augmented Reality Game around Mental Health, Supporting Real-World Connection and Sense of Belonging for Early Adolescents. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., New York, NY, USA, vol. 6, no. CHI PLAY, pp. 242, Oct 2022.

Clark, Meghan, Mark W. Newman, Prabal Dutta. ARtificate: One-Shot Interactions with Intelligent Assistants in Unfamiliar Smart Spaces Using Augmented Reality. Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., New York, NY, USA, vol. 6, no. 1, pp. 7, Mar 2022.

Pratisto, Eko Harry, Nik Thompson, Vidyasagar Potdar. Virtual Reality at a Prehistoric Museum: Exploring the Influence of System Quality and Personality on User Intentions. J. Comput. Cult. Herit., New York, NY, USA, vol. 16, no. 2, pp. 33, Jun 2023.

Chan, Wesley P., Geoffrey Hanks, Maram Sakr, Haomiao Zhang, Tiger Zuo, H. F. Machiel van der Loos, Elizabeth Croft. Design and Evaluation of an Augmented Reality Head-Mounted Display Interface for Human Robot Teams Collaborating in Physically Shared Manufacturing Tasks. J. Hum.-Robot Interact., New York, NY, USA, vol. 11, no. 3, pp. 31, Jul 2022.

Funke, Jana Francesca, Anja Schikorr, Sukran Karaosmanoglu, Teresa Hirzle, Frank Steinicke, Enrico Rukzio. Tiles to Move: Investigating Tile-Based Locomotion for Virtual Reality. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., New York, NY, USA, vol. 7, no. CHI PLAY, pp. 414, Oct 2023.

Serpi, Matteo, Alessandro Carcangiu, Alessio Murru, Lucio Davide Spano. Web5VR: A Flexible Framework for Integrating Virtual Reality Input and Output Devices on the Web. Proc. ACM Hum.-Comput. Interact., New York, NY, USA, vol. 2, no. EICS, pp. 4, Jun 2018.

Harms, Patrick. Automated Usability Evaluation of Virtual Reality Applications. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., New York, NY, USA, vol. 26, no. 3, pp. 14, Apr 2019.

Wee, Tan Kiat, Eduardo Cuervo, Rajesh Balan. FocusVR: Effective & Usable VR Display Power Management. Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol., New York, NY, USA, vol. 2, no. 3, pp. 142, Sep 2018.