

Capítulo

3

Avaliação da Usabilidade e da Experiência do Usuário em Realidade Virtual e Aumentada

Thiago P. de Campos^{1,2}, Saul Delabrida³ Natasha M. C. Valentim¹

¹PPGInf / Universidade Federal do Paraná (UFPR)

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

³DECOM / Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

thiago.tpc@gmail.com, saul@sdelabrida.com, natasha_costa16@yahoo.com.br

Abstract

This chapter addresses the usability and user experience (UX) assessment of Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) technologies, highlighting their specificities and challenges. AR and VR offer immersive experiences that integrate virtual elements into the real world or create complete digital environments. The text explores fundamental concepts such as immersion, presence, and technical factors that shape UX, in addition to discussing evaluation methods such as user testing, expert inspections, and questionnaires, adapted for immersive systems. Challenges such as motion sickness and device variability are presented, as well as practices for planning and executing user tests. The chapter proposes combining quantitative and qualitative methods to better assess user experience and improve immersive solutions.

Resumo

Este capítulo aborda a avaliação de usabilidade e experiência do usuário (UX) em tecnologias de Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV), destacando suas especificidades e desafios. RA e RV oferecem experiências imersivas que integram elementos virtuais ao mundo real ou criam ambientes digitais completos. O texto explora conceitos fundamentais, como imersão, presença e fatores técnicos que moldam a UX, além de discutir métodos de avaliação, como testes com usuários, inspeções por especialistas e questionários, adaptados para sistemas imersivos. São apresentados desafios como a doença do movimento e a variabilidade de dispositivos, assim como práticas para planejamento e execução de testes com usuários. O capítulo propõe combinar métodos quantitativos e qualitativos para avaliar melhor a experiência dos usuários e aprimorar soluções imersivas.

3.1. Introdução

Com o avanço acelerado das tecnologias imersivas, a Realidade Aumentada (RA) e a Realidade Virtual (RV) tornaram-se ferramentas cada vez mais relevantes em uma ampla gama de setores, desde entretenimento até educação, saúde e indústria. Ambas as tecnologias oferecem novos paradigmas de interação, proporcionando experiências envolventes e altamente interativas, onde os usuários podem interagir com elementos virtuais no mundo real ou serem transportados para ambientes totalmente digitais. Essas inovações, embora poderosas, trazem consigo desafios relacionados à usabilidade e à experiência do usuário (*User eXperience*, UX).

Avaliar adequadamente a usabilidade e a UX em ambientes de RA e RV é essencial para garantir que essas soluções sejam eficientes, acessíveis e agradáveis. No entanto, os métodos tradicionais de avaliação de interfaces nem sempre são suficientes para lidar com as especificidades das interações em RA e RV, que envolvem novos tipos de dispositivos, formas de interação e a necessidade de captar dimensões como imersão e presença. Neste capítulo, exploramos os conceitos fundamentais de RA e RV, a relação entre usabilidade e UX nesses contextos, os métodos e desafios para sua avaliação, e sugerimos um processo detalhado para conduzir testes com usuários, adaptado às particularidades dessas tecnologias.

3.2. Introdução à Realidade Aumentada e Realidade Virtual

A RA e RV revolucionam como os seres humanos interagem com ambientes digitais, oferecendo experiências imersivas e interativas. Enquanto a RV cria ambientes totalmente digitais, nos quais os usuários são transportados para realidades sintéticas, a RA sobrepõe elementos virtuais ao ambiente físico em tempo real, permitindo que ambos coexistam. Cada uma dessas tecnologias oferece distintas possibilidades de interação e é amplamente utilizada em diferentes setores, como educação, entretenimento, saúde e indústria.

3.2.1. Definição de Realidade Aumentada

A RA pode ser definida como um sistema interativo que combina o mundo real com elementos virtuais gerados por computador, proporcionando uma experiência visual e interativa em tempo real [Azuma et al. 2001]. A principal característica da RA é a capacidade de alinhar e integrar esses elementos virtuais precisamente no ambiente físico, criando uma percepção de que os objetos digitais fazem parte do mundo real conforme apresentado por [Milgram and Kishino 1994]. Essa tecnologia é amplamente aplicada em dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*, além de *smartglasses* e *headsets* dedicados, permitindo que os usuários interajam com informações digitais de maneira intuitiva e natural.

Um exemplo notável da aplicação de RA é o uso de filtros interativos em aplicativos de redes sociais, onde o ambiente físico do usuário é ampliado com sobreposições gráficas, criando uma interação única entre o virtual e o real. Além disso, a RA tem sido amplamente utilizada em áreas como a educação e o marketing, oferecendo soluções que aumentam o engajamento e a compreensão dos usuários [Cipresso et al. 2018].

3.2.2. Definição de Realidade Virtual

A RV, por outro lado, é uma tecnologia que proporciona uma imersão completa em um ambiente digital, eliminando a percepção do mundo real. Em ambientes de RV, o usuário é colocado em um cenário totalmente sintético, que responde em tempo real às suas ações [Burdea and Coiffet 2024]. Isso cria uma forte sensação de presença, na qual os usuários sentem que estão fisicamente presentes no ambiente virtual, um conceito conhecido como “telepresença” [Slater and Wilbur 1997].

A RV é frequentemente utilizada em jogos, simuladores de treinamento e aplicações educacionais, proporcionando experiências intensas e realistas que seriam difíceis de replicar no mundo físico. Por exemplo, simuladores de voo e de cirurgias médicas permitem que os usuários pratiquem em ambientes controlados e seguros, melhorando suas habilidades sem os riscos envolvidos em atividades reais.

3.2.3. Diferenças entre RA e RV

Embora RA e RV compartilhem o objetivo de proporcionar experiências digitais imersivas, suas abordagens e impactos no usuário diferem significativamente. A RA complementa o mundo físico ao adicionar informações digitais, enquanto a RV substitui completamente o ambiente físico por um cenário digital. Na RA, o usuário continua ciente do mundo ao seu redor, pois elementos digitais são sobrepostos à realidade. Na RV, no entanto, o ambiente físico é totalmente substituído, transportando o usuário para um ambiente virtual que pode ou não se assemelhar à realidade.

A distinção entre RA e RV é importante na escolha de uma aplicação para determinado uso. Por exemplo, na educação, a RA pode ser usada para enriquecer o aprendizado com informações adicionais em tempo real [Sahin et al. 2018, Singh et al. 2023], como no estudo de anatomia, onde modelos 3D podem ser sobrepostos ao corpo humano para uma melhor compreensão. Por outro lado, a RV pode ser mais eficaz em simulações onde é necessário criar um ambiente completamente controlado e imersivo, como em treinamentos militares ou médicos [Elliman et al. 2016, Basdogan et al. 2007].

3.2.4. Realidade Misturada e o Contínuo de Milgram

Entre os conceitos de RA e RV, existe a Realidade Misturada (RM), ou Realidade Mista, uma tecnologia que combina de forma mais intensa elementos virtuais e físicos, permitindo uma integração ainda mais profunda entre o digital e o real. De acordo com Milgram e Kishino [1994], a RM se encontra em um ponto intermediário no “Contínuo de Realidade-Virtualidade” (Figura 3.1), que varia do ambiente completamente real ao ambiente completamente virtual. A RM permite que o usuário interaja com objetos digitais como se fossem parte integrante do ambiente físico, criando experiências altamente interativas e imersivas [Parveau and Adda 2018].

Esse contínuo descreve as várias formas de integração entre os mundos físico e virtual, destacando como as tecnologias de RA, RM e RV podem ser usadas em diferentes graus para criar experiências digitais que variam de uma simples sobreposição de informações à imersão total em um ambiente virtual.

Novas interpretações das realidades digitalizadas atualizam o modelo de Milgram

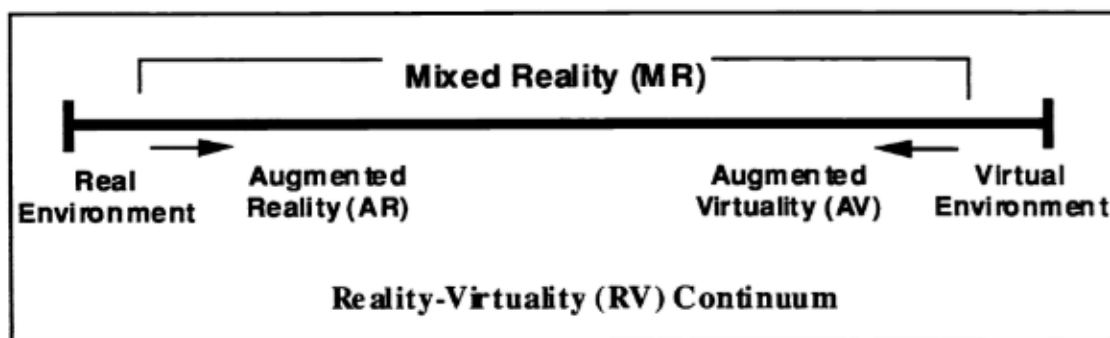


Figura 3.1. Continuum de Milgram [Milgram et al. 1995]

Descrição da Imagem: O diagrama apresenta o “Reality-Virtuality (RV) Continuum” (continuum de realidade-virtualidade), representado por uma linha horizontal com extremidades opostas. À esquerda, encontra-se o ponto rotulado como “Real Environment” (Ambiente Real), indicando o mundo físico, completamente real. À direita, está o ponto chamado “Virtual Environment” (Ambiente Virtual), representando um ambiente inteiramente digital ou virtual. Entre esses dois extremos, há dois conceitos intermediários: “Augmented Reality (AR)” (Realidade Aumentada, RA), localizado próximo ao ambiente real, onde elementos virtuais são sobrepostos ao mundo real e; “Augmented Virtuality (AV)” (Virtualidade Aumentada, VA), próximo ao ambiente virtual, onde elementos do mundo real são inseridos em um ambiente virtual. Acima da linha horizontal, o termo “Mixed Reality (MR)” (Realidade Mista, RM) abrange as regiões intermediárias entre RA e VA. O diagrama mostra uma transição contínua do ambiente real ao virtual, representando diferentes níveis de integração entre elementos reais e virtuais.

e Kishino [1994], destacando o papel da experiência e percepção do usuário em vez de se basear apenas no tipo de tecnologia. Skarbez et al. [2021] propõem que toda RV, em algum nível, é uma forma de RM, pois mesmo em ambientes virtuais imersivos, estímulos reais, como percepções corporais internas, continuam a influenciar a experiência (Figura 3.2).

Já Rauschnabel et al. [2022] apresentam um modelo com dois contínuos (Figura 3.3): a RA, que varia de realidade assistida à misturada, e a RV, que vai de experiências atomísticas a holísticas, redefinindo a XR como “XReality”, adaptável a diferentes graus de imersão e interação. Além disso, Rauschnabel et al. [2022] destacam que a RA se adequa melhor a interações sociais contínuas e causa menos desconforto por movimento (*motion sickness*), enquanto a RV oferece experiências mais temporárias, geralmente aplicadas em locais específicos. Os autores abordam ainda o conceito de realidade diminuída, em que elementos reais são ocultados para intensificar a experiência virtual, expandindo o entendimento das possibilidades de integração entre mundos físico e digital.

Por fim, a UX em RA, RM e RV é moldada por dimensões fundamentais como Extensão do Conhecimento de Mundo (ECM), Imersão e Coerência, que juntas sustentam a sensação de presença [Skarbez et al. 2021b, Skarbez et al. 2022]. ECM reflete a capacidade do sistema de entender o ambiente físico; Imersão, a profundidade das interações sensoriais e motoras; e Coerência, a consistência dessas interações. A integração dessas dimensões contribui para criar experiências digitais que vão além da separação entre

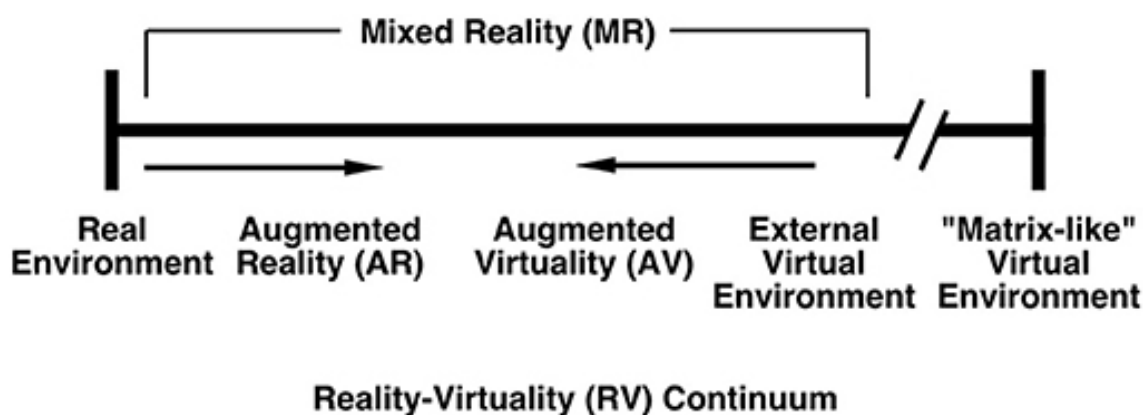


Figura 3.2. Continuum de Milgram atualizado [Skarbez et al. 2021b].

Descrição da Imagem: O diagrama apresenta o “Reality-Virtuality (RV) Continuum” (continuum de realidade-virtualidade), expandindo o conceito original de Milgram. A figura consiste em uma linha horizontal com extremidades opostas: à esquerda, está o rótulo “Real Environment” (Ambiente Real), representando o mundo físico, completamente real e, à direita está o rótulo “Matrix-like Virtual Environment”, que sugere um ambiente virtual avançado, possivelmente indistinguível da realidade, como no filme Matrix [Wachowski and Wachowski 1999]. À medida que avançamos do ambiente real para a direita, aparecem: “Augmented Reality (AR)” (Realidade Aumentada, RA), onde elementos virtuais são sobrepostos ao ambiente real; “Augmented Virtuality (AV)” (Virtualidade Aumentada, VA), onde elementos do mundo real são integrados ao ambiente virtual e “External Virtual Environment” (Ambiente Virtual Externo) entre VA e o ambiente virtual “matrix-like”. “Mixed Reality (MR)” (Realidade Mista, RM) é representada como uma faixa que cobre as regiões entre RA e Ambiente Virtual Externo, indicando uma combinação entre elementos reais e virtuais. Um destaque visual nesta versão é a ruptura na linha horizontal (representada por barras diagonais) entre o ambiente virtual externo e o ambiente virtual “matrix-like”.

físico e virtual, conectando ambos os mundos de forma fluida e convincente.

3.2.5. Aplicações e Potencial Futuro

O potencial da RA, RV e RM vai além do entretenimento e da educação. Áreas como a saúde, a indústria e o varejo têm explorado essas tecnologias para melhorar processos, aumentar a segurança e proporcionar experiências mais envolventes.

Na indústria, por exemplo, a RA é utilizada para auxiliar em processos de manutenção e montagem, permitindo que trabalhadores visualizem informações críticas diretamente em seu campo de visão [Havard et al. 2021]. RA também pode ser aplicada em exposições e museus [Spadoni et al. 2022, Chen and Mokmin 2024], tarefas de navegação e orientação geográfica [Lu et al. 2024] e apoio a procedimentos médicos [Touati et al. 2021, Li et al. 2024], por exemplo.

Já a RV tem sido fundamental em treinamentos e simulações, proporcionando ambientes de aprendizado controlados e realistas. RV também pode ser usada para o propósito de turismo virtual [Ciliberti et al. 2023], design e prototipagem de produtos

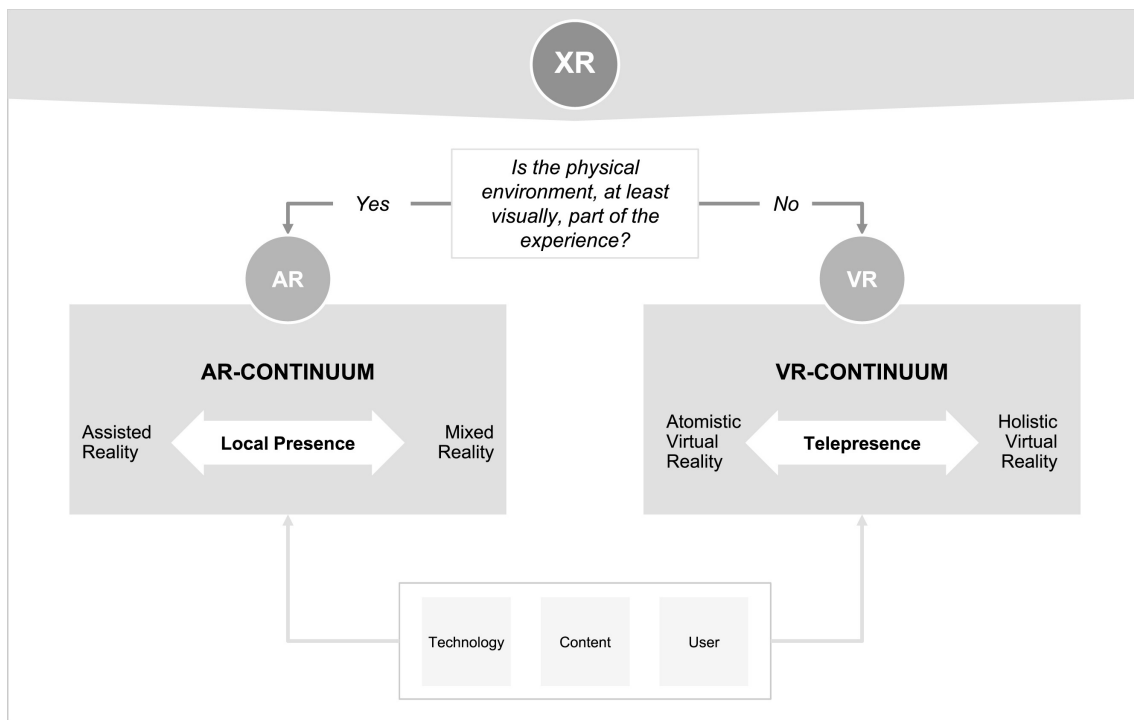


Figura 3.3. XReality (XR) [Rauschnabel et al. 2022].

Descrição da Imagem: O diagrama é organizado em seções para explicar dois diferentes contínuos para “XR”. Topo: Uma faixa cinza com o texto “XR” em destaque no centro. Há uma caixa com uma pergunta central: “Is the physical environment, at least visually, part of the experience?” (O ambiente físico, pelo menos visualmente, faz parte da experiência?). Setas indicam duas respostas possíveis: “Yes” (Sim), apontando para um círculo rotulado como “AR” no lado esquerdo. “No” (Não), apontando para um círculo rotulado como “VR” no lado direito. No lado esquerdo, logo abaixo do círculo “AR” há uma área retangular cinza com o título “AR-CONTINUUM”. Dentro dela, uma seta horizontal dupla, com duas extremidades. A seta possui o rótulo “Local Presence” (Presença Local) com as extremidades “Assisted Reality” (Realidade Assistida), na esquerda, e “Mixed Reality” (Realidade Mista), na direita. No lado direito, logo abaixo do círculo “VR” há uma área retangular cinza com o título “VR-CONTINUUM”. Dentro dela, uma seta horizontal dupla, com duas extremidades. A seta possui o rótulo “Telepresence” (Telepresença) com as extremidades “Atomistic Virtual Reality” (Realidade Virtual Atomística), na esquerda, e “Holistic Virtual Reality” (Realidade Virtual Holística), na direita. Na parte inferior do diagrama, três caixas representam os principais elementos envolvidos na XR: Technology (Tecnologia), Content (Conteúdo) e User (Usuário) e elas estão ligadas às duas áreas de cor cinza, AR e VR Continuum.

[Min et al. 2019] ou de projetos de engenharia e arquitetura [Strzałkowski et al. 2024, R et al. 2023], ou ainda em atividades de reabilitação e terapia [Pereira et al. 2020, Jha et al. 2024], por exemplo.

Com o avanço das tecnologias e a popularização de dispositivos mais acessíveis, espera-se que o uso de RA, RV e RM continue a crescer, trazendo inovações e soluções

cada vez mais imersivas e interativas.

3.3. Usabilidade e Experiência do Usuário em RA e RV

Dando continuidade à exploração dos conceitos fundamentais, é importante compreender como essas tecnologias afetam diretamente a interação do usuário com os sistemas e o ambiente. Para avaliar a qualidade dessa interação, torna-se essencial o estudo de dois conceitos centrais: a usabilidade e a experiência do usuário (UX). Ambos são críticos para garantir que as soluções em RA e RV sejam eficazes, eficientes e agradáveis para quem as utiliza.

3.3.1. Definição de Usabilidade

Usabilidade refere-se à facilidade de uso de um sistema por parte dos usuários, com foco em três aspectos principais: eficácia, eficiência e satisfação. Conforme as normas ISO 9241-11 e ISO 9241-210, a usabilidade é a capacidade de um produto ser utilizado por usuários específicos para alcançar objetivos definidos de forma eficaz, eficiente e com satisfação, em um determinado contexto de uso [ISO 2018, ISO 2019]. Na prática, a usabilidade visa garantir que o sistema ou produto atenda às necessidades do usuário com o mínimo de esforço e máxima produtividade.

Em soluções de RA e RV, a usabilidade ganha um papel ainda mais importante devido à natureza imersiva dessas tecnologias. A maneira como o usuário interage com o ambiente virtual ou aumentado pode influenciar significativamente sua percepção de eficácia e controle sobre o sistema. Elementos como o tempo de resposta, a facilidade de interação com objetos virtuais e o conforto ao utilizar dispositivos de visualização, como *headsets*, são fatores críticos que influenciam a usabilidade nessas plataformas.

3.3.2. Definição de Experiência do Usuário

A UX vai além da usabilidade, abrangendo todos os aspectos da interação de uma pessoa com um produto ou sistema, desde o design até as respostas emocionais e psicológicas resultantes dessa interação [Hassenzahl 2011]. A UX considera não apenas a facilidade de uso de um sistema, mas também a satisfação e o prazer que o usuário sente ao utilizá-lo. Fatores como motivação, estética, percepção de valor e atratividade são componentes centrais da UX.

Em contextos de RA e RV, a UX é ainda mais complexa, por envolver a percepção de presença. Soluções em RA e RV devem conseguir oferecer uma UX positiva, equilibrando aspectos técnicos, como qualidade gráfica e interatividade, com fatores subjetivos, como o engajamento emocional e o prazer da experiência.

3.3.3. Dimensões da Usabilidade e da UX

A usabilidade em RA e RV pode ser avaliada por meio de diversas dimensões que buscam capturar diferentes aspectos da interação do usuário com o sistema. Entre as principais dimensões estão:

- **Eficácia:** Avalia se o usuário consegue realizar as tarefas propostas de maneira correta e completa. Em RA e RV, isso envolve a precisão dos movimentos e interações

do usuário com o ambiente digital.

- **Eficiência:** Refere-se ao tempo e esforço necessários para realizar as tarefas. Em soluções imersivas, a eficiência está fortemente ligada à rapidez de resposta do sistema.
- **Satisfação:** Mede em que grau a solução atende às expectativas do usuário. Em RA e RV, a satisfação pode ser impactada pela qualidade da imersão e pela fluidez das interações.
- **“Aprendibilidade” (*learnability*):** Em RA e RV, é fundamental que os usuários consigam aprender rapidamente como interagir com o sistema, especialmente em casos onde os gestos e controles diferem dos métodos de interação tradicionais.
- **Conforto:** O uso prolongado de dispositivos de RA e RV pode causar desconforto físico, como fadiga visual ou dor de cabeça. Avaliar o conforto é essencial para garantir uma experiência positiva a longo prazo [Cummings and Bailenson 2016].

Por outro lado, a UX em RA e RV inclui dimensões que abordam tanto os aspectos pragmáticos da interação quanto os hedônicos, ou seja, aqueles relacionados ao prazer e às emoções que o sistema proporciona. Hassenzal [2011] propõe um modelo de UX que inclui dimensões como:

- **Motivação:** Refere-se à capacidade do sistema de despertar o interesse e manter o usuário engajado.
- **Desejabilidade:** Avalia o quanto o usuário se sente atraído pelo sistema e como essa percepção influencia sua intenção de continuar usando a tecnologia.
- **Prazer e Diversão:** São dimensões que avaliam o quão agradável e divertida foi a experiência para o usuário, contribuindo para uma percepção positiva da tecnologia.

3.3.4. Imersão e Presença em RA e RV

Imersão é comumente entendida como o envolvimento profundo em uma atividade ou narrativa, que pode ser sensorial, cognitiva, emocional ou social [Murray 1998, Ryan 2010, Brown and Cairns 2004]. As diferentes formas de imersão proporcionam experiências diversas, desde o engajamento emocional e mental em histórias e atividades até a sensação física de presença [Murray 1998, Ryan 2010, Slater and Wilbur 1997, Calleja 2011]. Em RV e RA, Imersão e Presença são conceitos interligados e fundamentais para a qualidade da experiência. São conceitos discutidos em termos de objetividade e subjetividade [Slater and Wilbur 1997, Steuer 1992, Skarbez et al. 2017, Murphy and Skarbez 2022].

Imersão é a qualidade técnica de um sistema que gera a sensação de estar “imerso” em um ambiente virtual ou aumentado [Berkman and Akan 2019]. Na RV, a imersão depende de como o sistema envolve os sentidos do usuário, como visão, audição e tato, para criar uma experiência convincente [Steuer 1992], levando à telepresença. Quanto mais rica e interativa for a capacidade técnica do sistema, maior será a sensação de presença

(Figura 3.4). Ela é medida por fatores como campo de visão, fidelidade gráfica, interatividade e complexidade dos estímulos sensoriais [Rauschnabel et al. 2022]. Na RA, imersão é a capacidade de integração dos elementos virtuais ao ambiente físico, fazendo-os parecer parte do mundo real [Skarbez et al. 2021a]. A imersão impacta a usabilidade, ao promover um envolvimento profundo, facilitando a interação e aumentando o engajamento do usuário [Rauschnabel et al. 2022].

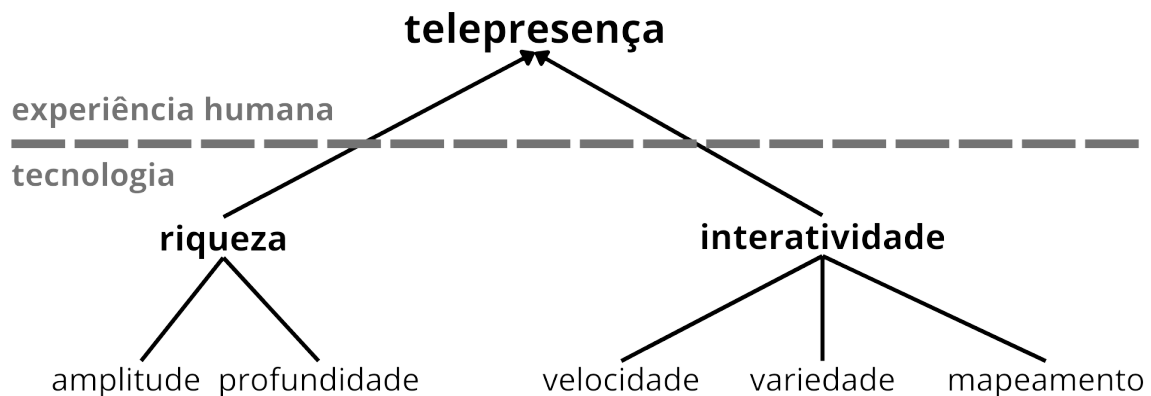


Figura 3.4. Variáveis tecnológicas que levam à telepresença (adaptado de Steuer [1992])

Descrição da Imagem: Há uma linha pontilhada horizontal separando dois aspectos: “experiência humana” (na parte superior) e “tecnologia” (na parte inferior). Estes conceitos estão escritos próximos à linha pontilhada, em cor cinza-claro. Outros conceitos são apresentados de maneira hierárquica. Na parte superior, a palavra “telepresença” é apresentada em negrito e centralizada. Na parte inferior, em um primeiro nível horizontal, há duas palavras: “riqueza” e “interatividade”, também em negrito. Uma seta liga cada uma delas à “telepresença” (da parte superior), cruzando a linha pontilhada. Significando que a riqueza e a interatividade da tecnologia levam à experiência humana da telepresença. Abaixo da palavra “riqueza”, são apresentadas as palavras “amplitude” e “profundidade”, com linhas que as conectam à riqueza, indicando serem componentes da riqueza. Do mesmo modo, abaixo de “interatividade”, estão as palavras “velocidade”, “variedade” e “mapeamento”, também ligadas por uma linha cada, à “interatividade”, indicando serem seus componentes.

A **Presença**, por sua vez, está relacionada à percepção subjetiva do usuário. Na RV, presença é a sensação de “estar lá”, onde o usuário se sente transportado para um ambiente virtual diferente do mundo real, um conceito chamado telepresença [Steuer 1992, Slater 1999]. Na RA, presença é a percepção de que os elementos virtuais estão integrados ao mundo real, como se realmente existissem ali [Skarbez et al. 2022]. A sensação de presença é influenciada pela credibilidade do ambiente ou elementos virtuais, o nível de envolvimento e a capacidade de interação natural do usuário [Murphy and Skarbez 2022, Skarbez et al. 2017]. A presença aumenta a satisfação, ao oferecer um ambiente virtual ou aumentado autêntico e responsivo [Steuer 1992, Skarbez et al. 2017].

Avaliar a usabilidade e a UX em RA e RV, considerando imersão e presença, ajuda a identificar melhorias que tornam os ambientes mais cativantes e realistas e é, portanto, um processo essencial para o desenvolvimento de soluções que proporcionem experiências agradáveis e eficazes.

3.4. Métodos e Desafios de Avaliação de Usabilidade e UX em RA e RV

Avaliar a usabilidade e a UX em ambientes imersivos requer abordagens que vão além dos métodos tradicionais, devido às particularidades da interação com esses sistemas. Nesta seção, discutiremos os principais desafios enfrentados ao avaliar a usabilidade e UX em RA e RV, bem como os métodos disponíveis para essa avaliação.

Tradicionalmente, os métodos de avaliação de usabilidade e UX costumam ser classificados em testes com usuários, inspeção por especialistas, feedback de usuários e modelagem ou simulação [Ivory and Hearst 2001, Roto et al. 2009]. Sendo os três primeiros, os métodos mais comuns.

3.4.1. Testes com Usuários

Os testes com usuários oferecem informações detalhadas sobre a experiência real dos usuários, permitindo a coleta de diversos tipos de dados. Além da observação do comportamento, é possível registrar informações sobre o que o usuário está enxergando e ouvindo, bem como detalhes da interação, movimento e posicionamento, e dados fisiológicos. Informações relativas à interação, como ícones, menus, objetos e outros elementos de interface acessados, incluindo tempo, frequência e quantidade, também podem ser coletadas utilizando o próprio sistema testado ou *plugins* embutidos.

Sensores integrados ao equipamento ou estrategicamente posicionados no ambiente permitem o registro de movimentos da cabeça, mãos e corpo, incluindo gestos. Movimentos da cabeça e do corpo são essenciais para entender a interação dos usuários com o ambiente, mas podem exigir configurações específicas no sistema para serem capturados corretamente [Satkowski et al. 2021]. Dados fisiológicos, como batimentos cardíacos, rastreamento ocular, frequência de piscadas, dilatação das pupilas e variações de temperatura corporal, podem ser obtidos por meio de dispositivos vestíveis, câmeras e sensores de *biofeedback*.

Nos testes de RA e RV, é necessário considerar o ambiente físico onde o teste ocorre. Por exemplo, um ambiente real muito quente pode prejudicar a sensação de presença em um cenário de RV que simula uma visita à Antártida. Em sistemas de RA, o contexto físico também pode influenciar a experiência, devido às condições de iluminação, interferências externas ou à presença de móveis e pessoas no local.

Observar em tempo real a experiência do usuário pode ser desafiador, especialmente em RA e RV, devido à dificuldade de acompanhar sua visão em uma tela separada, aumentando a complexidade e o custo da configuração dos testes. Além disso, monitorar a visão do usuário ou capturar certos dados pode demandar alto processamento do sistema, impactando o desempenho da solução testada. Fatores ambientais, como a iluminação, podem afetar a precisão dos dados registrados. Outra desvantagem dos testes com usuários é que eles exigem tempo, recursos e planejamento cuidadoso para simular adequadamente o ambiente de uso. Manter a consistência do ambiente físico em diferentes sessões de teste e lidar com a variabilidade de dispositivos são desafios adicionais a serem considerados [Derby and Chaparro 2021].

Outro aspecto importante é o uso do protocolo Think Aloud, no qual os usuários verbalizam seus pensamentos enquanto realizam as tarefas. Embora esse método seja útil

para identificar problemas de usabilidade, ele pode interferir na imersão dos participantes em ambientes de RA e RV, devendo, portanto, ser aplicado com cautela.

3.4.2. Inspeção por Especialistas

A inspeção por especialistas é um método mais rápido e econômico para identificar problemas de usabilidade, pois não requer participação de usuários finais. Os especialistas avaliam o sistema com base em heurísticas de usabilidade ou listas de verificação específicas. No entanto, esse método pode falhar em capturar a experiência subjetiva do usuário, especialmente em aspectos como diversão e presença.

Tradicionalmente, as heurísticas de usabilidade, como as propostas por Nielsen [2012], não são suficientes para ambientes imersivos de RA e RV. É necessário adaptar ou desenvolver novas heurísticas que considerem a especificidade dessas tecnologias, como a presença de interações naturais, o uso do espaço tridimensional e a integração entre o real e o virtual [Derby and Chaparro 2021].

Outra dificuldade é realizar a tarefa de inspecionar o ambiente imersivo sem estar experienciando-o ao mesmo tempo. Por exemplo, ao inspecionar um aplicativo de dispositivo móvel ou software de computador, o especialista consegue enxergar e manipular o sistema em uma tela enquanto registra problemas em uma planilha ou caderno. Para inspecionar ambientes imersivos, entretanto, ele precisa recorrer à sua memória ou frequentemente entrar/sair do ambiente para realizar a inspeção, e isso prejudica o resultado.

3.4.3. Modelagem Analítica e Simulação

A modelagem analítica pode ser utilizada para prever problemas de usabilidade em sistemas. Essa abordagem envolve o uso de modelos teóricos ou simulações computacionais para antecipar o comportamento do usuário e identificar potenciais barreiras de usabilidade [Ivory and Hearst 2001].

Em sistemas complexos de RA e RV, a simulação da interação pode ajudar a prever como os usuários irão responder a diferentes estímulos visuais e interativos, permitindo ajustes antes mesmo da realização de testes com usuários. Embora promissor, esse método ainda enfrenta desafios, como a necessidade de modelos precisos que capturem toda a complexidade das interações imersivas.

Um exemplo prático dessa abordagem foi apresentado por Sutcliffe e Kaur [2000], que desenvolveram um método de avaliação de interfaces de RV baseado em uma extensão do modelo de ação de Norman. Por um processo de *walkthrough* analítico, o estudo propôs a simulação de ciclos de interação com tarefas específicas em um ambiente virtual, identificando problemas de usabilidade como desorientação espacial e dificuldades na manipulação de objetos. A aplicação desse modelo permitiu prever e diagnosticar barreiras de interação antes da implementação completa do sistema, demonstrando a eficácia da modelagem teórica para antecipar comportamentos de usuários em ambientes imersivos.

3.4.4. Feedback de Usuários

Os feedbacks de usuários são realizados principalmente por meio do preenchimento de questionários ou realização de entrevistas e são ótimos para coletar dados subjetivos sobre

a percepção dos usuários em relação à satisfação, conforto, opiniões e sentimentos, por exemplo. Em relação ao uso de questionários, costuma-se usar escalas Likert, de diferencial semântico, numéricas ou mesmo questões com respostas abertas. As escalas facilitam a análise quantitativa dos dados, enquanto as respostas abertas e entrevistas demandarão análises qualitativas.

Existem inúmeros questionários para avaliar a usabilidade e a UX de sistemas interativos, como o System Usability Scale (SUS) [Brooke 1996], o Usefulness, Satisfaction and Ease of Use (USE) [Lund 2001], o User Experience Questionnaire (UEQ) [Laugwitz et al. 2008] e o NASA Task Load Index (NASA-TLX) [Hart and Staveland 1988]. Entretanto, estes questionários não foram projetados para experiências RA/RV e podem deixar passar algumas dimensões importantes para a avaliação.

Alguns questionários foram criados para avaliar algumas dimensões da experiência em RA e RV. Alguns avaliam apenas a doença do movimento, como o Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [Kennedy et al. 1993] e o Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ) [Gianaros et al. 2001]. Outros focam nas dimensões de imersão e presença, como Slater-Usoh-Steed Inventory (SUS) [Slater et al. 1994], Presence Questionnaire (PQ) [Witmer and Singer 1998], Immersive Tendencies Questionnaire (ITQ) [Witmer and Singer 1998], o Measurement, Effects, Conditions - Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ) [Vorderer et al. 2004] e o Igroup Presence Questionnaire (IPQ) [Schubert et al. 2001].

Há questionários criados para avaliar soluções em RV ou RA de forma mais abrangente, tentando cobrir o máximo de aspectos relacionados, como o VR Usability Diagnostic Tool (VRUSE) [Kalawsky 1999], o índice de Experiência de Usuário em Realidade Virtual (iUXRV) [Cheiran et al. 2022], o Handheld Augmented Reality Usability Scale (HARUS) [Santos et al. 2014] e o Usability and User Experience Evaluation in Touchable Hologram (UUXE-ToH) [Campos et al. 2024, Prado De Campos et al. 2024].

A avaliação por feedback de usuários deve considerar que as respostas podem ser influenciadas por fatores emocionais ou pela última parte da experiência, resultando em vieses de recência [Hartson and Pyla 2012]. O efeito da novidade e a complexidade da tecnologia podem resultar em respostas exageradamente positivas ou negativas [Sharples et al. 2008]. Com relação aos questionários, os usuários podem ter dificuldades em compreender termos específicos. Além disso, a falta de padronização nas métricas, principalmente quando se usam questionários *ad hoc*, cria um desafio significativo para comparar resultados entre diferentes pesquisas [Merino et al. 2020]. Incorporar os questionários no próprio ambiente RA/RV pode interromper a experiência imersiva e ser desconfortável, afetando a precisão das respostas [Cummings and Bailenson 2016].

3.4.5. Outros Desafios de Avaliação

A avaliação da usabilidade e da UX em RA e RV apresenta desafios únicos em relação a outras tecnologias interativas. Esses desafios surgem principalmente devido à complexidade das interações imersivas, à variedade de dispositivos e à natureza subjetiva da experiência dos usuários.

Interação Imersiva: Em ambientes de RA e RV, os usuários interagem de ma-

neira imersiva com objetos virtuais, o que pode envolver gestos manuais, movimentos de cabeça, controle por voz e até a movimentação física no espaço. Essa riqueza de interações, embora positiva para a experiência do usuário, dificulta capturar e medir objetivamente a usabilidade e a UX. O uso de diferentes dispositivos de interação, como controladores manuais ou sistemas de rastreamento ocular, também pode introduzir variações significativas na maneira como os usuários interagem com o ambiente [Merino et al. 2020].

Imersão e Presença: A imersão e a presença, como discutido na seção anterior, são fatores críticos para a experiência do usuário em RA e RV. No entanto, avaliá-los de maneira quantitativa pode ser desafiador, principalmente em relação à presença, uma vez que são experiências subjetivas e podem variar significativamente entre os usuários.

Motion Sickness (Cinetose): A cinetose induzida virtualmente, também conhecida como *cybersickness*, é um desafio comum em experiências de RV. Ela ocorre quando há um descompasso entre os estímulos visuais e o que o corpo do usuário percebe em termos de movimento e equilíbrio. Esse desconforto pode afetar significativamente a experiência e, conseqüentemente, a usabilidade e UX do sistema [Bos 2017]. Em contextos de avaliação, é importante monitorar e mitigar a ocorrência de cinetose, por poder influenciar negativamente os resultados.

Varição entre Dispositivos: RA e RV envolvem uma ampla gama de dispositivos, desde *smartphones* e *tablets* até *headsets* sofisticados, como o Microsoft HoloLens e o Meta Quest. Cada dispositivo oferece diferentes níveis de qualidade visual, fidelidade de interação e conforto, o que pode resultar em variações na experiência do usuário [Derby and Chaparro 2021]. Além disso, a qualidade do hardware, como a resolução das telas e a taxa de atualização, pode impactar diretamente na imersão e no desconforto físico dos usuários.

3.4.6. Considerações Finais sobre Métodos de Avaliação

A escolha do método de avaliação depende diretamente do objetivo do estudo e dos recursos disponíveis. Para uma avaliação completa de usabilidade e UX em ambientes de RA e RV, a combinação de vários métodos, como testes com usuários, questionários específicos e inspeções por especialistas, é essencial [Pranoto et al. 2017, Rhiu et al. 2020, Zhang et al. 2020]. A utilização de métricas objetivas (como tempo de tarefa e precisão) junto a avaliações subjetivas (via questionários como NASA-TLX e SSQ) proporciona uma visão mais holística da interação do usuário com o sistema [Frata Furlan Peres et al. 2024]. Essa abordagem multidimensional é fundamental para capturar tanto os aspectos técnicos quanto as percepções e reações dos usuários, garantindo que o sistema não apenas funcione corretamente, mas também atenda de maneira eficaz e satisfatória às necessidades e expectativas dos usuários.

3.5. Processo de Avaliação com Usuários em RA e RV

Após discutir os métodos e desafios para a avaliação de usabilidade e UX em ambientes de RA e RV, é necessário detalhar o processo de avaliação com usuários, o qual é a base para coletar dados empíricos e entender como os usuários interagem e respondem às tecnologias imersivas. A seguir, exploraremos o processo de planejamento, preparação e execução de testes com usuários nesses ambientes, considerando as particularidades

envolvidas.

3.5.1. Planejamento e Preparação

A primeira etapa para a condução de uma avaliação eficaz é o planejamento. Este envolve definir o escopo do estudo, as questões de pesquisa, o público-alvo e os métodos que serão usados para coletar dados. Um planejamento cuidadoso é essencial para garantir que o processo de avaliação seja conduzido de forma a capturar as nuances da experiência dos usuários com essas tecnologias imersivas.

3.5.1.1. Escopo e Objetivos

Definir o escopo e os objetivos da avaliação é o ponto de partida. O escopo inclui o sistema ou solução a ser avaliado e as questões que a pesquisa pretende responder. Por exemplo, um estudo de avaliação de uma solução de RA pode focar em questões como a facilidade de navegação no ambiente aumentado ou o impacto dos elementos virtuais na compreensão de informações pelo usuário. Já um estudo com RV pode abordar aspectos como a sensação de presença e o conforto durante a utilização prolongada do sistema (Bowman et al., 2005; Slater, 2009).

É fundamental considerar como a integração entre o mundo real e o ambiente virtual afetará as métricas de usabilidade e UX. Questões como a precisão dos movimentos do usuário, a latência entre ações e respostas, e o nível de conforto proporcionado pelos dispositivos precisam ser incorporadas aos objetivos da avaliação.

3.5.1.2. Equipamentos e Configurações Técnicas

A escolha dos equipamentos a serem utilizados é um passo crucial no planejamento, especialmente devido à diversidade de dispositivos de RA e RV disponíveis no mercado. Para garantir a eficácia dos testes, é importante selecionar dispositivos que ofereçam uma experiência fluida e confortável aos participantes. Um fator a ser considerado é a taxa de atualização dos dispositivos de visualização, que deve ser de pelo menos 90 Hz para evitar atrasos perceptíveis que podem causar desconforto, como *motion sickness* (Kennedy et al., 1993).

Além disso, a resolução gráfica deve ser suficientemente alta para proporcionar uma experiência visual imersiva sem comprometer o desempenho do sistema. Em testes de RV, dispositivos como o Meta Quest 2 ou PlayStation VR2 são opções populares, enquanto na RA, *smartglasses* como o Microsoft HoloLens ou o Magic Leap 2 são amplamente utilizados.

3.5.1.3. Ambiente e Contexto de Uso

O ambiente onde a avaliação será realizada desempenha um papel importante, porque o contexto físico influencia diretamente a experiência do usuário. A iluminação, os ruídos ambientais e o espaço físico disponível devem ser cuidadosamente planejados para

garantir que a interação entre o real e o virtual ocorra adequadamente.

No caso da RA, o ambiente deve ser suficientemente variado para permitir que os usuários experimentem diferentes contextos, como ambientes internos e externos. Isso ajuda a avaliar como as condições físicas afetam a percepção dos elementos virtuais e a capacidade do usuário de interagir com eles de forma eficiente (Satkowski et al., 2021).

3.5.1.4. Métodos de Interação e Procedimentos

Os métodos de interação com o sistema devem ser definidos conforme as características do dispositivo e do sistema avaliados. Em RA e RV, os usuários podem interagir por meio de gestos manuais, movimentos da cabeça, comandos de voz ou controles manuais (*joystick*). A escolha do método de interação impacta diretamente a usabilidade e a UX, e deve ser considerada durante a preparação dos testes.

Outro ponto a ser considerado é o tipo de procedimento de experimentação, que pode seguir um formato *between-subjects* ou *within-subjects*. No primeiro, diferentes grupos de usuários testam diferentes condições, enquanto no segundo, os mesmos usuários testam todas as condições. Cada abordagem tem suas vantagens, mas em RA e RV, o método *within-subjects* pode ser interessante para avaliar como os usuários se adaptam ao ambiente imersivo ao longo do tempo.

3.5.1.5. Recrutamento de Participantes

O recrutamento de participantes deve seguir critérios específicos, considerando o público-alvo da solução. Fatores como experiência prévia com tecnologias imersivas, familiaridade com o tipo de interação e preferências pessoais podem influenciar os resultados e, portanto, devem ser bem documentados. Além disso, é importante garantir a diversidade na amostra, incluindo participantes de diferentes faixas etárias, gêneros e níveis de experiência com RA e RV.

Os critérios de inclusão e exclusão devem ser estabelecidos com antecedência. Por exemplo, pessoas suscetíveis à cinetose podem ser excluídas de testes prolongados de RV, uma vez que essa condição pode influenciar negativamente a experiência do usuário e os resultados do teste (Bos, 2017).

3.5.2. Execução e Coleta de Dados

Com o planejamento concluído, a próxima etapa é a execução dos testes e a coleta de dados. A execução precisa seguir um protocolo bem estruturado para garantir que todos os participantes passem pelas mesmas etapas e que os dados coletados sejam consistentes e comparáveis.

3.5.2.1. Estudo Piloto

Antes de iniciar a coleta de dados com todos os participantes, é recomendável realizar um estudo piloto com um grupo reduzido de usuários. Esse estudo possibilita validar os

procedimentos, testar os equipamentos e verificar se os métodos de coleta de dados estão funcionando conforme o esperado. Além disso, o piloto permite identificar problemas potenciais que podem afetar a qualidade dos dados, como falhas técnicas ou dificuldades na interação com o sistema.

3.5.2.2. Protocolos de Coleta de Dados

A coleta de dados em testes de usabilidade e UX em RA e RV pode envolver uma variedade de métodos, dependendo do que se pretende avaliar [Barbosa et al. 2021]. Alguns dos métodos mais comuns incluem:

Protocolo Think Aloud: Como mencionado anteriormente, esse protocolo pode ser usado para captar os pensamentos dos usuários enquanto interagem com o sistema [Ericsson and Simon 1993]. No entanto, em ambientes imersivos, esse método deve ser usado com cuidado para não interferir na experiência de imersão.

Gravações e Observações: Em RA e RV, é útil capturar tanto a visão do participante quanto a visão de um observador externo. Isso ajuda a entender melhor os movimentos do corpo e da cabeça, as interações com o ambiente e o comportamento do usuário durante a experiência.

Questionários Pós-Teste: Questionários aplicados logo após a conclusão da tarefa são uma maneira eficaz de coletar feedback sobre a experiência do usuário. É importante que esses questionários incluam itens que avaliem imersão, presença e satisfação com a interface.

Dados Fisiológicos: Em alguns casos, pode ser interessante monitorar dados fisiológicos, como batimentos cardíacos, movimentos oculares e temperatura corporal, para medir o nível de estresse ou imersão do usuário. Dispositivos de *biofeedback* e câmeras de rastreamento ocular são frequentemente usados para esse fim (Hart, 2006).

3.5.2.3. Materiais e Equipamentos Necessários

A preparação dos materiais e equipamentos para a execução do teste é uma etapa importante. Isso inclui garantir que todos os dispositivos estejam funcionando corretamente, com bateria suficiente para as sessões de teste, que os questionários estejam prontos para serem aplicados e que o ambiente de teste esteja configurado de maneira adequada. Equipamentos como *tablets*, computadores e câmeras para gravação são essenciais, assim como itens de conforto para os participantes, como cadeiras ergonômicas e material de higiene para a desinfecção de dispositivos compartilhados (Kennedy et al., 1993).

3.5.3. Considerações Éticas e Privacidade

Durante o processo de avaliação, é fundamental seguir diretrizes éticas rigorosas para proteger a privacidade e o bem-estar dos participantes. Isso inclui garantir que os dados coletados sejam mantidos confidencialmente e que os participantes estejam cientes de como suas informações serão usadas. O uso de termo de consentimento livre e esclarecido (TCLE) é obrigatório, e as diretrizes do Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) devem ser

seguidas rigorosamente.

Além disso, é importante considerar o desconforto físico que pode ser causado pelo uso prolongado de dispositivos de RA e RV. O planejamento deve incluir medidas para mitigar esses desconfortos, como pausas durante a sessão e a disponibilização de suporte técnico ou médico, caso necessário.

3.6. Conclusão

A Realidade Aumentada e a Realidade Virtual transformaram o modo como interagimos com sistemas e ambientes digitais, criando experiências imersivas que oferecem novas oportunidades, mas também novos desafios. Para garantir que essas tecnologias proporcionem experiências de alta qualidade, é fundamental realizar avaliações rigorosas de usabilidade e UX, que considerem não apenas os aspectos técnicos, mas também a experiência subjetiva dos usuários. Conceitos como imersão e presença são centrais nesse contexto e precisam ser integrados aos processos de avaliação adequadamente.

Os desafios inerentes à avaliação de sistemas imersivos, como a complexidade das interações, o desconforto físico potencial (como a cinetose) e a variabilidade de dispositivos, exigem uma combinação de métodos quantitativos e qualitativos para capturar com precisão a experiência do usuário. Testes com usuários, questionários específicos, análises de dados fisiológicos e a inspeção por especialistas são algumas das abordagens discutidas que podem ser utilizadas combinadamente para obter percepções valiosas.

O conteúdo apresentado neste capítulo não deve limitar a compreensão do tema. Mais informações sobre métodos e características das avaliações de usabilidade ou UX em ambientes RA e RV podem ser obtidas em revisões e mapeamentos da literatura específicos [Swan and Gabbard 2005, Dünser et al. 2008, Dünser and Billingham 2011, Bai and Blackwell 2012, Merino et al. 2020, Veriscimo et al. 2020, Campos et al. 2023, Frata Furlan Peres et al. 2024]. Do mesmo modo, há obras que apresentam um maior aprofundamento sobre métodos e processos de realização de uma avaliação, como, por exemplo, em Barbosa et al. [2021] e em Rubin e Chisnell [2008].

Conforme as tecnologias de RA e RV continuam a evoluir, é provável que os métodos de avaliação também precisem se adaptar e se aprimorar, de modo a acompanhar as novas formas de interação e garantir que os sistemas ofereçam não apenas usabilidade, mas também experiências ricas e satisfatórias. A capacidade de avaliar e melhorar continuamente a experiência do usuário será decisiva para o sucesso das tecnologias imersivas em sua crescente integração no dia a dia das pessoas e no mercado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Programa de Excelência Acadêmica (PROEX), FAPEMIG (APQ-00890-23 e APQ-03665-22) e ao CNPq (306101/2021-1) pelo financiamento parcial deste trabalho. Os autores declaram que as descrições das imagens foram feitas com o apoio da ferramenta de inteligência artificial generativa ChatGPT (GPT-4).

Referências

- [Azuma et al. 2001] Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., and MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6):34–47.
- [Bai and Blackwell 2012] Bai, Z. and Blackwell, A. F. (2012). Analytic review of usability evaluation in ISMAR. *Interacting with Computers*, 24(6):450–460.
- [Barbosa et al. 2021] Barbosa, S., Silva, B., Silveira, M., Gasparini, I., Darin, T., and Barbosa, G. (2021). *Interação Humano-Computador e Experiência do Usuário*. Autopublicação, Rio de Janeiro, 1a ed. edition.
- [Basdogan et al. 2007] Basdogan, C., Sedef, M., Harders, M., and Wesarg, S. (2007). VR-based simulators for training in minimally invasive surgery. *IEEE computer graphics and applications*, 27(2):54–66.
- [Berkman and Akan 2019] Berkman, M. I. and Akan, E. (2019). Presence and Immersion in Virtual Reality. In Lee, N., editor, *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*, pages 1–10. Springer International Publishing, Cham.
- [Bos 2017] Bos, J. (2017). Motion Perception and Sickness, Eye Movements and Human Performance.
- [Brooke 1996] Brooke, J. (1996). SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale. In *Usability Evaluation In Industry*, pages 207–212. CRC Press, London, 1st edition.
- [Brown and Cairns 2004] Brown, E. and Cairns, P. (2004). A grounded investigation of game immersion. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '04, pages 1297–1300, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Burdea and Coiffet 2024] Burdea, G. and Coiffet, P. (2024). *Virtual reality technology*. Wiley, Hoboken, New Jersey, third edition edition.
- [Calleja 2011] Calleja, G. (2011). *In-game: from immersion to incorporation*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [Campos et al. 2024] Campos, T., Damasceno, E., and Valentim, N. (2024). Usability and User Experience Questionnaire Evaluation and Evolution for Touchable Holography. In *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems*, pages 449–460, Angers, France. SCITEPRESS - Science and Technology Publications.
- [Campos et al. 2023] Campos, T., Valentim, N., and Damasceno, E. (2023). A Systematic Mapping Study on Usability and User Experience Evaluation of Touchable Holograms: Technical Report. Technical report, Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil.

- [Cheiran et al. 2022] Cheiran, J. F., Pimenta, M., and Bandeira, D. (2022). Criação e Avaliação Preliminar de um Questionário Padronizado para Aferir Experiência de Usuário em Realidade Virtual imersiva. *Comunicações em Informática*, 6(2):5–8.
- [Chen and Mokmin 2024] Chen, J. and Mokmin, N. A. M. (2024). Enhancing primary school students' performance, flow state, and cognitive load in visual arts education through the integration of augmented reality technology in a card game. *Education and Information Technologies*, 29(12):15441–15461.
- [Ciliberti et al. 2023] Ciliberti, E. C., Fiore, M., and Mongiello, M. (2023). Development of a Metaverse Platform for Tourism Promotion in Apulia. In *2023 IEEE International Conference on Metaverse Computing, Networking and Applications (MetaCom)*, pages 680–681.
- [Cipresso et al. 2018] Cipresso, P., Giglioli, I. A. C., Raya, M. A., and Riva, G. (2018). The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9.
- [Cummings and Bailenson 2016] Cummings, J. J. and Bailenson, J. N. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2):272–309.
- [Derby and Chaparro 2021] Derby, J. L. and Chaparro, B. S. (2021). The Challenges of Evaluating the Usability of Augmented Reality (AR). *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 65(1):994–998.
- [Dünser and Billinghamurst 2011] Dünser, A. and Billinghamurst, M. (2011). Evaluating Augmented Reality Systems. In Furht, B., editor, *Handbook of Augmented Reality*, pages 289–307. Springer New York, New York, NY.
- [Dünser et al. 2008] Dünser, A., Grasset, R., and Billinghamurst, M. (2008). A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses on - SIGGRAPH Asia '08*, pages 1–27, Singapore. ACM Press.
- [Elliman et al. 2016] Elliman, J., Loizou, M., and Loizides, F. (2016). Virtual Reality Simulation Training for Student Nurse Education. In *2016 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES)*, pages 1–2.
- [Ericsson and Simon 1993] Ericsson, K. A. and Simon, H. A. (1993). *Protocol Analysis: Verbal Reports as Data*. The MIT Press, 2 edition.
- [Frata Furlan Peres et al. 2024] Frata Furlan Peres, F., Nunes, F., Teixeira, J. M., Maurício, C. R. M., Conceição, K. P., and Yoshida, L. (2024). Methods for Evaluating Immersive 3D Virtual Environments: a Systematic Literature Review. In *Proceedings of the 26th Symposium on Virtual and Augmented Reality, SVR '24*, pages 140–151, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Gianaros et al. 2001] Gianaros, P. J., Muth, E. R., Mordkoff, J. T., Levine, M. E., and Stern, R. M. (2001). A Questionnaire for the Assessment of the Multiple Dimensions of motion Sickness. *Aviation, space, and environmental medicine*, 72(2):115–119.

- [Hart and Staveland 1988] Hart, S. G. and Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Hancock, P. A. and Meshkati, N., editors, *Advances in Psychology*, volume 52 of *Human Mental Workload*, pages 139–183. North-Holland, Amsterdam, Netherlands.
- [Hartson and Pyla 2012] Hartson, R. and Pyla, P. (2012). *The UX Book: Process and Guidelines for Ensuring a Quality User Experience*. Morgan Kaufmann, 1st edition.
- [Hassenzahl 2011] Hassenzahl, M. (2011). User Experience and Experience Design. In *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Interaction Design Foundation, online, 2nd edition.
- [Havard et al. 2021] Havard, V., Baudry, D., Jeanne, B., Louis, A., and Savatier, X. (2021). A use case study comparing augmented reality (AR) and electronic document-based maintenance instructions considering tasks complexity and operator competency level. *Virtual Reality*, 25(4):999–1014.
- [ISO 2018] ISO (2018). ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts. Technical report, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [ISO 2019] ISO (2019). ISO 9241-210:2019 - Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [Ivory and Hearst 2001] Ivory, M. Y. and Hearst, M. A. (2001). The state of the art in automating usability evaluation of user interfaces. *ACM Computing Surveys*, 33(4):470–516.
- [Jha et al. 2024] Jha, C. K., Shukla, Y., Mukherjee, R., Rathva, P., Joshi, M., and Jain, D. (2024). A Glove-Based Virtual Hand Rehabilitation System for Patients With Post-Traumatic Hand Injuries. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 71(7):2033–2041.
- [Kalawsky 1999] Kalawsky, R. S. (1999). VRUSE—a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied Ergonomics*, 30(1):11–25.
- [Kennedy et al. 1993] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., and Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220.
- [Laugwitz et al. 2008] Laugwitz, B., Held, T., and Schrepp, M. (2008). Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire. In Holzinger, A., editor, *HCI and Usability for Education and Work*, Lecture Notes in Computer Science, pages 63–76, Graz, Austria. Springer.
- [Li et al. 2024] Li, C.-R., Chang, Y.-J., Lin, M.-S., and Tsou, H.-K. (2024). Augmented Reality in Spine Surgery: A Case Study of Atlantoaxial Instrumentation in Os Odontoidum. *Medicina*, 60(6):874.

- [Lu et al. 2024] Lu, M., Arikawa, M., Oba, K., Ishikawa, K., Jin, Y., Utsumi, T., and Sato, R. (2024). Indoor AR Navigation Framework Based on Geofencing and Image-Tracking with Accumulated Error Correction. *Applied Sciences*, 14(10):4262.
- [Lund 2001] Lund, A. M. (2001). Measuring usability with the USE questionnaire. *Usability interface*, 8(2):3–6.
- [Merino et al. 2020] Merino, L., Schwarzl, M., Kraus, M., Sedlmair, M., Schmalstieg, D., and Weiskopf, D. (2020). Evaluating Mixed and Augmented Reality: A Systematic Literature Review (2009-2019). In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pages 438–451, Porto de Galinhas, Brazil. IEEE.
- [Milgram and Kishino 1994] Milgram, P. and Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12):1321–1329. Publisher: The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.
- [Milgram et al. 1995] Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., and Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 282–292. SPIE.
- [Min et al. 2019] Min, X., Zhang, W., Sun, S., Zhao, N., Tang, S., and Zhuang, Y. (2019). VPMoel: High-Fidelity Product Simulation in a Virtual-Physical Environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(11):3083–3093.
- [Murphy and Skarbez 2022] Murphy, D. and Skarbez, R. (2022). What Do We Mean When We Say “Presence”? *PRESENCE: Virtual and Augmented Reality*, pages 171–190.
- [Murray 1998] Murray, J. (1998). *Hamlet on the Holodeck*. The MIT Press.
- [Nielsen 2012] Nielsen, J. (2012). *Usability 101: Introduction to Usability*.
- [Parveau and Adda 2018] Parveau, M. and Adda, M. (2018). 3iVClass: a new classification method for Virtual, Augmented and Mixed Realities. *Procedia Computer Science*, 141:263–270.
- [Pereira et al. 2020] Pereira, M. F., Prahm, C., Kolbenschlag, J., Oliveira, E., and Rodrigues, N. F. (2020). A Virtual Reality Serious Game for Hand Rehabilitation Therapy. In *2020 IEEE 8th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, pages 1–7. ISSN: 2573-3060.
- [Prado De Campos et al. 2024] Prado De Campos, T., Damasceno, E. F., and Valentim, N. M. C. (2024). Evaluating Usability and UX in Touchable Holographic Solutions: A Validation Study of the UUXE-ToH Questionnaire. *International Journal of Human-Computer Interaction*, pages 1–21.
- [Pranoto et al. 2017] Pranoto, H., Tho, C., Warnars, H. L. H. S., Abdurachman, E., Gaol, F. L., and Soewito, B. (2017). Usability testing method in augmented reality application. In *2017 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*, pages 181–186.

- [R et al. 2023] R, V., P, S., and MSR, R. (2023). Architectural Visualisation using Virtual Reality. In *2023 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pages 1609–1615.
- [Rauschnabel et al. 2022] Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., and Alt, F. (2022). What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality. *Computers in Human Behavior*, 133:107289.
- [Rhiu et al. 2020] Rhiu, I., Kim, Y. M., Kim, W., and Yun, M. H. (2020). The evaluation of user experience of a human walking and a driving simulation in the virtual reality. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 79:103002.
- [Roto et al. 2009] Roto, V., Obrist, M., and Väänänen-vainio mattila, K. (2009). User Experience Evaluation Methods in Academic and Industrial Contexts. In *Proceedings of the Workshop UXEM'09*, volume II, page 4 p, Uppsala, Sweden. Springer.
- [Rubin and Chisnell 2008] Rubin, J. and Chisnell, D. (2008). *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. Wiley Publishing, Indianapolis, IN, 2nd edition.
- [Ryan 2010] Ryan, M.-L. (2010). *Narrative as virtual reality: immersion and interactivity in literature and electronic media*. Parallax. Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, Md., transferred to digital print. 2001 - [im kolophon: milton keynes: lightning source, 2010] edition.
- [Sahin et al. 2018] Sahin, N. T., Abdus-Sabur, R., Keshav, N. U., Liu, R., Salisbury, J. P., and Vahabzadeh, A. (2018). Case Study of a Digital Augmented Reality Intervention for Autism in School Classrooms: Associated With Improved Social Communication, Cognition, and Motivation via Educator and Parent Assessment. *Frontiers in Education*, 3.
- [Santos et al. 2014] Santos, M. E. C., Taketomi, T., Sandor, C., Polvi, J., Yamamoto, G., and Kato, H. (2014). A usability scale for handheld augmented reality. In *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '14*, pages 167–176, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- [Satkowski et al. 2021] Satkowski, M., Büschel, W., and Dachselt, R. (2021). Experiences with User Studies in Augmented Reality. arXiv:2104.03795 [cs].
- [Schubert et al. 2001] Schubert, T., Friedmann, F., and Regenbrecht, H. (2001). The Experience of Presence: Factor Analytic Insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3):266–281.
- [Sharples et al. 2008] Sharples, S., Cobb, S., Moody, A., and Wilson, J. R. (2008). Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 29(2):58–69.
- [Singh et al. 2023] Singh, M., Bangay, S., Grossek, H., and Sajjanhar, A. (2023). Forest Classroom: A Case Study of Educational Augmented Reality Design to Facilitate Classroom Engagement. *Multimodal Technologies and Interaction*, 7(5):46.

- [Skarbez et al. 2021a] Skarbez, R., Brooks, F. P., and Whitton, M. C. (2021a). Immersion and Coherence: Research Agenda and Early Results. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(10):3839–3850.
- [Skarbez et al. 2017] Skarbez, R., Brooks, Jr., F. P., and Whitton, M. C. (2017). A Survey of Presence and Related Concepts. *ACM Computing Surveys*, 50(6):96:1–96:39.
- [Skarbez et al. 2022] Skarbez, R., Smith, M., Sadagic, A., and Whitton, M. C., editors (2022). *Presence and Beyond: Evaluating User Experience in AR/MR/VR*. Frontiers Research Topics. Frontiers Media SA.
- [Skarbez et al. 2021b] Skarbez, R., Smith, M., and Whitton, M. C. (2021b). Revisiting Milgram and Kishino’s Reality-Virtuality Continuum. *Frontiers in Virtual Reality*, 2:647997.
- [Slater 1999] Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5):560–565.
- [Slater et al. 1994] Slater, M., Usoh, M., and Steed, A. (1994). Depth of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2):130–144.
- [Slater and Wilbur 1997] Slater, M. and Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6):603–616.
- [Spadoni et al. 2022] Spadoni, E., Porro, S., Bordegoni, M., Arosio, I., Barbalini, L., and Carulli, M. (2022). Augmented Reality to Engage Visitors of Science Museums through Interactive Experiences. *Heritage*, 5(3):1370–1394.
- [Steuer 1992] Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42(4):73–93.
- [Strzałkowski et al. 2024] Strzałkowski, P., Bęś, P., Szóstak, M., and Napiórkowski, M. (2024). Application of Virtual Reality (VR) Technology in Mining and Civil Engineering. *Sustainability*, 16(6):2239.
- [Sutcliffe and Kaur 2000] Sutcliffe, A. G. and Kaur, K. D. (2000). Evaluating the usability of virtual reality user interfaces. *Behaviour & Information Technology*, 19(6):415–426.
- [Swan and Gabbard 2005] Swan, J. and Gabbard, J. L. (2005). Survey of User-Based Experimentation in Augmented Reality. In *Proceedings 1st International Conference on Virtual Reality*, pages 1–9, Las Vegas, Nevada, USA. Mira Digital Publishing.
- [Touati et al. 2021] Touati, R., Fehmer, V., Ducret, M., Sailer, I., and Marchand, L. (2021). Augmented Reality in Esthetic Dentistry: a Case Report. *Current Oral Health Reports*, 8(2):23–28.

- [Veriscimo et al. 2020] Veriscimo, E. D. S., Bernardes Junior, J. L., and Digiampietri, L. A. (2020). Evaluating User Experience in 3D Interaction: a Systematic Review. In *XVI Brazilian Symposium on Information Systems*, pages 1–8, São Bernardo do Campo Brazil. ACM.
- [Vorderer et al. 2004] Vorderer, P., Wirth, W., Gouveia, F. R., Biocca, F., Saari, T., Futz Jäncke, Böcking, S., Schramm, H., Gysbers, A., Hartmann, T., Klimmt, C., Laarni, J., Ravaja, N., Sacau, A., Baumgartner, T., and Jäncke, P. (2004). MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ): Short Documentation and Instructions for Application. Technical report, Hannover, Zurich, Porto, and Helsinki.
- [Wachowski and Wachowski 1999] Wachowski, L. and Wachowski, L. (1999). The Matrix. Translated title: Matrix IMDb ID: tt0133093 event-location: Estados Unidos da América, Austrália.
- [Witmer and Singer 1998] Witmer, B. G. and Singer, M. J. (1998). Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3):225–240.
- [Zhang et al. 2020] Zhang, T., Booth, R., Jean-Louis, R., Chan, R., Yeung, A., Gratzner, D., and Strudwick, G. (2020). A Primer on Usability Assessment Approaches for Health-Related Applications of Virtual Reality. *JMIR Serious Games*, 8(4):e18153.