

HMDs PARA REALIDADE AUMENTADA EM AECO: CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS PARA SELEÇÃO DE DISPOSITIVOS

HMDs FOR AUGMENTED REALITY IN AECO: FUNDAMENTAL FEATURES FOR DEVICE SELECTION

Danielle Skubs¹

Ana Regina Mizrahy Cuperschmid²

Resumo

Experiências de Realidade Aumentada (RA), através de Head Mounted Displays (HMDs), para a área de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), já são uma realidade, ainda que pouco explorada frente a outras áreas. Os HMDs apresentam uma opção valiosa para RA, visto que oferecem maior consistência pictórica e sensação de presença. Dada a constante atualização tecnológica, a apresentação de uma relação dos HMDs disponíveis comercialmente se tornaria rapidamente obsoleta. Por este motivo, busca-se descrever as características fundamentais que devem ser observadas para a seleção de HMDs de forma a atender demandas específicas de atividades na área de AECO. De forma a apresentar uma categorização, as especificações técnicas dos HMDs foram segmentadas segundo: portabilidade, visualização, sistemas de rastreamento e posicionamento, resistência ao intemperismo e ambientes agressivos, mecanismos de interação, hardware e software. Essas características foram fundamentadas por referências bibliográficas para, posteriormente, serem correlacionadas com atividades comumente desenvolvidas no setor. Essa pesquisa contribui para a escolha consciente e criteriosa de HMDs, favorecendo a incorporação de experiências de RA em atividades de AECO.

Palavras-chave: *Smartglasses*; Realidade Aumentada; Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação; *Headset*; Dispositivo de visualização.

Abstract

Augmented Reality (AR) experiences through Head Mounted Displays (HMDs) for Architecture, Engineering, Construction and Operations (AECO) are already a reality, although little explored compared to other areas. HMDs present a valuable option for AR, since they offer greater pictorial consistency and sense of presence. Given the frequent updates, any presented list of commercially available HMDs would quickly become obsolete. For this reason, we seek to describe the fundamental characteristics that must be observed for the selection of HMDs in order to meet specific demands of activities within the AECO spectrum. In order to present a categorization, the technical specifications of the HMDs were segmented according to: portability, visualization, tracking and positioning systems, resistance to weather and aggressive environments, interaction mechanisms, hardware and software. These characteristics were based on bibliographic references and then correlated with activities commonly developed in the industry. This research contributes to the conscious and careful choice of HMDs, favoring the incorporation of AR experiences in AECO activities.

Keywords: smartglasses; Augmented Reality; Architecture, Engineering, Construction and Operation; headset; display.

¹ Universidade Estadual de Campinas, <https://orcid.org/0000-0003-3615-897X>, d002902@g.unicamp.br 1

² Universidade Estadual de Campinas, <https://orcid.org/0000-0002-6792-174X>, cuper@unicamp.br 2

INTRODUÇÃO

A recente popularização de equipamentos eletrônicos com acesso aos mais diversos tipos de sistemas computacionais, repercutiu diretamente no desenvolvimento de novos dispositivos. Atualmente, um dos principais desafios tem sido criar interfaces computacionais com funcionalidade e usabilidade adequadas ao público a que se destina. De frente a esse problema, a tecnologia de Realidade Aumentada (RA), associada aos dispositivos Head-Mounted Displays (HMDs), apresenta grande potencial de desenvolvimento tecnológico nos próximos anos e uma nova perspectiva de percepção do mundo ao nosso redor.

Os HMDs, também conhecidos como *smartglasses*, são dispositivos que permitem a visualização em RA, em primeira pessoa, através de aparatos tecnológicos que possibilitam um maior grau de sensação de presença e qualidade gráfica quando comparados aos *smartphones* e *tablets* (1). Tais dispositivos favorecem uma experiência mais envolvente do usuário com a RA. Entretanto, são mais utilizados no campo empresarial e ainda não são tão acessíveis para a população (2).

Apesar do recente aumento no número de HMDs disponíveis comercialmente e de pesquisas sobre as possíveis contribuições de RA nas mais diversas áreas, há uma escassez de trabalhos que permitam a avaliação objetiva desses dispositivos com relação a sua utilização na Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). A constante evolução das tecnologias dificulta a seleção do equipamento que melhor se adequa às atividades propostas. Assim, justifica-se a necessidade de discutir critérios técnicos que possam apoiar a escolha do HMD mais apropriado para as diversas ações no campo da AECO, que por vezes demandam a capacidade de promover ambientes colaborativos, resistência ao intemperismo e ambientes agressivos, além de oferecerem interfaces com *software* utilizados pelos mais diversos profissionais envolvidos.

Portanto, esse trabalho tem por objetivo descrever as características fundamentais que devem ser observadas para a seleção de HMD de forma a atender demandas específicas de atividades na área de AECO. Para isso, buscou-se apresentar um levantamento de critérios técnicos relacionados aos HMDs de forma a facilitar a compreensão por projetistas, construtores e diferentes profissionais envolvidos, no momento de selecionar um dispositivo apropriado para suas atividades.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este artigo identifica, classifica, descreve e discute características de HMDs para RA buscando oferecer subsídios para a escolha de dispositivos apropriados para as diversas atividades na área de AECO.

Para tanto, foram identificadas as especificações técnicas comumente apresentadas publicamente pelos fabricantes de HMDs como peso, dimensões, processador, campo de visão, entre outras.

Essas especificações foram classificadas segundo: portabilidade, visualização, sistemas de rastreamento e posicionamento, resistência ao

intemperismo e ambientes agressivos, mecanismos de interação, hardware e software.

Essas características foram descritas segundo uma fundamentação teórica para, posteriormente, serem discutidas através da correlação com atividades comumente desenvolvidas em AECO.

Ressalta-se que esse estudo difere de um levantamento das especificações necessárias para o desenvolvimento e produção desses dispositivos.

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS PARA SELEÇÃO DE HMDS

Os HMDs são dispositivos vestíveis, que permitem grande liberdade de movimento, fornecem aos usuários a visualização direta, individualizada e com o mesmo ponto de vista, além de possibilitar que os usuários tenham as mãos livres para interagir com o ambiente físico. Para uso em AECO essas qualidades são muito importantes. Entretanto, cada dispositivo possui suas particularidades que devem ser observadas para a escolha de um dispositivo adequado ao uso proposto. A seguir, são classificadas e descritas características que devem ser consideradas para esta escolha.

Portabilidade

A portabilidade do HMD está diretamente relacionada aos fatores que influenciam na mobilidade, incluindo dimensões, peso e autonomia de funcionamento. Os HMDs para RA oferecem suporte ao usuário para caminhar em ambientes extensos e estar no local onde a tarefa deve ocorrer, através de conjuntos de equipamentos que permitam esta mobilidade c.

O peso e as dimensões do *hardware* também influenciam diretamente na aplicação de RA (3). Dessa forma, os autores recomendam que, para o desenvolvimento de sistemas de RA, deve-se focar primordialmente nos requisitos de portabilidade e estabilidade desses dispositivos. Se essas capacidades forem atingidas, uma infinidade de novas aplicações para RA poderá ser viabilizada.

Para que a liberdade de percurso do usuário em campo seja adequada, também é fundamental que se observe a capacidade de bateria do conjunto móvel de equipamentos, assim, esse deve permitir que o usuário se movimente por um período razoável de tempo (4). Os autores citam ainda que é preciso analisar se há necessidade de um suporte externo de energia, considerando o cuidado com o peso do conjunto, que pode ser uma dificuldade para o usuário em seu percurso.

Em 2013 foi lançada a versão *beta* do Google Glass, um sistema móvel e vestível que incluía computador, câmera, projetor e display em um só dispositivo (5), abrindo caminho para maior autonomia em portabilidade e novos produtos que viriam depois como o Epson Moverio, Sony SmartEyeglass e Microsoft HoloLens.

A portabilidade dos HMDs é um dos primeiros e mais essenciais requisitos para a aplicação de RA na AECO. Visto que, se essa capacidade for plenamente alcançada, uma grande variedade de atividades nessa área pode

ser beneficiada, principalmente as que estão vinculadas à supervisão e execução em canteiros de obras, monitoramento de ativos em Gestão de Facilidades, diagnóstico do estado de conservação de edifícios históricos, entre outros.

Visualização

Tecnologias dos dispositivos de visualização

Existem dois tipos básicos de tecnologias de dispositivos de visualização capazes de combinar o mundo real com o virtual em HMDs: ópticos (*optical see-through*) e baseados em vídeo (6, 7, 8, 9). O sistema óptico funciona através do posicionamento de aparatos transparentes, como lentes, na frente dos olhos do usuário, de modo que o usuário pode observar o mundo real diretamente através deles. Simultaneamente, essas lentes são parcialmente refletivas, possibilitando que o usuário consiga visualizar dados virtuais projetados nesses *displays*, Figura 1.

Figura 1: Google Glass - HMD *optical see-through* (10).



Por outro lado, o sistema baseado em vídeo funciona através da combinação de aparatos de visão fechada, colocados em frente aos olhos, com uma ou duas câmeras de vídeo posicionadas na cabeça do usuário. As câmeras de vídeo externas capturam imagens do mundo real, que combinadas com as imagens criadas através do sistema gráfico computacional, transmitem a mescla do real com o virtual para o usuário pelos *displays* posicionados na frente dos olhos do usuário, Figura 2.

Figura 2: Samsung Odissey - HMD de realidade misturada com câmeras de vídeo (11).



Atualmente, a grande maioria dos dispositivos de HMDs para RA são do tipo óptico, muito provavelmente pelas vantagens que essa tecnologia proporciona em relação aos HMDs baseados em vídeo (12).

Entretanto, alguns dos HMDs ópticos, atualmente, utilizam um sistema híbrido, que apesar de possuir lentes translúcidas, utilizam câmeras externas para captura do mundo real e sobrepõem a informação misturada sobre as lentes, Figura 3. Nesse caso, tanto a resolução do vídeo de captura, quanto de projeção nas lentes devem ser observados para uma visualização mais realista.

Figura 3: Moverio BT-40S (13).



Ressalta-se que os sistemas de vídeo são essencialmente de visão fechada, ou seja, bloqueiam a visualização do ambiente real (14). No caso de interrupção da transmissão, ou esgotamento da bateria, isso significaria cegueira momentânea absoluta, tornando a sua utilização extremamente perigosa. Nessas situações, os HMDs ópticos mostram-se mais seguros, pois, o usuário continuaria visualizando o mundo real através de suas lentes.

Outro fator que pode afetar a visualização realista é a diferença entre o posicionamento das câmeras de captura do mundo real e a retina (14) - no caso dos dispositivos baseados em vídeo. Esta diferença pode causar um deslocamento do que o usuário naturalmente veria em comparação com o que ele visualiza através das câmeras. Soluções tecnológicas para corrigir esses deslocamentos tornam o funcionamento desses sistemas mais complexos (15).

Campo de visão

O campo de visão (Field of View - FOV) do ser humano atinge, aproximadamente, com a sobreposição das imagens de ambos os olhos, 200° na horizontal e 120° na vertical (16). Como os HMDs ópticos para a RA mesclam a visão do mundo real com objetos virtuais renderizados e projetados através das lentes do dispositivo, o campo de visão do mundo real possibilitado pelo sistema já é o natural do ser humano (17).

Portanto, deve ser observado a amplitude do FOV de projeção da virtualidade, para uma experiência mais imersiva em RA. Assim, é desejável que a amplitude da projeção seja próxima à humana. A oferta de HMD com amplo FOV vem sendo observada.

Dispositivo monocular e binocular

Os HMDs para RA podem ser do tipo monocular ou binocular. Os monoculares fornecem a transmissão da sobreposição da virtualidade apenas a um dos olhos, enquanto os binoculares fornecem aos dois de forma conjunta (7). Ambos os tipos são encontrados nos dispositivos ópticos, enquanto nos baseados em vídeo só se observa a visualização binocular.

Os dispositivos monoculares fornecem menos obstrução ao mundo real, ou seja, apresentam um campo de visão reduzido da virtualidade projetada (7, 12, 18). Além disso, o suporte para o posicionamento exato da projeção de virtualidade fica limitado a este e a sobreposição de objetos tridimensionais fica prejudicada pela ausência das pistas estereoscópicas, principalmente em relação à profundidade (12, 18).

Ressalta-se que o fornecimento de imagens diferentes para cada um dos olhos pode gerar muito desconforto, além de que, o cérebro necessita realizar um grande esforço para equilibrar as diferentes informações visuais recebidas - uma pela lente monocular e a outra pela visualização livre (7). Há diversos dispositivos monoculares disponíveis no mercado, como o Vuzix M4000, Figura 6.

Figura 6 - HMD Vuzix M4000 - dispositivo monocular para AR (19)



Em relação aos HMDs do tipo binocular, alguns projetam apenas imagens bidimensionais sobre os olhos e a visão estereoscópica fica dependente da paralaxe visual (12). Nessa situação, a visualização tridimensional é obtida pela observação de pares de imagens analogamente concebidas (20). Esse processo pode causar fadiga visual, provocando sensações de desconforto ao usuário (12). Conforme o autor, para solucionar essa questão, tecnologias de dispositivos holográficos conseguem reconstruir objetos de uma maneira verdadeiramente tridimensional, oferecendo maior sensação de profundidade. Em tais sistemas, os hologramas são apresentados sobre a visão do observador por lentes específicas, como no caso do HoloLens 2 (21), Figura 7.

Figura 7: Hololens 6 (21)



Em suma, a experiência com HMDs binoculares tende a ser mais imersiva em função do maior campo de visão associado à projeção da virtualidade e pela tridimensionalidade oferecida. Os dispositivos holográficos merecem destaque por oferecer maior conforto visual.

Resolução

A resolução de uma imagem em tela está relacionada à quantidade de pixels que um dispositivo é capaz de exibir (15). Assim, quanto maior a resolução, maior a quantidade de pixels por área e melhor a qualidade da imagem. A resolução também é afetada pelo campo de visão de um dispositivo, dado que, quanto maior o campo, maior a resolução da imagem precisa ser, para não haver perda de qualidade (22).

A acuidade visual de uma pessoa normal é de 60 pixels por grau, 1 arcmin ($1/60^\circ$) (15, 23).

Assim, a densidade de pixels contida em uma imagem precisa ser de pelo menos 60px para cada 1° do campo de visão para atingir a acuidade visual humana (22). Para melhor experiência em visualização de imagens, o objetivo é que se alcance ou supere o limite de acuidade visual humana (15), entretanto, alcançar o nível de resolução da retina humana com um amplo campo de visão ainda é um desafio (23).

Embora possam existir HMDs com alta resolução e amplo campo de visão, deve ser observado a capacidade de transmissão e processamento dos dados e a taxa de atualização da tela (24). Assim, os autores sugerem que os dispositivos de alta resolução para RA tirem vantagem da foveação, utilizando visores de inserção de alta resolução para as regiões foveais. Isso porque, em dispositivos foveados a resolução varia em diferentes pontos da região de visualização, entre área central ou periférica, fazendo com que a demanda de *hardware* e transferência de dados seja reduzida (25).

Dispositivos foveados como os óculos Kura Gallium, suportam transmissão 8K ou 33 megapixel, com resolução de 7680x4320px, em um campo de visão de 150° na diagonal ou 120° na horizontal e 90° na vertical, chegando a 1 arcmin de acuidade visual na horizontal com foveação (26), Figura 8.

Figura 8: óculos KURA GALLIUM (27)



Ambientes internos e externos: luminância, brilho, contraste e transparência

Para experiências realistas através de dispositivos HMD, a consistência pictórica entre imagens reais e virtuais é bastante importante, pois precisam transmitir a sensação de que fazem parte de uma mesma cena, de maneira que eles sejam indistinguíveis um do outro (8).

Um fator que afeta a visualização da RA é o local onde o usuário se encontra: se ambiente interno ou externo. Isso porque, o brilho das imagens projetadas, a luminosidade do ambiente real e o contraste entre estes parâmetros definem a qualidade da exibição da cena composta (8).

A luminância, medida em nits ou cd/m^2 , indica o quanto de energia luminosa é percebida pelo olho e representa a percepção de brilho (28). O brilho emitido pelo sol é de 1.6 bilhões de nits, promovendo altas taxas de luminosidade em ambientes externos (29). Assim, devido à variação de luminosidade em ambientes externos, a visualização em dispositivos ópticos é prejudicada pela alta luminosidade durante o dia. Portanto, balancear brilho e contraste nesses dispositivos é um desafio (8).

Em HMDs baseados em vídeo, em que a luz do ambiente externo é bloqueada, é possível controlar a luminosidade, porém, deve-se ainda observar a emissão de brilho, pois altas taxas podem causar desconforto visual significativo (30).

O contraste também é um parâmetro importante (25). Isso porque, o contraste aparente ou percebido é uma das principais características de visualização de imagens, dado que é um atributo básico para percepção dessas (31). Quando há alta luminosidade no ambiente externo, ao utilizar dispositivos ópticos, há uma menor taxa de contraste entre conteúdo projetado e mundo real, reduzindo a visibilidade da virtualidade (25)

A transparência está relacionada à luminosidade do mundo real que chega aos olhos, sendo que quanto maior, melhor para experiências em RA (15). Assim, em ambientes ao ar livre, para melhor visualização nos dispositivos ópticos, principalmente nos que possuem alto grau de transparência, o HMD precisa apresentar alta luminância ou alto brilho, para redução de problemas de contraste (25, 32). Em contrapartida, lentes opacas fornecem melhor

contraste entre as imagens, principalmente em ambientes externos com alta luminosidade (33).

Como diretriz geral, a luminância de dispositivos ópticos precisa ser de pelo menos 500 nits para ambientes internos e de 10.000 nits para externos, exigindo alta eficiência do HMD (25). Vale mencionar haver HMDs, como o KURA Gallium (34), que fornecem brilho de 2 milhões de nits e transparência de 95%, superando o recomendado para um desempenho adequado, principalmente em ambientes ao ar livre.

SISTEMAS DE RASTREAMENTO E POSICIONAMENTO

Os sistemas de rastreamento e posicionamento podem ser classificados *sensor-based* (baseados em sensores), *computer vision-based* (baseados na visão computacional) e híbridos (8, 35, 36).

Os métodos baseados na visão computacional utilizam imagens capturadas por câmeras e o reconhecimento baseado em visão e algoritmos de rastreamento para identificar objetos físicos e vinculá-los posteriormente a objetos virtuais apropriados (35). Com o rastreamento adequado e processamento síncrono das imagens capturadas e renderizadas, a mistura consistente do mundo real com o virtual pode ser alcançada (8). A visão computacional é o recurso utilizado quando são empregados marcadores na forma de imagens, objetos tridimensionais ou mesmo reconhecimento espacial para o posicionamento de elementos virtuais no ambiente real.

Os métodos baseados em sensores funcionam através de sensores como, por exemplo, GPS, NFC, magnetômetros, acelerômetro e giroscópio, utilizados para identificar e rastrear a posição geográfica de um dispositivo móvel e sua orientação (35). Graças a essas tecnologias, a indústria de HMDs pôde desenvolver o sensoriamento de movimentação da cabeça e do corpo do usuário.

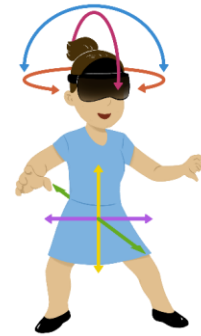
A combinação de sensores de navegação com rastreamento ocular pode fornecer estabilidade extra para o sensoriamento (37). Por isso, o rastreamento ocular também foi integrado aos HMDs, através de sensores que respondem ao piscar dos olhos por meio de detectores de pixel único (38). Dentre as funções de rastreamento do olhar por sensores, estão os comandos como rolar páginas em navegação de rede, mudar cenas de visualização do espaço, definição da resolução pontual através de foveação óptica, leitura biométrica pela pupila, entre outros (37).

Os sistemas de rastreamento e posicionamento são capazes de reconhecer diversas formas de movimentação no espaço tridimensional, conhecidos como graus de liberdade. Esses se referem às diferentes movimentações possíveis de direção ou rotação de um objeto no espaço tridimensional. Assim, existem seis graus possíveis de liberdade do objeto nos eixos x, y e z, sendo que três deles estão relacionados à rotação e três à translação (37, 39).

Durante a visualização de RA através de HMDs, gerar uma visão consistente dos objetos virtuais a partir de todas as visões da cena real, requer medições precisas da pose da câmera em **seis graus de liberdade** (Six Degrees of Freedom - 6DoF) em relação ao sistema de coordenadas mundial (40).

Nos dispositivos HMD para VR ou AR, geralmente 6DoF se dá através de sensores internos e câmeras acopladas e se refere ao rastreamento da movimentação da cabeça (orientação) e do corpo (posicionamento) (2, 37). Segundo os autores, os controladores 6-DoF possibilitam uma experiência muito mais imersiva do que 3DoF, visto que possibilitam a movimentação do corpo no espaço 3D, permitindo aproximação a um objeto, Figura 9.

Figura 9: 6DoF.



Os sensores que permitem o rastreamento 6DoF, possibilitam que o dispositivo calcule para onde o usuário está olhando e onde ele se localiza no espaço, chamado rastreamento posicional (37)

Ao combinar giroscópio e acelerômetro, é possível criar um sensor de orientação 6DoF, que capta os 6 graus de liberdade na movimentação de um corpo rígido no espaço 3D (41). Assim, juntos, os dois sensores dão ao HMD mais precisão de localização a um objeto virtual em um cenário real.

Sistemas baseados na visão computacional

Os sistemas baseados na visão computacional, tradicionalmente, utilizam marcadores, sejam eles imagens ou objetos. Seu funcionamento consiste em (i) reconhecimento de um conjunto de características que identificam o marcador; (ii) rastreamento do marcador e (iii) e posicionamento do elemento virtual por construção de transformações precisas das coordenadas (35), ou seja, a posição do elemento virtual é alterada conforme a movimentação de seu respectivo marcador.

O sistema de rastreamento por marcadores é utilizado há tempos e com sucesso em aplicações de RA (42). Esse método pode atingir uma precisão muito alta, entretanto exige alta complexidade computacional e memória de processamento (35).

Em contrapartida, dado que esta tecnologia depende do campo de visão da câmera em relação aos marcadores para leitura dos mesmos, o sistema pode apresentar instabilidade, interrompendo muitas vezes a transmissão da virtualidade durante a experiência de visualização (40). Ainda, a visão computacional pode ajudar no rastreamento de objetos, porém não funciona adequadamente dependendo das condições climáticas, como chuva, neve ou em ambientes com muita poluição causada por poeira de obra (43).

Sistemas baseados em sensores

O método baseado em sensores obtém localizações geográficas e pose relativa do usuário através de sensores embutidos nos HMDs (35). Para determinar quais informações devem ser apresentadas e se devem ser apresentadas, é importante que o sistema capte e interprete o contexto do usuário, como sua movimentação corporal e condição fisiológica, tornando fundamental o papel dos sensores nestes dispositivos (8).

Os sensores de Unidades de Medição Inercial (*Inertial Measurement Unit - IMU*), como acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, têm um importante papel no rastreamento. O acelerômetro é um sensor que mede, em m/s^2 , a força da aceleração aplicada a um dispositivo devido sua movimentação e a força da gravidade devido seu peso (35, 44). O giroscópio é um sensor que mede a variação da rotação em torno dos eixos x, y e z, em rad/s, de um dispositivo (35, 44). O magnetômetro é um sensor que mede a intensidade do campo magnético da Terra, com um vetor que indica o Norte (35, 44).

Especificamente em HMDs, o giroscópio mede a velocidade angular e o acelerômetro a aceleração, em torno dos três eixos de navegação inercial. Assim, a pose, velocidade e posição dos dispositivos de RA são estimados (45).

Adicionalmente, a posição de um usuário pode ser obtida, com certa precisão pelos HMDs, através de sinal de GPS, empregados para identificar e rastrear a posição geográfica de um dispositivo móvel (35). Segundo os autores, com estes dados, é possível através de bancos de dados, disponibilizar informações através do HMD como rotas ou pontos de interesse, em sobreposição ao mundo real.

Em canteiros de obra, sensores GPS em HMDs podem cobrir áreas extensas, porém, o sinal pode sofrer interferências de prédios e objetos (43). Ademais, esta forma de rastreamento não é confiável para ambientes internos (1, 46, 44). Combiná-lo com o rastreamento baseado na visão computacional ou com sensores IMU, pode ajudar na precisão da localização do usuário nesses ambientes (44, 46, 47).

O uso de sistemas baseados em sensores não exige tanta complexidade computacional nem memória de processamento quanto sistemas baseados em visão computacional (35). Ressalta-se que a precisão obtida nesse sistema é influenciada pela qualidade dos sensores utilizados.

Sistemas híbridos

Sistemas híbridos combinam os sistemas baseados em sensores com os baseados em visão computacional para alcançar alta acurácia e eficiência (35).

Combinando esses sistemas para RA em ambientes internos, a técnica de Localização e Mapeamento Simultâneos (*Simultaneous Localisation and Mapping - SLAM*) é bastante expressiva, visto que reconstrói um modelo tridimensional de todo o ambiente, online e em tempo real (48). Assim, através do reconhecimento do local, os dispositivos HMD podem definir um ponto exato de inserção de um objeto virtual no ambiente real (37). Segundo o autor, os dados gerados por SLAM para construção do ambiente podem

ser compartilhados por dispositivos que estejam interconectados, criando um ambiente único com a colaboração de mais de um dispositivo.

A técnica SLAM pode utilizar apenas câmeras para reconhecimento local através do levantamento de imagens ou também realizar o escaneamento da profundidade, através de (37). Segundo o autor, suas primeiras implementações utilizavam marcadores gráficos ou *beacons*ⁱ.

Implementações mais recentes de SLAM funcionam sem a necessidade de marcadores, como as oferecidas pelos sistemas ARKit (49) e ARCore (50). Dispositivos como o HoloLens utilizam SLAM (21).

Resistência

Para utilização de HMDs em atividades de AECO, é importante considerar a capacidade de resistir à exposição em ambientes possivelmente agressivos ou a intempéries. Isto porque, em áreas de produção, fábricas ou em canteiros de obra na construção civil, pode ser necessário maior resistência do dispositivo (51). A resistência dos HMDs à poeira, impactos e água deve ser considerada tendo em vista as atividades a serem realizadas com o equipamento (52).

O HMD Realware HMT-1Z1, Figura 10, é projetado para funcionar acoplado a capacetes rígidos e óculos de segurança e, é ainda, resistente à jato de água, à entrada de micropartículas, às quedas de até dois metros em superfícies de concreto e às temperaturas entre -20 °C e 50 °C (53).

Figura 10: Dispositivo HMD Realware HMT-1Z1, acoplado à capacete de segurança (53).



Mecanismos de interação

A comunicação entre usuário e dispositivo é dada através de dispositivos de *hardware*, que podem ser de entrada (*input*) ou saída (*output*), sendo que a entrada é a informação do usuário para o sistema e a saída o oposto (9). Assim, os dispositivos de entrada, são ferramentas físicas ligadas ao dispositivo para transmissão de informações e interação com o ambiente virtual.

Os mecanismos de entrada mais comuns em HMDs são *trackpad*, controle de voz, sensores de cabeça e olhos, rastreamento dos olhos e rastreamento de gestos (38). Tais mecanismos otimizam e facilitam a interação com o

ambiente misturado. Conforme o autor, os trackpads, geralmente encontrados nas laterais dos dispositivos, possibilitam a liberdade das mãos. O controle de voz permite a entrada de comandos pela fala, mas, por usar microfones, podem exigir um ambiente silencioso para funcionar apropriadamente.

Adicionalmente, o rastreamento de gestos, busca detectar os movimentos das mãos, que representam instruções pré-estabelecidas a serem interpretadas pelo sistema, desencadeando determinadas respostas - sua aplicação visa uma interação mais natural com o sistema (1, 54).

O HMD dynaEdge, visando a liberdade das mãos, apresenta dispositivos de entrada como o *trackpad* lateral, sensores de voz e gesto, Figura 11.

Figura 11: HMD dynaEdge (55).



Hardware e Software

Existem dois componentes básicos em um sistema de RA: hardware e software (56). Segundo os autores, o hardware engloba os dispositivos de entrada, os displays, processadores e redes e o software contempla controladores de simulação e animação, ferramentas de autoria, banco de dados de objetos virtuais, funções de interação, rastreamento e interfaces multimodais. Para interagir com precisão com objetos virtuais no ambiente do mundo real, componentes de hardware e software precisam estar coordenados pelo sistema de RA (3).

Para a utilização de RA em AEC é fundamental observar requisitos de hardware e software, pois esses podem representar desafios para as aplicações desejadas.

Hardware: processador, conexão e capacidade de armazenamento

De forma semelhante à escolha de um computador, para a seleção de HMDs, devem ser observadas as características de *hardware*, visto que o desempenho do sistema de RA depende de fatores como processamento, capacidade de armazenamento e conexão com a rede.

A qualidade da execução da virtualidade projetada sobre a cena real depende da potência do processador do dispositivo, que realiza em tempo real: processamento e renderização de imagens, reprodução de som, execução hápticaⁱⁱ, controles multimodais, rastreamento por sensores, entre outros (56). Para a visualização em RA funcionar em tempo real e apresentar baixa latênciaⁱⁱⁱ, é importante observar a potência de processamento do dispositivo. Os autores apontam que o tempo de latência máximo deve ser de 100 ms, implicando em uma taxa mínima de 10 quadros/s para a renderização visual.

Os HMDs podem ser autônomos com itens de *hardware* acoplados ou estar ligados a computadores (2). A miniaturização de componentes e duração de carga de bateria são elementos importantes para se obter um bom desempenho em HMDs independentes de computadores externos (56).

Para possibilitar a interação em RA entre pessoas através do trabalho colaborativo remoto, a rede do dispositivo precisa ser potente e estável. Existem diversas plataformas que comunicam dados de RA entre dispositivo e nuvem, através de redes, entretanto, é importante observar que o fluxo de informações através de redes móveis é influenciado pelas mudanças abruptas na largura de banda, as quais interferem na latência do sistema (46). Ademais, é importante observar a especificação do padrão de rede wireless do dispositivo, atentando para a velocidade e frequência oferecidos.

Fatores que afetam diretamente no *software* que pode ser instalado no HMD são a capacidade de armazenamento e o tipo de sistema operacional do dispositivo.

Software: possibilidade de desenvolvimento experiências customizadas em RA

Cada HMD fornece um suporte diferente para RA, seja por meio de um Software Development Kit (SDK), por WebXR ou aplicativos comerciais que podem ser instalados no dispositivo.

Os SDKs permitem o desenvolvimento de aplicações customizadas de RA, a partir de um conjunto de ferramentas e funções disponibilizadas por seus fabricantes. Alguns HMDs fornecem SDKs específicos (proprietários) para o equipamento, como o Vuzix Speech SDK, disponível para o HMD Vuzix M4000 (57), o Lumin SDK, utilizado pelo Magic Leap (58), Moverio SDK, desenvolvido para o Moverio BT-40S (13). Entretanto, alguns HMDs permitem que aplicações sejam desenvolvidas a partir de SDKs mais difundidos, como o Vuforia SDK, utilizado pelo HoloLens (21). Os SDKs proprietários apresentam métodos de interação que diferem significativamente dos utilizados em multiplataformas. Tais métodos devem ser considerados para projetar a interface do usuário de um aplicativo destinado a ser executado nestes dispositivos.

A tecnologia de WebXR fornece as interfaces necessárias para o desenvolvimento e hospedagem de experiências e aplicações de RV e RA na web. A *Application Programming Interface* (API) de WebXR fornece acesso aos recursos de entrada e saída de dispositivos HMDs (59), gerenciando o tempo, a programação e os vários pontos de vista da cena apresentada ao usuário (60). WebXR não é uma ferramenta para desenvolvimento e edição de modelos - entretanto, apresenta os modelos na web, permitindo interação e visualização.

Entre as vantagens do WebXR estão a implantação instantânea da experiência através de navegador habilitado para plataformas XR, o acesso imediato à mesma sem a necessidade de baixar aplicativos, a renderização de cenas 3D para o dispositivo em uma taxa de quadros apropriada e controlada por *Web Graphics Library* (WebGL) (61). A WebGL é uma API utilizada para criar gráficos tridimensionais nos navegadores web e possui uma comunidade ampla de desenvolvedores e de recursos disponíveis (61). O HoloLens 2 e o Magic Leap são exemplos de HMDs para RA que suportam WebXR (21, 58).

Adicionalmente, é possível experienciar a RA em HMDs através de aplicativos instalados nos dispositivos. Tais aplicativos permitem a criação de RA por meio de uma interface gráfica com o usuário, não necessitando de conhecimentos em ciência da informação. Alguns aplicativos são voltados para utilização em AECO, dentre eles o Fuzor (62), compatível com Revit, ArchiCAD e Navisworks e HMDs como o Oculus, HTC Vive e o HoloLens.

Alguns fabricantes de *software* para AECO também oferecem uma versão de aplicativo para HMD, como o Sketchup Viewer for HoloLens (63) e o Trimble Connect for HoloLens (64), que oferece recursos em RA como medição de ambientes, compatibilização de projetos e lista de tarefas.

Tendo em vista estas possibilidades, é importante observar quais aplicativos são aceitos pelo sistema operacional do HMD para facilitar a criação de experiências RA para atividades em AECO, dado que a programação computacional foge do conhecimento tradicional dos profissionais da área. Para verificar quais aplicativos são aceitos pelos HMDs é importante consultar a loja de aplicativos dos dispositivos. Aplicativos como Holo-PreCon (65) e Vyzn (66), utilizados para visualizar e interagir com modelos 3D de projetos.

HMDS PARA RA EM AECO (DISCUSSÃO)

AECO é uma área ampla e envolve diversas atividades em diferentes ambientes. Tais ambientes vão desde os escritórios de projetos, seguros e controlados, onde as experiências em RA passam por concepção de projetos, reuniões de apresentação ou compatibilização com os envolvidos, até o dia a dia dos canteiros de obra, que exigem protocolos de segurança e cuidados específicos.

A interação e colaboração entre envolvidos em todo o ciclo de vida de uma edificação é fundamental. Assim, para as reuniões de projeto, obra ou até mesmo para processos de manutenção e operação da edificação, os dispositivos HMD ópticos devem ser considerados. Por permitirem a visualização simultânea do conteúdo virtual e do mundo real são mais seguros e indicados para o processo de comunicação e colaboração das partes.

Considerando que, em AECO, trabalha-se com projetos de grandes dimensões, como edificações ou desenho urbano, o campo de visão é um fator importante a ser observado. Para esse fim, quanto mais amplo o campo de visão, mais adequada a visualização do ambiente misturado, propiciando a visualização da RA mais próxima do olho humano. Ainda, é importante ressaltar, que os dispositivos monoculares podem restringir o campo de visão

das imagens projetadas, dificultando a visualização adequada em AECO. Por esse motivo, os dispositivos binoculares são a melhor opção, ressaltando os holográficos, que independem da paralaxe para a sensação de profundidade. Ademais, tais dispositivos, causam menos fadiga visual, fator importante para o conforto do usuário em atividades mais longas.

Em uma experiência em AECO, a resolução da imagem virtual tem o potencial de impactar no entendimento da cena composta e na qualidade da apresentação. Isso porque, quanto melhor a resolução, mais o usuário tem a percepção de que os dois mundos coexistem em uma única cena. Assim, em situações como apresentação e discussão de projetos, é importante que a consistência pictórica entre realidade e virtualidade seja expressiva, para existir a sensação de realismo do objeto virtual projetado, exigindo alta resolução de vídeo. Por outro lado, a resolução pode ser menor em situações como a visualização da localização de tubulações embutidas ou da compatibilização de projetos.

A ergonomia é um fator importante a se observar para a seleção de HMDs, considerando que o dispositivo pode ser usado por um longo tempo em canteiros de obras. Além disso, é importante considerar também, a resistência do HMD às intempéries e condições desfavoráveis, como a sujeira e poeira da obra ou até mesmo possíveis quedas em pisos irregulares no percurso. Deve-se ainda verificar a possibilidade de acoplar o dispositivo aos capacetes de segurança, itens obrigatórios em obras onde há risco constante de acidentes. Outra questão a ser considerada é o peso do HMD, visto que poderá ser utilizado por atividades mais extensas, causando desconforto.

Os HMDs fornecem, ainda, mecanismos de interação que podem fazer diferença principalmente no uso em canteiros de obra ou áreas de produção. Tais recursos beneficiam a liberdade de movimentos das mãos do usuário ao disponibilizarem, embutidos no dispositivo, recursos como *trackpads*, sensores de movimento dos olhos e microfones, facilitando a comunicação entre usuário e sistema durante tarefas em campo.

Ademais, para experiências de RA em canteiros de obra, onde há necessidade de locomoção por grandes áreas, é necessário verificar a possibilidade de utilização de HMDs autônomos, que ofereçam processamento adequado, duração de bateria suficiente para as atividades propostas, conexão potente e estável, aliados ao baixo peso e ergonomia do conjunto - favorecendo a mobilidade e o conforto.

Para experiências de RA em escritórios, em que mobilidade não seja uma demanda, o uso de HMDs baseados em vídeo são uma opção. Tais dispositivos, quando dependentes de um PC para funcionar, oferecem custos reduzidos. Dado que, sempre existe uma preocupação do valor da tecnologia utilizada, o custo do dispositivo tem que estar nos valores médios de mercado e dentro das possibilidades de investimento.

Vale observar a importância dos sistemas de rastreamento e posicionamento oferecidos pelos dispositivos no contexto de uso. Para ambientes internos, sistemas baseados em visão computacional são mais adequados, visto que o GPS não funciona com a mesma eficácia que para ambientes externos, restringindo o uso de sistemas baseados em sensores. Já em ambientes externos, esses apresentam melhor desempenho. Nessa situação, os dispositivos baseados somente em visão computacional podem apresentar

problemas de rastreamento relacionados à intensidade ou escassez de luz, ou mesmo, à suspensão de partículas na obra. Os sistemas híbridos são eficazes em ambientes externos e internos, tornando-se uma opção mais adequada para os profissionais que trabalham em contextos diversos.

Adicionalmente, é fundamental que se observe as soluções de software disponibilizadas pelos dispositivos. Dado que a ciência da informação não é uma especialidade dos profissionais de AECO, a busca por um HMD adequado deve passar pela análise de quais programas e aplicativos dessa área são oferecidos pelos fabricantes ou podem ser instalados no dispositivo.

Por fim, foi desenvolvida a Tabela 1, que correlaciona as demandas comuns nas atividades; o ambiente em que costumam acontecer; as características fundamentais a serem observadas para a seleção de um HMD; e a indicação das etapas do ciclo de vida da edificação que se relacionam com tais demandas.

Tabela 1: Correlação entre as características fundamentais e atividades em AECO.

DEMANDAS GERAIS	AMBIENTE	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS	ETAPAS DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO
Longo tempo de uso do HMD	interno ou externo	Portabilidade com baixo peso e ergonomia: para maior conforto e mobilidade Visualização binocular: para maior conforto visual Mecanismos de interação: promovendo liberdade das mãos Hardware com alta capacidade de bateria	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção
Longos percursos utilizando o HMD	interno ou externo	Portabilidade com baixo peso e ergonomia: para maior conforto e mobilidade Visualização binocular: para maior conforto visual Mecanismos de interação: promovendo liberdade das mãos Hardware com alta capacidade de conexão e de bateria Sistemas de rastreamento e posicionamento baseados em sensores ou híbridos: para promover a projeção estável da virtualidade Resistência ao intemperismo e ambientes agressivos: para garantir a integridade do HMD	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção
Visualização em campo aberto	externo	Campo de visão amplo: para melhor visualização do ambiente composto na totalidade Luminância, contraste, brilho e transparências adequados: para melhor qualidade da visualização Sistemas de rastreamento e posicionamento baseado em sensores ou híbridos: para promover a projeção estável da virtualidade Resistência ao intemperismo e ambientes agressivos: para garantir a integridade do HMD	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo • Concepção e desenvolvimento de Projetos • Apresentação e discussão de projetos • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção
Visualização em ambiente fechado e coberto	interno	Campo de visão amplo: para melhor visualização da virtualidade no todo	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo

DEMANDAS GERAIS	AMBIENTE	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS	ETAPAS DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO
		<p>Luminância, contraste, brilho e transparências adequados: para melhor qualidade da visualização</p> <p>Sistemas de rastreamento e posicionamento baseado na visão computacional: para promover a projeção estável da virtualidade</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concepção e desenvolvimento de Projetos • Apresentação e discussão de projetos • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção
Visualização com qualidade pictórica	interno ou externo	<p>Resolução alta: para melhor qualidade da imagem dos componentes virtuais</p> <p>Luminância, contraste, brilho e transparências adequados: para melhor qualidade da visualização</p> <p>Hardware com alta capacidade de processamento e de conexão: para melhor qualidade da visualização</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concepção e desenvolvimento de Projetos • Apresentação e discussão de projetos
Comunicação em tempo real	interno ou externo	<p>Hardware com alta capacidade de conexão: para qualidade e estabilidade da comunicação entre usuários</p> <p>Mecanismos de interação: promovendo liberdade das mãos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo • Concepção e desenvolvimento de Projetos • Apresentação e discussão de projetos • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção
Necessidade de desenvolvimento de experiências customizadas em RA	interno ou externo	<p>Hardware com alta capacidade de processamento, de conexão e de armazenamento: para melhor qualidade das experiências desenvolvidas</p> <p>Software com possibilidade de customização de experiências: atrelado à capacidade do profissional para desenvolvimento próprio de programas e aplicativos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Levantamento em campo • Concepção e desenvolvimento de Projetos • Apresentação e discussão de projetos • Execução de obra • Acompanhamento de obra • Operação e Manutenção

CONCLUSÃO

Esta pesquisa se propôs a identificar e levantar as características fundamentais de HMDs que precisam ser observadas para a seleção de dispositivos adequados para AECO, que atendam demandas específicas no ciclo de vida da edificação. Apesar de experiências em RA nessa área ainda serem reduzidas, há dispositivos, programas e aplicativos voltados para a mesma que viabilizam seu uso para as mais diversas aplicações.

A pesquisa identificou dispositivos que são: resistentes o suficiente para o uso em canteiros de obra, que oferecem mobilidade ao usuário ao longo de áreas extensas, com peso reduzido e alto desempenho, que funcionam em áreas internas ou externas e que possibilitam ainda, seu uso por profissionais com nenhum conhecimento em desenvolvimento de *software*. Portanto, durante a busca por um HMD, cabe ao profissional avaliar as características do dispositivo que melhor lhe atenda, considerando seu potencial de investimento. Nesse sentido, o artigo auxilia os mesmos a promover uma análise mais técnica antes da aquisição de um HMD, além de ampliar seu conhecimento.

As características descritas na pesquisa, apresentadas de forma didática, proporcionam aos profissionais de AECO a compreensão das especificações técnicas de HMDs que impactam em possíveis experiências a serem vividas em atividades de seu contexto profissional. Tais características foram relacionadas a possíveis usos e ambientes de trabalho em AECO através de uma análise de demandas específicas.

Vale ressaltar que a dinâmica do desenvolvimento tecnológico possibilita a evolução dos HMDs em curto período, e conseqüentemente, a obsolescência dos atuais dispositivos. Ainda, a aquisição de *startups* desenvolvedoras por grandes companhias, pode causar a extinção de alguns modelos. Por esses motivos, este artigo não se propôs a apontar um fabricante ou marca de HMD mais apropriados para AECO, e sim a apresentar uma importante discussão que favorece a tomada de decisão para seleção do dispositivo mais apropriado conforme a demanda do profissional.

Adicionalmente, as características fundamentais descritas podem auxiliar a seleção de HMDs em diferentes áreas, como entretenimento, medicina, indústria e ensino. Porém, faz-se necessário realizar uma correlação com as atividades específicas realizadas nessas áreas.

Pesquisas futuras podem contribuir com uma investigação e discussão ampliada dos softwares existentes para AECO, que permitam a utilização de RA através de HMDs, tendo em vista a gama de atuação dos profissionais da área.

REFERÊNCIAS

1. CUPERSCHMID, A. R. M., FREITAS, M. R. DE, and RUSCHEL, R. C. Tecnologias que suportam Realidade Aumentada empregadas em Arquitetura e Construção. Cadernos do PROARQ Rio de Janeiro [online]. 2012. P. 23. DOI <http://www.doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-756>.
2. MEALY, P. Virtual & Augmented Reality For Dummies. 1. Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. ISBN 978-1-119-48134-8.
3. CHI, H. L., KANG, S. C., and WANG, X. Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. Automation in Construction [online]. 2013. Vol. 33, p. 116-122. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.12.017>.
4. BEHZADAN, A. H., TIMM, B. W., and KAMAT, V. R. General-purpose modular hardware and software framework for mobile outdoor augmented reality applications in engineering. Advanced Engineering Informatics. 2008. Vol. 22, no. 1, p. 90-105. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aei.2007.08.005>.

5. ERDENEBAT, M.-U., LIM, Y.-T., KWON, K.-C., DARKHANBAATAR, N., and KIM, N. Waveguide-Type Head-Mounted Display System for AR Application. In: State of the Art Virtual Reality and Augmented Reality Knowhow. IntechOpen, 2018. p. 148. ISBN 1789231620.
6. SCHMORROW, D., NICHOLSON, D., LACKEY, S. J., ALLEN, R. C., NORMAN, K., and COHN, J. Virtual Reality in the Training Environment. In: VINCENZI, D.A., WISE, J.A., MOULOUA, M. and HANCOCK, P.A. (eds.), Human factors in Simulation and Training. 1. New York, NY, USA: CRC Press, 2009. p. 201-228. ISBN 1420072838.
7. ALBARELLI, A., CELENTANO, A., COSMO, L., and MARCHI, R. On the interplay between data overlay and real-world context using see-through displays. ACM International Conference Proceeding Series. 2015. Vol. 28, no. September, p. 58-65. DOI <https://doi.org/10.1145/2808435.2808455>.
8. KIYOKAWA, K. Head-Mounted Display Technologies for Augmented Reality. In : BARFIELD, W. (ed.), Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. 2. Londres: CRC Press, 2016. p. 59-84.
9. JERALD, J. The VR Book: Human-centered Design for Virtual Reality - Jason Jerald - Google Libri [online]. 2016. ISBN 9781970001129.
10. Google Glass. [online]. 2021. [Accessed 6 May 2021]. Available from: <https://www.google.com/glass/start/>.
11. TECHTUDO. [online]. 2021. [Accessed 21 May 2021]. Available from: <https://www.techtudo.com.br/tudo-sobre/samsung-hmd-odyssey.html>.
12. GAO, Q., LIU, J., HAN, J., and LI, X. Monocular 3D see-through head-mounted display via complex amplitude modulation. Optics Express. 2016. Vol. 24, no. 15, p. 4703-4708. DOI <https://doi.org/10.1364/oe.24.017372>.
13. EPSON. MOVERIO - BT-40/40S Support Tools. [online]. 2021. [Accessed 18 May 2021]. Available from: https://tech.moverio.epson.com/en/bt-40/sdk_download.html.
14. AZUMA, R. T. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments [online]. 1997. Vol. 6, no. 4, p. 355-385.
15. WAGNER, D., NOUI, L., and STANNARD, A. Why is making good AR displays so hard? LinkedIn [online]. 2019. [Accessed 29 June 2021]. Available from: <https://www.linkedin.com/pulse/why-making-good-ar-displays-so-hard-daniel-wagner/>.
16. BARFIELD, W., HENDRIX, C., BJORNESETH, O., KACZMAREK, K. A., and LOTENS, W. Comparison of Human Sensory Capabilities with Technical Specifications of Virtual Environment Equipment. Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1995. Vol. 4, no. 4, p. 329-356. DOI <https://doi.org/10.1162/pres.1995.4.4.329>.
17. LANIER, J., MATEEVITSI, V., RATHINAVEL, K., SHAPIRA, L., MENKE, J., THERIEN, P., HUDMAN, J., SPEIGINER, G., WON, A. S., BANBURSKI, A., BENAVIDES, X., AMORES, J., LURASHI, J. P., and CHANG, W. The RealityMashers: Augmented Reality Wide Field-of-View Optical See-Through Head Mounted Displays. In: IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct Proceedings. IEEE, 2016. p. 141-146. ISBN 9781509037407.
18. WU, W., TOŠĆ, I., BERKNER, K., and BALRAM, N. Depth-Disparity calibration for augmented reality on binocular optical see-through displays. Proceedings of the 6th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys 2015. 2015. No. March 2015, p. 120-129. DOI <https://doi.org/10.1145/2713168.2713171>.
19. VUZIX. [online]. 2021. [Accessed 21 November 2021]. Available from: <https://www.vuzix.com/products/m4000-smart-glasses>.
20. PONZONI, F. J., and DISPERATI, A. A. 5363-PUD/049: ESTEREOSCOPIA E PARALAXE NA DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIAS VERTICAIS MEDIANTE O USO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS [online]. São José dos Campos, 1992.

- Available from: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.22.58/doc/publicacao.pdf>.
21. MICROSOFT. HoloLens 2. [online]. 2021. [Accessed 22 April 2021]. Available from: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>.
 22. MELZER, J. E. Overcoming the field-of-view/resolution invariant in head-mounted displays. *Helmet- and Head-Mounted Displays III*. 1998. Vol. 3362, no. August 1998, p. 284. DOI <https://doi.org/10.1117/12.317441>.
 23. TAN, G., LEE, Y.-H., ZHAN, T., YANG, J., LIU, S., ZHAO, D., and WU, S.-T. Foveated imaging for near-eye displays. *Optics Express*. 2018. Vol. 26, no. 19, p. 25076. DOI <https://doi.org/10.1364/oe.26.025076>.
 24. KIM, J., JEONG, Y., STENGL, M., AKŞIT, K., ALBERT, R., BOUDAUD, B., GREER, T., KIM, J., LOPES, W., MAJERCIK, Z., SHIRLEY, P., SPJUT, J., MCGUIRE, M., and LUEBKE, D. Foveated AR: Dynamically-foveated augmented reality display. *ACM Transactions on Graphics*. 2019. Vol. 38, no. 4. DOI <https://doi.org/10.1145/3306346.3322987>.
 25. ZHAN, T., YIN, K., XIONG, J., HE, Z., and WU, S. T. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges. *iScience*. 2020. Vol. 23, no. 8, p. 1-13. DOI <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101397>.
 26. SKARREDGHOST. Kelly Peng reveals Kura 150° FOV AR glasses expected price and release date. THE GOSTH HOWLS [online]. 2021. [Accessed 21 April 2021]. Available from: <https://skarredghost.com/2021/02/18/kura-150-fov-release-date-price/>.
 27. KURA. [online]. 2021. [Accessed 21 November 2021]. Available from: www.kura.tech/products.
 28. TAYLOR, A. E. F. *The Illumination Fundamentals*. Rensselaer, 2000.
 29. KIM, C. H., and KIM, K. S. Development of Sky Luminance and Daylight Illuminance Prediction Methods for Lighting Energy Saving in Office Buildings. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 4, p. 316-330. DOI <https://doi.org/10.3390/en12040592>.
 30. HA, H., KWAK, Y., KIM, H., and SEO, Y. Discomfort luminance level of head-mounted displays depending on the adapting luminance. *Color Research & Application* [online]. 25 August 2020. Vol. 45, no. 4, p. 622-631. DOI <https://doi.org/10.1002/col.22509>.
 31. PELI, E. Contrast in complex images. *Journal of the Optical Society of America A*. 1990. Vol. 7, no. 10, p. 2032. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032>.
 32. OKU, T., AKUTSU, K., KUWAHARA, M., YOSHIDA, T., KATO, E., AIKI, K., MATSUMURA, I., NAKANO, S., MACHIDA, A., and MUKAWA, H. High-luminance see-through eyewear display with novel volume hologram waveguide technology. *Digest of Technical Papers - SID International Symposium*. 2015. Vol. 46, no. Book 1, p. 192-195. DOI <https://doi.org/10.1002/sdtp.10308>.
 33. STARNER, T. Fundamentals of wearable computers and augmented reality. In : BARFIELD, W. (ed.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*, Second Edition. 2. Londres, 2015. p. 13-30. ISBN 9781482243512.
 34. KURA. *The Beginning of Real Human Augmentation - Kura Gallium*. KURA GALLIUM [online]. 2021. [Accessed 19 April 2021]. Available from: <https://www.kura.tech/>.
 35. YANG, X., and CHENG, K. T. T. Scalable Augmented Reality on Mobile Devices: Applications, Challenges, Methods, and Software. In : BARFIELD, W. (ed.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2. Londres: CRC Press, 2016. p. 195-223.
 36. TAKETOMI, T. Image-Based Geometric Registration for Zoomable Cameras Using Precalibrated Information. In : BARFIELD, W. (ed.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2. Londres: CRC Press, 2016. p. 125-150.

37. KRESS, B. Optical Architectures for Mixed-Reality Headsets. Bellingham: SPIE, 2020. ISBN 9781510634336.
38. KRESS, B. Optics for Smart Glasses, Smart Eyewear, Augmented Reality, and Virtual Reality Headsets. In: BARFIELD, W. (ed.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2. Londres: CRC Press, 2016. p. 86-123.
39. GOOGLE. Google VR - Degrees of freedom. [online]. 2021. [Accessed 21 June 2021]. Available from: <https://developers.google.com/vr/discover/degrees-of-freedom>.
40. XU, K., CHIA, K. W., and CHEOK, A. D. Real-time camera tracking for marker-less and unprepared augmented reality environments. *Image and Vision Computing*. 2008. Vol. 26, no. 5, p. 673-689. DOI <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2007.08.015>.
41. SATOH, K., ANABUKI, M., YAMAMOTO, H., and TAMURA, H. A hybrid registration method for outdoor augmented reality. *Proceedings - IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, ISAR 2001*. 2001. P. 67-76. DOI <https://doi.org/10.1109/ISAR.2001.970516>.
42. BILLINGHURST, M., and KATO, H. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In: *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR' 99)* [online]. San Francisco, 1999. p. 85-94. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/803809>.
43. KIM, K., KIM, H., and KIM, H. Image-based construction hazard avoidance system using augmented reality in wearable device. *Automation in Construction* [online]. 2017. Vol. 83, no. 2017, p. 390-403. DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.014>.
44. ARANTES, W. V. Uma Arquitetura para o uso de Sistemas de Localização Outdoor e Indoor por meio de Dispositivos Móveis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
45. FANG, D., XU, H., YANG, X., and BIAN, M. An Augmented Reality-Based Method for Remote Collaborative Real-Time Assistance: from a System Perspective. *Mobile Networks and Applications*. 2019. Vol. 25, no. 2, p. 412-425. DOI <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01244-4>.
46. CHATZOPOULOS, Di., BERMEJO, C., HUANG, Z., and HUI, P. Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5, no. c, p. 6917-6950. DOI <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2698164>.
47. NAIMARK, L., and FOXLIN, E. Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker. In: *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR' 02)*. Darmstadt, 2002.
48. BELLILE, V. G., BOURGEOIS, S., LARNAOUT, D., and TAMAAZOUSTI, M. Applications of Augmented Reality for the Automotive Industry. In: BARFIELD, W. (ed.), *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. 2. Londres : CRC Press, 2016. p. 434-455.
49. APPLE. ARKit. [online]. 2021. [Accessed 29 June 2021]. Available from: <https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit/>.
50. GOOGLE. ARCore. [online]. 2021. [Accessed 29 June 2021]. Available from: <https://developers.google.com/ar>.
51. CUPERSCHMID, A. R. M., GRACHET, M. G., and FABRÍCIO, M. M. Development of an Augmented Reality environment for the assembly of a precast wood-frame wall using the BIM model. *Ambiente Construído*. 2016. Vol. 16, no. 4, p. 63-78. DOI <http://www.doi.org/10.1590/s1678-86212016000400105>.
52. AMORIM, J. A., MATOS, C. E. A. B., CUPERSCHMID, A. R. M., GUSTAVSSON, P. M., and POZZER, C. T. Augmented Reality and Mixed

- Reality Technologies: Enhancing Training and Mission Preparation with Simulations. In: M&S Support to Transitioning Forces and Emerged/Emerging Disruptive M&S Technologies [online]. STO, 2013. p. 0901-0917.
53. REALWARE. HMT-1Z. [online]. 2021. [Accessed 18 May 2021]. Available from: <https://realwear.com/products/hmt-1z1>.
 54. RADKOWSKI, R., and STRITZKE, C. Interactive hand gesture-based assembly for augmented reality applications. ACHI 2012 - 5th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions. 2012. No. c, p. 303-308.
 55. DYNABOOK. DynaEdge AR Smart Glasses. [online]. 2021. [Accessed 18 May 2021]. Available from: <https://us.dynabook.com/smartglasses/products.html>.
 56. TORI, R., KIRNER, C., and SISCOOTTO, R. Fundamentos e tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada [online]. 1. Belém : SBC, 2006. ISBN 8576690683.
 57. VUZIX CORPORATION. M4000. [online]. 2021. [Accessed 19 April 2021]. Available from: <https://www.vuzix.com/products/m4000-smart-glasses>.
 58. MAGICLEAP. Magic Leap's Software Development Kit. [online]. 2021. [Accessed 18 May 2021]. Available from: <https://www.magicleap.care/hc/en-us/articles/360008653312-Magic-Leap-s-Software-Development-Kit>.
 59. W3. WEBXR device API. [online]. 2021. [Accessed 24 May 2021]. Available from: <https://www.w3.org/TR/webxr/#terminology>.
 60. MDN. WebXR Device API. [online]. 2021. [Accessed 24 May 2021]. Available from: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API.
 61. KHRONOS. WebGL. [online]. [Accessed 21 May 2021]. Available from: https://www.khronos.org/webgl/wiki/Getting_Started.
 62. KALLOCTECH. Fuzor. [online]. 2021. [Accessed 24 May 2021]. Available from: <https://www.kalloctech.com/construction.jsp>.
 63. TRIMBLE. Sketchup Viewer. [online]. 2021. [Accessed 24 May 2021]. Available from: <https://www.sketchup.com/pt-BR/products/sketchup-viewer>.
 64. TRIMBLE. Field Solutions for Building Construction. [online]. 2021. [Accessed 24 May 2021]. Available from: <https://fieldtech.trimble.com/en/>.
 65. MICROSOFT. Holo-PreCon Demo. [online]. 2021. [Accessed 30 June 2021]. Available from: https://www.microsoft.com/en-us/p/holo-precon-demo/9ncxfp9ddpgc?cid=msft_web_collection&activetab=pivot:overviewtab.
 66. MICROSOFT. Vyzn. [online]. 2021. [Accessed 30 June 2021]. Available from: https://www.microsoft.com/en-us/p/vyzn/9n3pd2qrhk7m?cid=msft_web_collection&activetab=pivot:overviewtab.

NOTAS DE FIM

ⁱ Estações fixas que se comunicam com os dispositivos, na maioria das vezes através de bluetooth.

ⁱⁱ Sensível ao tato.

ⁱⁱⁱ A latência é definida como o tempo de atraso do movimento da cabeça até a renderização da imagem, que causa uma inconsistência entre as sensações visuais e vestibulares, podendo causar sensações de desorientação e vertigem.

Submetido: 30/11/2021
Aceito: 01/07/2022