

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
MESTRADO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA
INDUSTRIAL

JANDSON SANTOS NUNES

Realidade Aumentada em Contexto Industrial: Um Método para Persistência Espacial no HoloLens

Salvador, 2020

JANDSON SANTOS NUNES

Realidade Aumentada em Contexto Industrial: Um Método para Persistência Espacial no HoloLens

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Valter de Senna

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ingrid Winkler

Salvador, 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

N972r Nunes, Jandson Santos

Realidade aumentada em contexto industrial: um método para persistência espacial no HoloLens / Jandson Santos Nunes. – Salvador, 2020.

82 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Valter de Senna.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Ingrid Winkler.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020.

Inclui referências.

1. HoloLens. 2. Âncoras. 3. Persistência espacial. 4. Realidade aumentada. 5. Realidade mista. 6. Indústria. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Senna, Valter de. III. Winkler, Ingrid. IV. Título.

CDD 005.1

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “Realidade Aumentada em Contexto Industrial: Um Método para Persistência Espacial no HoloLens” apresentada no dia 21 de outubro de 2020, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Digitally signed by: Valter de Senna
Date and time: 10/23/2020 7:14:19 PM

Orientador:

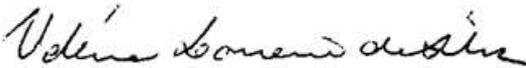
Prof. Dr. Valter de Senna
SENAI CIMATEC

Assinado digitalmente por: Ingrid Winkler
O tempo: 27-10-2020 10:59:16

Coorientadora:

Prof.^a Dr.^a Ingrid Winkler
SENAI CIMATEC

Membro Interno:


Prof.^a Dr.^a Valéria Loureiro da Silva
SENAI CIMATEC

Membro Externo:


Prof. Dr. Antonio Lopes Apolinário Junior
UFBA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os agentes que contribuíram e trilharam comigo este percurso cheio de obstáculos até a conclusão do mestrado. Foram muitos desafios e não teria superado todos eles sem a ajuda de vocês.

Gratidão aos meus orientadores Prof. Dr. Valter de Senna e Prof^a. Dr^a. Ingrid Winkler pela confiança que depositaram neste trabalho. Aos membros da banca Prof. Dr. Antônio Lopes Apolinário Junior e Prof^a. Dr^a. Valéria Loureiro da Silva pelas contribuições na qualificação e na defesa, muito obrigado.

Aos amigos da Área de Software do SENAI-CIMATEC, incluindo os que já saíram para novas oportunidades. Muito obrigado pelas palavras de apoio e incentivo. Ao pessoal do "Barril" por me apresentar ao universo de realidade aumentada e compartilhar toda essa experiência e oportunidade de aprendizado.

Aos colegas do Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, professores e colegas de turma. Obrigado pela trajetória que me ajudaram a trilhar.

Concluo agradecendo aos meus sogros Luis Carlo e Sayonara por todo acolhimento familiar, aos meus pais Jesuino e Sonia pelo dom da vida e pelos sacrifícios que já fizeram para me proporcionar uma vida digna e a minha irmã Suelen. Ao amor da minha vida Maria Ivana Guerra, por todo suporte e força que precisei. Sem você ao meu lado eu não teria conseguido. MUITÍSSIMO obrigado a todos.

RESUMO

A comunidade científica expõe resultados da aplicação de Realidade Aumentada (RA) na indústria, que estimulam pesquisas e desenvolvimento de soluções com essa tecnologia. Em meio aos desafios comuns de cenários industriais (baixa luminosidade, espaços de grandes proporções, objetos móveis, etc.), os objetos virtuais em soluções de RA devem ser exibidos com precisão e acurácia. O HoloLens é um dispositivo que fornece todos os elementos da arquitetura básica de sistemas de realidade aumentada e permite associar pontos de persistência espacial (âncoras) aos objetos virtuais com objetivo de exibir hologramas com precisão e acurácia. Contudo, o raio de atuação das âncoras é limitado a três metros e sua utilização em excesso compromete a performance computacional do dispositivo. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é propor um método para persistência espacial no HoloLens, baseado no conceito de âncora, para alinhamento de hologramas com acurácia e precisão. Para isso, a metodologia utilizada divide-se em quatro etapas: caracterizar os mecanismos de localização e rastreamento presentes no HoloLens, revisar a literatura sobre a utilização de âncoras em ambientes industriais, propor um método para persistência espacial no HoloLens e avaliar experimentalmente o método proposto quanto à precisão e acurácia na exibição dos objetos virtuais. Como resultados obtidos, a avaliação do método para persistência espacial no HoloLens apresentou características que favorecem sua utilização em contexto industrial, com acurácia de 0,011m e precisão de 0,0077m em um ambiente com volume de 600m³. Conclui-se que o método para persistência espacial no HoloLens proposto é viável para utilização em soluções de RA aplicadas à indústria ou outros contextos com restrições e demandas semelhantes.

Palavras-chave: HoloLens, Âncoras, Persistência Espacial, Realidade Aumentada, Realidade Mista, Indústria

ABSTRACT

Reports of results from the application of augmented reality on industry encourage researches and solution developments with this technology. Amid the common challenges of industrial scenarios (low light, large spaces, moving objects, etc.), the virtual objects in augmented reality solutions must be showed precisely and accurately. HoloLens is a device that provides all architectural basic elements of augmented reality systems and allows associating spacial persistence points (anchors) to virtual objects in order to show holograms precisely and accurately. However, the anchors operation radius is limited to three meters and their excessive use compromises the computational performance of the device. Therefore, the target of this work is to propose a method for spatial persistence on HoloLens that use the anchor concept to align holograms with accuracy and precision. To do this, the used methodology was divided in four stages: characterize the localization and tracking mechanisms on the HoloLens, do a review of literature about the use of anchors in industrial environments, propose a topology model to anchors and, evaluate experimentally the topology model by the precision and accuracy to display virtual objects. As a result the method for spatial persistence on HoloLens presents characteristics that make it favorable to use in industrial contexts as 0.011m of accuracy and 0.0077m of precision in an environment with a volume of 600m³. It is concluded that the method for spatial persistence on HoloLens proposed is viable to apply augmented reality solutions on industrial contexts or another contexts with similar restrictions and demands.

Keywords: *HoloLens, Anchor, Spatial Persistence, Topology, Augmented Reality, Mixed Reality, Industry*

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Metodologia da pesquisa	4
2	Localização, Reconhecimento Espacial e Âncoras no HoloLens	6
2.1	Reconhecimento espacial no HoloLens	6
2.2	Âncoras: pontos de persistência espacial no HoloLens	7
2.3	Calibração	8
2.3.1	Reconhecimento de marcadores na calibração	9
3	Materiais e Métodos	10
3.1	Revisão Sistemática de Literatura: Âncoras e HoloLens	10
3.1.1	Planejamento	10
3.1.2	Definição de escopo	11
3.1.3	Pesquisa	11
3.1.4	Avaliação	12
3.2	Artefatos para criar aplicativo e analisar dados de ensaio	13
4	Resultados e Discussão	15
4.1	Síntese e análise de trabalhos correlatos	15
4.2	Restrições do método para persistência espacial no HoloLens	19
4.2.1	Baixa incidência de infravermelho	20
4.2.2	Superfícies claras e pouco reflexivas	20
4.2.3	Local de calibração fixo	21
4.2.4	Manutenção do identificador de rede WiFi	22
4.2.5	Continuidade do mapeamento	22
4.3	Método para persistência espacial: distribuição de âncoras no ambiente	23
4.3.1	1º Passo: definir a posição e orientação da âncora primordial	23
4.3.2	2º Passo: definir a hierarquia entre âncora e objetos virtuais	24
4.3.3	3º Passo: definir procedimento para criação de nova âncora	24
4.4	Avaliação do método para persistência espacial no HoloLens	27
4.4.1	O aplicativo de ensaio	32
4.5	Resultados do ensaio	33
4.6	Discussão	39
5	Conclusão	41
5.1	Considerações finais	42
A	Apêndice: Código fonte do aplicativo de ensaio	45
A.1	Classes genéricas do padrão MVC	45

A.2	<i>Main Scene</i>	47
A.2.1	Main (ViewModel, Controller e View)	48
A.2.2	Scene Manager Service	49
A.3	<i>Menu Steps Scene</i>	52
A.3.1	Menu Steps (ViewModel, Controller e View)	52
A.4	Classes genéricas para as etapas	53
A.5	<i>Setup Scene</i>	57
A.5.1	Setup (Model, Controller, View)	58
A.6	<i>GetData Scene</i>	59
A.6.1	GetData (Model, Controller, View)	60
B	Apêndice: Código fonte da análise de dados	61
	Referências	68

LISTA DE TABELAS

3.1	CrITÉRIOS de Convergência aplicados aos trabalhos encontrados na revisão de literatura	12
4.1	Coordenadas dos marcadores no ambiente de ensaio.	28
4.2	Endereços de âncoras e posições relativas dos objetos virtuais, conforme método proposto.	35
4.3	Sumário da distância (m) entre os objetos virtuais de referência e as amos- tras.	35

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sensores do HoloLens. 1) Câmeras de compreensão do ambiente. 2) Projetores a laser infravermelho. 3) Câmera de profundidade. 4) Câmera de alta definição. 5) Sensor de luminosidade (LIU et al., 2018).	6
2.2	Exemplo de mapeamento espacial no HoloLens (MICROSOFT, 2018).	7
2.3	Premissa de origem e direção dos eixos cartesianos no HoloLens.	8
4.1	Fluxograma da Revisão do Estado da Arte.	15
4.2	Relação entre âncoras e objetos virtuais que representam bandejas de plantas (HE et al., 2019).	19
4.3	Indicação de “buraco” em mapeamento espacial do HoloLens (MICROSOFT, 2018).	21
4.4	Esquematização para definição de espaçamento entre âncoras por eixo.	26
4.5	Linha de produção da indústria de confecção de camisetas, ambiente relevante da avaliação.	27
4.6	Marcador fiducial utilizado no ensaio.	29
4.7	Mapa de distribuição dos marcadores no ambiente relevante.	30
4.8	Locais de instalação dos marcadores no ambiente.	31
4.8	Locais de instalação dos marcadores no ambiente.	32
4.9	Ambiente virtual equivalente ao real, resultante do mapeamento realizado pelo HoloLens.	34
4.10	Disposição dos objetos virtuais e âncoras, com ambiente virtual em pano de fundo.	34
4.11	Gráfico de violino da distância entre os objetos virtuais de referência e as amostras.	35
4.12	Gráfico de violino da distância entre os objetos virtuais de referência e as amostras por posição.	36
4.13	Posição das amostras em relação aos objetos de referência.	38
A.1	Atributos dos componentes de <i>script</i> do <i>game object</i> MainView.	47
A.2	Atributos dos componentes de <i>script</i> do <i>game object</i> ImageTarget na cena Setup.	57
A.3	Atributos dos componentes de <i>script</i> do <i>game object</i> ImageTarget na cena GetData.	59

LISTA DE SIGLAS

AL	.....	Âncora Líder
CAL	.....	Coordenadas da Âncora Líder
CC	.....	Critério de Convergência
CIMATEC	.	Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia
EAL	.....	Endereço da Âncora Líder
HMDs	....	<i>Head-Mounted Displays</i>
PPGMCTI	.	Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu
RA	.....	Realidade Aumentada
SENAI	....	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
WWW	....	World Wide Web

1. INTRODUÇÃO

Azuma (2017, p.1) define Realidade Aumentada (RA) como “uma experiência imersiva que sobrepõe objetos 3D virtuais à visão direta do usuário do ambiente real circundante, gerando a ilusão de que esses objetos virtuais existem nesse espaço”. A evolução das tecnologias que dão suporte à realidade aumentada, especialmente na última década, tem fomentado o desenvolvimento de soluções para indústria em sintonia com este conceito (BOTTANI; VIGNALI, 2019). Nas iniciativas da indústria 4.0, a realidade aumentada é congruente com os seis princípios de *design* de projeto: interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação a serviços e modularidade (GATTULLO et al., 2019), tornando-se elemento centralizador e permitindo que os usuários sejam suavemente integrados ao ambiente digital (MASOOD; EGGER, 2019).

Casos de sucesso também estimulam a adoção de realidade aumentada na indústria. A exemplo, Neges et al. (2017) revelam economia de até 51% no tempo de localização de objetos, em comparação à realização desta atividade sem a respectiva aplicação de realidade aumentada. Contudo, alguns segmentos da indústria demandam maior maturidade tecnológica (MASOOD; EGGER, 2019). Atualmente, a taxa de crescimento anual composta do mercado de realidade aumentada industrial é projetada em cerca de 74% entre 2018 e 2025, devendo atingir a cifra de US\$ 76 bilhões em 2025 (BIS Research, 2018). Provavelmente, esse crescimento se sustente ou acelere conforme a maturidade de realidade aumentada e diversidade de aplicativos do setor (MASOOD; EGGER, 2019). Assim, empresas serão confrontadas com problemas decorrentes da implementação de realidade aumentada, agregando valor às iniciativas de pesquisa e desenvolvimento.

Desafios e oportunidades associados à aplicabilidade de realidade aumentada promovem debates em múltiplas áreas do conhecimento (LU et al., 2016). Alguns autores (SANNA et al., 2015; FUNK; KOSCH; SCHMIDT, 2016) concordam que instruções visuais são melhor assimiladas e o próprio conceito de realidade aumentada induz à necessidade de alinhamento desses elementos ao contexto real.

Entretanto, aferir a localização de objetos e rastrear os movimentos realizados

pelo usuário em soluções de realidade aumentada, de forma correta e precisa, não é trivial (RABBI; ULLAH, 2016).

Trabalhos recentes norteiam o desenvolvimento e a aplicação de realidade aumentada em contexto industrial (PALMARINI et al., 2018; MASOOD; EGGER, 2019; MARTINETTI et al., 2019; BOTTANI; VIGNALI, 2019). Em comum, eles evidenciam os desafios inerentes a este ambiente, citando a confiabilidade e escalabilidade no rastreamento do movimento dos dispositivos (MASOOD; EGGER, 2019; MARTINETTI et al., 2019); a calibração (BOTTANI; VIGNALI, 2019); e a contextualização precisa das informações em sobreposição ao ambiente real (MARTINETTI et al., 2019).

Fatores intervenientes como oclusão de marcadores, objetos móveis, eletromagnetismo, baixa luminosidade, entre outros, são frequentemente observados na indústria. Estes aspectos dificultam ou limitam a capacidade de determinar a localização e orientação de um dispositivo. Conseqüentemente, acrescentam falhas de rastreamento a um sistema de realidade aumentada e prejudicam a acurácia e precisão no alinhamento entre objetos reais e virtuais. Ações que mitiguem os efeitos destes fatores tornam-se objetos de pesquisas em realidade aumentada e são determinantes para eficiência das soluções propostas na indústria (PALMARINI et al., 2018; MASOOD; EGGER, 2019; MARTINETTI et al., 2019).

Do ponto de vista técnico, os componentes básicos de arquitetura de sistemas de realidade aumentada são câmeras, sistemas de rastreamento e interfaces com usuários (MASOOD; EGGER, 2019). Embora haja diversas formas de integrar estes elementos, destaque-se a relevância dos *Head-Mounted Displays*¹ (HMDs), por permitir o movimento dos operadores e o acesso as informações com as mãos livres (SYBERFELDT et al., 2016; MASOOD; EGGER, 2019).

Dentre os dispositivos de realidade aumentada disponíveis da atualidade, Liu et al. (2018) destacam o HoloLens, lançado em 2016 pela Microsoft Corporation, por ser um dispositivo autocontido de realidade aumentada, ou seja, possui todos os componentes básicos de arquitetura de sistemas de realidade aumentada em dispositivo único. Do-

¹Monitores Montados na Cabeça

tado de sensores, lentes e projetores holográficos, o HoloLens é capaz de reconhecer o ambiente (permitindo inclusive interatividade com as superfícies) e aferir sua própria localização. Este processo é feito de forma contínua e mantém o sistema atualizado sobre as mudanças ambientais, caracterizando assim sua autonomia para adaptar-se ao contexto.

As superfícies do mundo real são representadas no HoloLens por uma malha triangular, conectada a um sistema de coordenadas espaciais fixadas no ambiente mapeado. É possível associar objetos virtuais, denominados âncoras, à malha que reconstrói o ambiente real. A função destas âncoras é a manutenção dos metadados de localização e orientação relativos ao espaço real. A fabricante do dispositivo recomenda a utilização de âncoras em ambientes com dimensões superiores a cinco metros, a fim de alcançar maior estabilidade na exibição dos hologramas. Todavia, o uso de muitas das âncoras compromete a performance computacional do HoloLens, afetando a capacidade de autolocalização e a manutenção das posições dos hologramas (MICROSOFT, 2018).

A viabilidade da adoção do HoloLens em ambientes industriais tem sido objeto de discussões. Contudo, muitos trabalhos exploram apenas os aspectos organizacionais de realidade aumentada na indústria (LU et al., 2016; MASOOD; EGGER, 2019). Questões técnicas, como a sobreposição correta dos objetos virtuais no ambiente real, ainda são consideradas desafios, apontando que há carência por estudos neste sentido (BOTTANI; VIGNALI, 2019).

Diante do exposto surge o questionamento: como desenvolver soluções de realidade aumentada para ambientes industriais, utilizando o HoloLens para exibir hologramas alinhados aos objetos reais com acurácia e precisão, comprometendo minimamente seu desempenho computacional?

O objetivo geral deste trabalho é propor um método para persistência espacial no HoloLens, baseado no conceito de âncora, para alinhamento de hologramas com acurácia e precisão. Para alcançá-lo, foram cumpridos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os mecanismos de localização e rastreamento de objetos no HoloLens;
- Investigar métodos correlatos de persistência espacial no HoloLens;

- Definir um método para persistência espacial no HoloLens adaptado ao contexto industrial;
- Implementar o método para persistência espacial no HoloLens em aplicativo;
- Avaliar o desempenho de precisão e acurácia do método para persistência espacial no HoloLens proposto.

Além desta Introdução, o trabalho está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2 - Localização, Reconhecimento Espacial e Âncoras no HoloLens** - Sintetiza os mecanismos de localização e reconhecimento espacial presentes no HoloLens, promovendo uma fundamentação teórica sobre o dispositivo e seu funcionamento.
- **Capítulo 3 - Materiais e Métodos** - Descreve os procedimentos de pesquisa realizados para construção deste trabalho empírico com abordagem quantitativa.
- **Capítulo 4 - Resultados e Discussão** - Expõe a síntese e análise da revisão sistemática de literatura e propõe um método para persistência espacial no HoloLens, expondo e discutindo os resultados obtidos experimentalmente.
- **Capítulo 5 - Conclusão** - Apresenta as considerações finais e sugestões de pesquisas futuras.

1.1 Metodologia da pesquisa

Do ponto de vista metodológico, este trabalho desenvolveu-se em quatro etapas sequenciais, análogas à ordem dos objetivos específicos: caracterização dos mecanismos de localização e rastreamento presentes no HoloLens, revisão da literatura sobre a utilização de âncoras em ambientes industriais, proposição de método para persistência espacial no HoloLens e avaliação experimental do método proposto quanto à precisão e acurácia na exibição dos objetos virtuais.

A primeira etapa corresponde a descrição do HoloLens, seus principais componentes, mecanismos de localização e reconhecimento espacial. As documentações em páginas oficiais do dispositivo foram as bases de conhecimento majoritariamente utilizadas para construção do conteúdo do Capítulo 2.

Por conseguinte, a revisão sistemática de literatura foi o instrumento utilizado para identificação de trabalhos correlatos. A seção 3.1 descreve os procedimentos realizados para o levantamento bibliográfico que dá suporte à construção do método para persistência espacial no HoloLens, fundamentando-o em experiências documentadas por outras produções científicas.

Diante da compreensão do funcionamento do HoloLens e dos trabalhos correlatos, a terceira etapa da pesquisa foi a definição de um método para persistência espacial no HoloLens, capaz de atender o objetivo geral deste trabalho. Este método é descrito no Capítulo 4 e determina uma sequência de passos para estabelecer um arranjo de âncoras que garante um limite máximo de distanciamento para objetos virtuais.

Uma vez definido o método para persistência espacial no HoloLens, a última etapa da pesquisa consistiu na realização de uma avaliação experimental para o método proposto quanto à precisão e acurácia na exibição de hologramas no ambiente. A seção 4.4 descreve a elaboração de um aplicativo para HoloLens, que implementa o método proposto e define os indicadores utilizados na apuração dos resultados de ensaio.

2. LOCALIZAÇÃO, RECONHECIMENTO ESPACIAL E ÂNCORAS NO HOLOLENS

Este capítulo faz um panorama sobre os mecanismos de localização e reconhecimento espacial do HoloLens, apresentando fundamentação teórica sobre o dispositivo, seus sistemas embarcados e o conceito de calibração assumido pela pesquisa.

2.1 Reconhecimento espacial no HoloLens

O HoloLens é dotado de sensores, lentes e projetores holográficos, conforme ilustra a Figura 2.1. A integração destes componentes permite o reconhecimento do ambiente no entorno do dispositivo e a determinação de sua localização no espaço. As câmeras de profundidade e de compreensão ambiental são utilizadas para realizar o mapeamento do ambiente real em objeto virtual equivalente, por meio do algoritmo “KinectFusion” (NEWCOMBE et al., 2011). Este processo desenvolve uma malha triangular semelhante à Figura 2.2. Esta malha é continuamente atualizada pelo sistema, para que as mudanças ambientais sejam refletidas no contexto virtual. Embora os autores façam alusão ao Kinect, conjunto de sensores desenvolvido pela Microsoft como acessório para jogos, ele está contido no HoloLens. Para Liu et al. (2018), isso caracteriza a autoadaptabilidade do sistema ao contexto.



Figura 2.1: Sensores do HoloLens. 1) Câmeras de compreensão do ambiente. 2) Projetores a laser infravermelho. 3) Câmera de profundidade. 4) Câmera de alta definição. 5) Sensor de luminosidade (LIU et al., 2018).

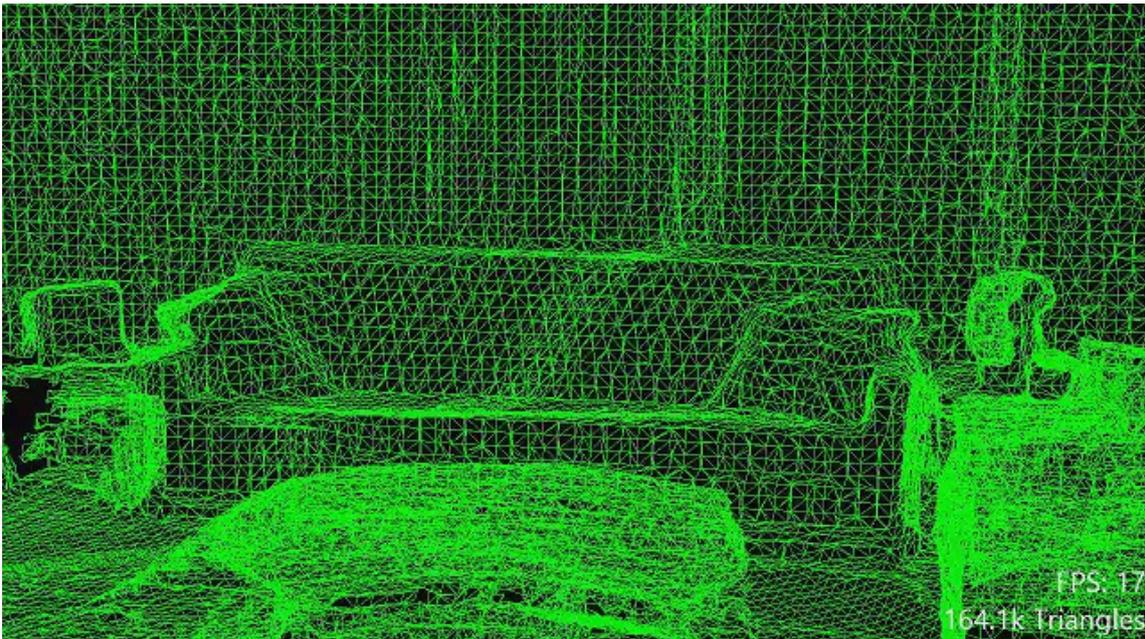


Figura 2.2: Exemplo de mapeamento espacial no HoloLens (MICROSOFT, 2018).

2.2 Âncoras: pontos de persistência espacial no HoloLens

O HoloLens permite associar a posição de objetos virtuais aos pontos da malha que reconstrói o ambiente real, dando a estes objetos o nome de âncoras. A função de uma âncora é a manutenção dos metadados de localização e orientação relativos ao espaço real. A documentação disponibilizada pela Microsoft recomenda a utilização de âncoras em ambientes com dimensões superiores a cinco metros, a fim de alcançar maior estabilidade na exibição dos hologramas (MICROSOFT, 2018).

Cýrus et al. (2020) concluíram que a utilização de âncoras tem maior eficácia em ambientes não monótonos, ou seja, locais sem uniformidade de cores ou formas. Os autores percebem melhoria de precisão e acurácia na exibição de objetos virtuais pelo HoloLens ao acrescentar cartazes coloridos no ambiente para promover variação de contraste. A malha criada no HoloLens captura as assimetrias do espaço real e fornece as características de localização armazenadas pelas âncoras. Assim, quanto mais heterogêneo for o ambiente, maiores serão os detalhes registrados sobre a posição das âncoras, tornando-as mais precisas e acuradas.

2.3 Calibração

Para determinar a posição do dispositivo no ambiente real, o sistema assume como premissa que a posição do equipamento no início da execução de uma aplicação é a origem do sistema de coordenadas cartesianas. Os eixos cartesianos são determinados a partir da frente do dispositivo, conforme ilustra a Figura 2.3. Então, utiliza-se o *Inertial Measurement Unit*¹ em conjunto com o algoritmo *Iterative Closest Point*², aplicado sobre o ambiente virtual para determinar o deslocamento realizado pelo dispositivo (LIU et al., 2018).

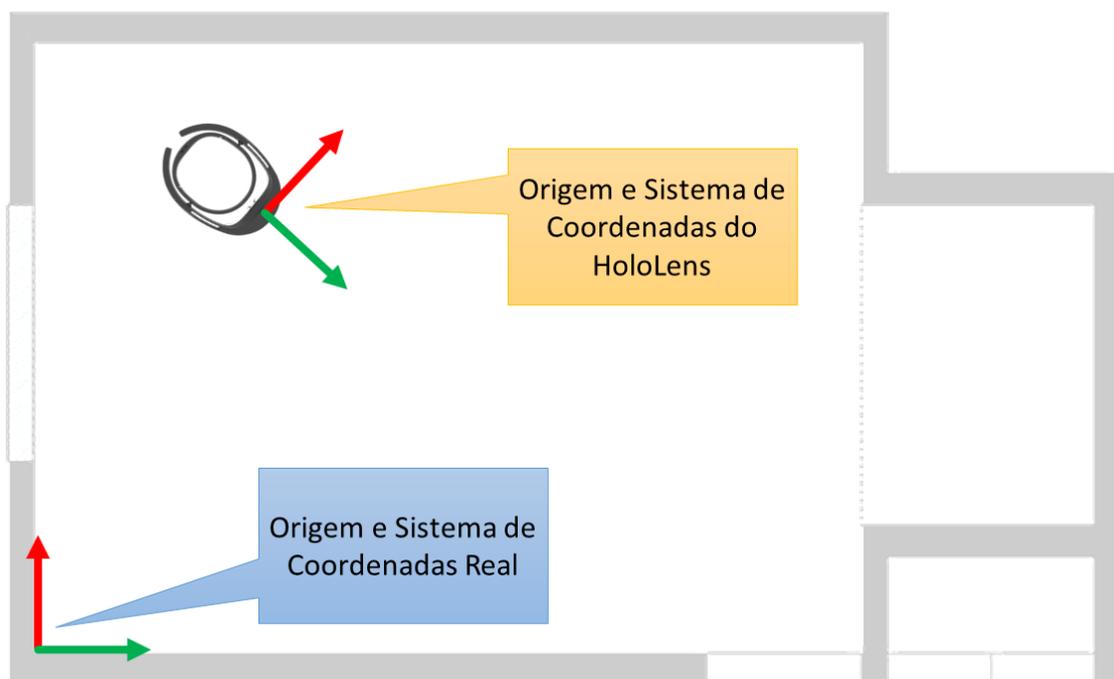


Figura 2.3: Premissa de origem e direção dos eixos cartesianos no HoloLens.

Isso significa que a cada nova execução de uma aplicação, uma nova origem e novas direções de eixos cartesianos serão assumidos. Sendo assim, para criar dinamicamente instâncias de objetos virtuais em pontos específicos do ambiente real, é necessário antes estabelecer o deslocamento entre o sistema de coordenadas do ambiente real e o sistema de coordenadas do ambiente virtual. A esta ação, dá-se o nome de calibração.

¹Unidade Medida Inercial

²Ponto Iterativo Mais Próximo

2.3.1 Reconhecimento de marcadores na calibração

Sistemas para rastreamento de posição baseados em marcações no ambiente são utilizados em soluções com realidade aumentada na medicina (KAMPHUIS et al., 2014), treinamento (LEE, 2012; WEBEL et al., 2013) e comunicação (ZHOU; ZHOU; ZHOU, 2015). Estes exemplos precedem inclusive o lançamento do HoloLens. Para suporte ao reconhecimento de marcadores fiduciais é comum a utilização de ferramentas de visão computacional como ARToolKit (KATO et al., 1999), ARTag (FIALA, 2005), Vuforia (PTC, 2018), entre outras.

Um marcador fiducial é um objeto utilizado como referência por um sistema de visão computacional. Sendo suas características previamente conhecidas pelo detector, pode-se detectá-lo facilmente e inferir sua posição (SAPORITO, 2017, p.11).

Estas ferramentas de visão computacional corroboram com Saporito (2017), por permitir o reconhecimento de imagens previamente cadastradas e fornecer dados de posição do dispositivo relativo a elas. O cadastro das imagens envolve informações sobre suas dimensões reais no ambiente. Assim, a partir do confronto de características da imagem real com o tamanho e a perspectiva da imagem reconhecida, os algoritmos de visão computacional conseguem estimar a posição relativa do dispositivo.

Em sua revisão de literatura, Palmarini et al. (2018) citam alguns trabalhos que adotam o reconhecimento de marcações fiduciais como estratégia para obter a informação de deslocamento entre as coordenadas reais e virtuais, ou seja, realizar a calibração. Sabendo-se as dimensões do marcador e sua posição relativa à origem do sistema de coordenadas real, é possível reconhecer o marcador utilizando visão computacional e determinar a posição do dispositivo em relação a ele. Consequentemente, obtém-se a posição do dispositivo em relação ao sistema de coordenadas do ambiente real.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa empírica com abordagem quantitativa. Ele contém os procedimentos metodológicos que dizem respeito à realização de uma revisão sistemática de literatura para identificação de trabalhos correlatos, além de uma seção dedicada as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do aplicativo de ensaio e na análise dos dados coletados.

3.1 *Revisão Sistemática de Literatura: Âncoras e HoloLens*

A compilação de estudos relevantes nesta pesquisa baseia-se na realização de uma revisão sistemática de literatura. A metodologia descrita por Booth, Sutton e Papaioannou (2016) é instrumento de organização, análise e síntese de publicações científicas. Ela permite identificar lacunas na literatura e fornece insumos para novos campos de pesquisa. Os autores definem sete etapas para execução de uma revisão sistemática de literatura: planejamento, definição de escopo, pesquisa, avaliação, síntese, análise e escrita. Cada etapa constitui metodologia própria, detalhadas nas subseções seguintes com exceção da síntese e análise que compõem o Capítulo 4 - Resultados e Discussão.

3.1.1 *Planejamento*

Nesta etapa, define-se o recorte de tempo da pesquisa e as bases de dados consultadas, sendo opcional a utilização de um software para gerenciamento das referências encontradas. As produções científicas internacionais compreendidas entre os anos de 2016 e 2020 foram selecionadas nas bases de dados IEEE Xplore (<www.ieeexplore.com>), Scopus (<www.scopus.com>) e Web of Science (<www.webofknowledge.com>). Este recorte corresponde ao período entre o lançamento do HoloLens pela Microsoft e o ano em que esta pesquisa está sendo desenvolvida. A gestão das referências foi feita no Mendeley (<www.mendeley.com>), software que provê um conjunto de funcionalidades para organização, manutenção e interatividade das publicações.

3.1.2 *Definição de escopo*

O processo para a definição de escopo desta revisão sistemática de literatura foi empírico, com base em buscas preliminares na literatura que estimularam uma tempestade de ideias. Esta etapa da revisão de literatura tem como meta a confecção de questões, para a comunidade científica, a respeito dos principais conceitos da pesquisa. Como resultado deste processo as seguintes questões foram definidas:

Q1: Em que circunstâncias as âncoras são utilizadas em aplicações para o HoloLens?

Q2: Como é feita a disposição de múltiplas âncoras no contexto?

3.1.3 *Pesquisa*

A etapa de pesquisa corresponde as buscas por respostas às questões definidas no Escopo (subseção 3.1.2), realizadas nas bases de conhecimento e no recorte de tempo definidos no Planejamento (subseção 3.1.1). Para isso, constrói-se uma sentença de busca, fundamentada na especificação da sintaxe reconhecida pela base de dados, com a proposta de selecionar as publicações elucidatórias aos questionamentos.

Nesta pesquisa, a sentença de busca utilizada foi:

("anchor" OR "spatial persistence point") AND
("hololens" OR "augmented reality" OR "mixed reality")

O conector *AND* em associação ao termo ("hololens" OR "augmented reality" OR "mixed reality"), têm a função de contextualizar o termo ("anchor" OR "spatial persistence point") na sentença. Desta forma, o resultado da busca foi intencionalmente restrito à literatura que contemplasse os dois termos em seu conteúdo. Em 22 de Janeiro de 2020, a execução da busca resultou numa coletânea de 17 publicações (05 na IEEE Xplore, 09 na Scopus e 03 na Web of Science). É importante ressaltar que a etapa de pesquisa não impõe a leitura de títulos, resumos ou qualquer outro campo dos trabalhos encontrados. Consequentemente, as publicações encontradas incluíam possíveis duplicatas nesta etapa da revisão sistemática de literatura.

3.1.4 Avaliação

Com intuito de reduzir a quantidade de documentos encontrados na etapa de Pesquisa (subseção 3.1.3), esta etapa determina os critérios que restringem o resultado aos documentos que sejam relevantes para responder as questões do trabalho. A eliminação de duplicatas reduziu a quantidade de publicações para 10 títulos. A metodologia definida por Booth, Sutton e Papaioannou (2016) prevê nesta etapa, uma triagem dos documentos através de critérios de inclusão e exclusão aplicados sobre os títulos, resumos, introduções e conclusões. Contudo, o tamanho da coletânea não justifica a leitura parcial dos trabalhos encontrados. Desta forma, todos foram lidos integralmente.

Para avaliar o nível de aderência dos trabalhos encontrados na Pesquisa com a temática proposta neste estudo, foram estabelecidos os seguintes Critérios de Convergência (CC) :

CC1: Utiliza múltiplas âncoras?

CC2: Aplica-se aos ambientes industriais?

CC3: Propõe método para disposição das âncoras?

Cada critério pôde assumir valor “Sim” ou “Não” e a Tabela 3.1 apresenta o resultado em ordem decrescente de aderência. Embora estes critérios não tenham sido utilizados para excluir os resultados da pesquisa, eles identificam objetivamente os trabalhos relacionados com a proposta desta investigação.

Tabela 3.1: Critérios de Convergência aplicados aos trabalhos encontrados na revisão de literatura

Referência	CC1	CC2	CC3
(BACHRAS; RAPTIS; AVOURIS, 2019)	✓	✓	✓
(CÝRUS et al., 2020)	✓	✓	
(HE et al., 2019)	✓	✓	
(SHARMA et al., 2019)	✓		
(CHUSETTHAGARN; VISOOTTIVISETH; HAGA, 2018)	✓		
(JANG; BEDNARZ, 2018)	✓		
(CHINARA et al., 2018)	✓		
(YU; QI; TIE, 2019)			
(MCJUNKIN et al., 2018)			
(QIAN et al., 2017)			

3.2 Artefatos para criar aplicativo e analisar dados de ensaio

O Unity3D foi o ecossistema utilizado para o desenvolvimento do aplicativo de ensaio que será apresentado em detalhes na subseção 4.4.1. Trata-se de uma ferramenta popular para criação de simulações 2D e 3D, que oferece suporte para mais de 20 plataformas de execução diferentes, incluindo o HoloLens. Sua função é promover estrutura básica para associar elementos visuais (botões, textos, imagens e objetos 3D) aos seus respectivos comportamentos, que são definidos com o auxílio de *Application Programming Interfaces (APIs)*¹ e *Software Development Kits (SDKs)*².

O *Mixed Reality Toolkit (MRTK)* é um *SDK* desenvolvido pela Microsoft para auxiliar na criação de aplicativos de realidade virtual e aumentada que oferece componentes e recursos próprios para sua utilização no Unity3D. Dentre as diversas funcionalidades promovidas pelo *MRTK* tiveram relevância na construção do aplicativo de ensaio deste trabalho:

- as interfaces para entradas e saídas de dados com possibilidade de interação com superfícies do ambiente real;
- o acesso em tempo de execução ao resultado do mapeamento espacial realizado pelo HoloLens;
- o gerenciamento de âncoras implementado pela classe *WorldAnchorManager*.

A arquitetura de software do *MRTK* é extensível, permitindo que o desenvolvedor faça adequações no comportamento de componentes através da utilização de suas interfaces. Esta competência foi propícia nesta pesquisa para atribuir programaticamente o comportamento de âncora a determinadas instâncias de objetos virtuais no ambiente.

Outro *SDK* utilizado no desenvolvimento da aplicação de ensaio é o Vuforia, cuja função é reconhecer características específicas em imagens planas ou objetos 3D para rastrea-las em tempo de execução. Este recurso permite que desenvolvedores posicione e orientem objetos virtuais em relação a objetos reais quando eles são visualizados pela câmera do dispositivo e reconhecidos pelos algoritmos de visão computacional do

¹Interface de Programação de Aplicações

²Kits de Desenvolvimento de *Software*

Vuforia. Assim, é possível criar uma correspondência entre a perspectiva do observador em relação ao objeto real reconhecido e o objeto virtual projetado sobre ele, causando a sensação de que o objeto virtual é parte do cenário real.

O Vuforia fornece *APIs* em diversas linguagens de programação e inclui suporte para .NET (pronuncia-se dotnet) por meio de uma extensão para o Unity3D. O .NET é uma iniciativa da Microsoft para unificação de bibliotecas executáveis em ambiente independente de linguagem. Desta forma o desenvolvedor deixa de escrever código fonte para um dispositivo específico e passa a criar soluções para a plataforma .NET. Isso habilita o Vuforia para executar suas funcionalidades no HoloLens da mesma forma que em outros dispositivos. Nesta pesquisa o Vuforia foi instrumento para o reconhecimento de marcadores fiduciais no aplicativo de ensaio, permitindo que instâncias de objetos virtuais fossem criadas sobre eles.

Os dados coletados durante o ensaio foram persistidos em formato *Comma Separated Values (CSV)*³. Ele é simples e bastante difundido na computação, sendo reconhecido por vários programas. A linguagem R foi utilizada para confeccionar os gráficos que serão apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13, sintetizando visualmente os dados coletados no ensaio. Ela é uma linguagem voltada para análise, manipulação e visualização de dados criada por Ross Ihaka e Robert Gentleman no departamento de Estatística da Universidade de Auckland, Nova Zelândia e atualmente mantida por colaboradores voluntários sob licença *General Public Licence (GPL)* (The R Foundation, 2020). A escolha do formato de dados e linguagem para a análise foi fundamentada na afinidade do pesquisador com estas ferramenta e não interfere nos resultados alcançados.

O código fonte do aplicativo de ensaio e o código em linguagem R utilizado para gerar os gráficos citados, estão disponíveis respectivamente nos apêndices A e B desta pesquisa.

³Valores Separados por Vírgulas

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta como resultado de pesquisa a síntese e análise dos trabalhos correlatos identificados na revisão sistemática de literatura descrita na seção 3.1, seguido da definição de um método para persistência espacial no HoloLens fundamentado nos conhecimentos teóricos e práticos assimilados. Por fim, faz a análise dos dados apurados com a realização do ensaio definido na seção 4.4, oferecendo uma discussão sobre os resultados à luz dos trabalhos correlatos.

4.1 Síntese e análise de trabalhos correlatos

Esta etapa apresenta os resultados da revisão do estado da arte. A Figura 4.1 ilustra as ações e definições realizadas em cada etapa deste processo. Aqui também são respondidas às questões elaboradas na Definição de Escopo (subseção 3.1.2), observando os critérios de convergência dos trabalhos, estabelecidos na Avaliação (subseção 3.1.4). Desta forma, considerou-se relevante para este trabalho, as publicações que atendem a pelo menos um critério de convergência. A síntese das respostas e a análise das soluções propostas, estabelecendo relações com as apropriações e virtudes aplicadas ao método para persistência espacial no HoloLens proposto nesta pesquisa, são descritas à seguir.

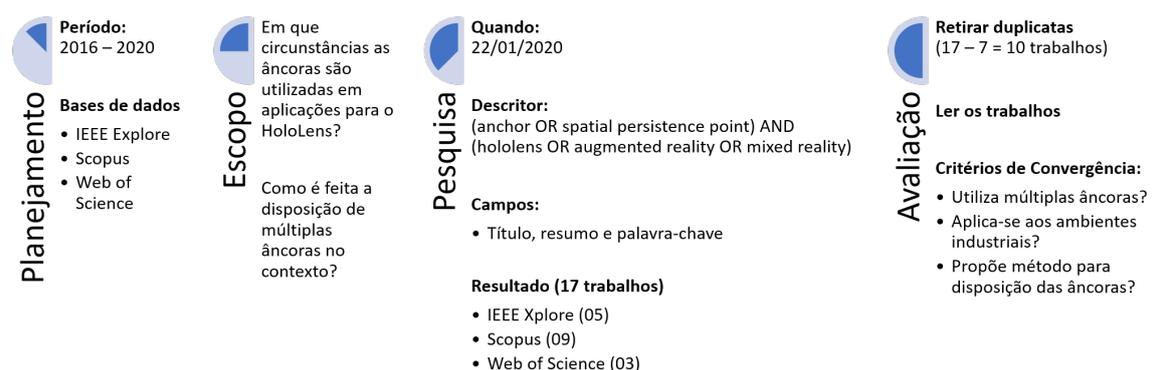


Figura 4.1: Fluxograma da Revisão do Estado da Arte.

Nenhum dos trabalhos correlatos apurados nesta revisão do estado da arte apresenta indicadores de acurácia e precisão de suas aplicações. Esta pesquisa percebe nesta lacuna a oportunidade de estabelecer valores de referência para os indicadores de acurá-

cia e precisão. Desta forma, o presente estudo contribui para avaliação de técnicas que visão aprimorar estes aspectos em aplicações de realidade aumentada.

Em comum, os trabalhos de Bachras, Raptis e Avouris (2019), Cýrus et al. (2020), He et al. (2019), Sharma et al. (2019), Chusetthagarn, Visoottiviseth e Haga (2018), Jang e Bednarz (2018), Chinara et al. (2018) apresentam o mapeamento do ambiente real (semelhante à Figura 2.2) e as posições em que os objetos virtuais devem ser instanciados, como condições necessárias para gerar os executáveis das suas soluções para HoloLens. Eles importam o objeto virtual resultante do mapeamento realizado pelo HoloLens, em ferramentas de desenvolvimento como o Unity3D (Unity Technologies, 2020). Renderizando a malha triangular que representa o ambiente real na ferramenta de criação de conteúdo, os autores incluem novos objetos virtuais ao ambiente e atribui comportamento de âncora a eles, ou seja, os objetos passam a ter vínculo com o ambiente. Somente após esse processo, o executável da solução é compilado para o HoloLens.

As premissas e procedimentos adotados pelos autores citados limitam a utilização das soluções aos seus respectivos contextos. Eles não exploram a capacidade do HoloLens instanciar objetos virtuais e atribuir comportamento de âncora para eles em tempo de execução, quando a solução já está instalada no HoloLens. O método para persistência espacial no HoloLens proposto deve utilizar esta competência do HoloLens para viabilizar soluções que sejam genéricas e adaptáveis aos diferentes contextos.

Algumas pesquisas revelam detalhes sobre o ambiente que permitem estimar suas características. Dentre elas, destacam-se as de Bachras, Raptis e Avouris (2019), Cýrus et al. (2020) e He et al. (2019). As soluções apresentadas por estes autores foram aplicadas em ambientes com condições adversas como: variação de luminosidade, objetos móveis, espaços de grandes proporções, entre outras. Estas condições são semelhantes ao observado em contextos industriais (critério de convergência CC2). O HoloLens é um equipamento sensível a estas adversidades e torna o método para persistência espacial no HoloLens desta pesquisa susceptível às restrições e limitações do dispositivo.

Bachras, Raptis e Avouris (2019) propõem um sistema de navegação para algumas ruas da cidade de Patras (Grécia). Eles utilizam o conceito de âncora para aprimorar ca-

racterísticas como precisão e estabilidade da aplicação. Contudo, realizar o mapeamento do ambiente real e configurar a posição de cada objeto virtual na malha triangular que o representa é, segundo os autores, uma atividade que compromete o esforço de desenvolvimento das aplicações. Por conta disso, os autores realizam um estudo empírico sobre a relação entre o esforço de desenvolvimento e a experiência do usuário em duas versões da aplicação de navegação. Uma das versões foi desenvolvida utilizando as âncoras e outra não. Os autores concluem indicando a necessidade de definir abordagens que mitiguem a complexidade de desenvolvimento das aplicações, entendendo a importância da utilização de âncoras como instrumento garantidor de boas experiências de usuário.

Diferente do que foi proposto por Bachras, Raptis e Avouris (2019), o método para persistência espacial no HoloLens desta pesquisa tem estratégia algorítmica para disposição das âncoras no ambiente. Assim, as atividades consideradas custosas para o esforço de desenvolvimento, segundo os autores, podem ser realizadas paralelamente ao mapeamento. Em outras palavras, o método para persistência espacial no HoloLens utilizado não requer o mapeamento do ambiente para importá-lo em ferramentas de desenvolvimento e então dispor nele os objetos virtuais com comportamento de âncora.

Cýrus et al. (2020) apresentam o reconhecimento de marcações fiduciais como alternativa à utilização de âncoras. Em um dos exemplos, os autores citam a utilização de âncoras em uma galeria de arte, também com o objetivo de aprimorar a precisão e acurácia dos hologramas. O reconhecimento de marcações fiduciais é apropriado, segundo os autores, em situações onde a holografia deva estar sobreposta a um objeto real identificável, porém em posição desconhecida ou dinâmica. Em contrapartida, os autores afirmam que o custo computacional envolvido no reconhecimento de marcadores é maior do que a utilização de âncoras.

A utilização de marcações fiduciais nas situações sugeridas por Cýrus et al. (2020) é bastante difundida nas literaturas de referência sobre realidade aumentada (PALMARINI et al., 2018). Esta pesquisa concorda com os autores quanto à ineficiência das âncoras em situações nas quais os hologramas devam acompanhar movimentos de objetos reais no ambiente, pois a ideia de âncoras está associada a fixação de objetos virtuais no

ambiente. Sendo assim, a avaliação de precisão e acurácia do método para persistência espacial no HoloLens restringe-se aos objetos estáticos nesta pesquisa.

He et al. (2019) descrevem a redução de latência em ambiente multiusuário no HoloLens através da evolução do método *One For All Shared Experience* desenvolvido pela Microsoft (ZELLER et al., 2020). O método original propõe o compartilhamento de âncoras entre múltiplos dispositivos num mesmo espaço. Os autores observaram o intenso trânsito de dados causado pela utilização desta técnica em situações com muitas âncoras, comprometendo o desempenho de uma aplicação colaborativa desenvolvida para uma estufa de pesquisa. A solução encontrada pelos autores foi o compartilhamento de âncoras endereçadas entre múltiplos objetos virtuais. Assim, a informação compartilhada entre os dispositivos passou a ser o endereço da âncora mais próxima do objeto virtual e seu deslocamento em relação a ela. Os autores estimam que os dados de uma âncora ocupem aproximadamente 10 *Mega Bytes*, essencialmente composto por metadados da posição da âncora relativos à malha triangular que representa o ambiente real. Em comparação com os poucos *Bytes* necessários ao encapsulamento do endereço de âncora e do deslocamento, o resultado apresentado foi a redução significativa da quantidade de dados transmitidos entre os dispositivos e consequentemente a redução da latência do sistema.

O agrupamento hierárquico dos objetos virtuais proposto por He et al. (2019), determina que apenas o elemento superior na hierarquia assume o comportamento de âncora, sendo os demais referenciados pelo identificador do líder e sua posição em relação a ele. A Figura 4.2 ilustra a diferença entre a atribuição individualizada de comportamento de âncora por objeto virtual (Figura 4.2a) e a proposta de He et al. (2019) (Figura 4.2b).

Com inspiração na hierarquia apresentada por He et al. (2019), o método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho impõe o mesmo tipo de relacionamento entre âncoras e objetos virtuais. Com isso, beneficia-se da redução de dados necessários à fixação de objetos virtuais, que através de subordinação podem compartilhar âncoras no ambiente. Pela natureza de seus objetivos, as métricas avaliadas por He

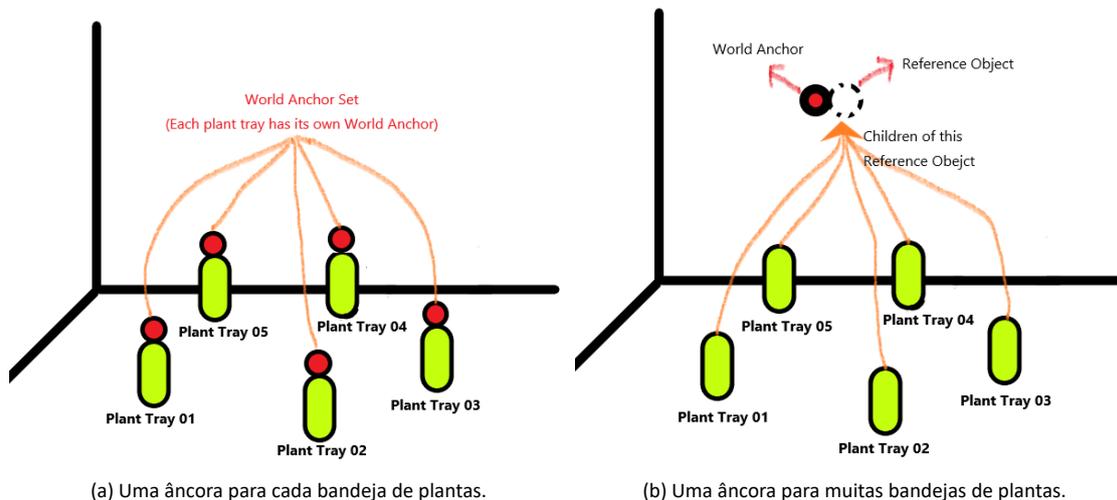


Figura 4.2: Relação entre âncoras e objetos virtuais que representam bandejas de plantas (HE et al., 2019).

et al. (2019) estão relacionadas ao tráfego de dados em rede, não tendo foco na avaliação de acurácia e precisão da sua proposta. Além disso, para um cenário com múltiplas âncoras, eles não revelam o espaçamento aplicado entre elas. Como citado anteriormente, os autores assumem que a disposição das âncoras no mapeamento e a criação dos objetos virtuais subordinados antecede a compilação do executável para HoloLens.

4.2 Restrições do método para persistência espacial no HoloLens

Com o objetivo de propor um método para persistência espacial no HoloLens, baseado no conceito de âncora, para alinhamento de hologramas com acurácia e precisão, ele deve apresentar características como: escalabilidade dimensional para atender ambientes com diferentes proporções e ser tolerante às mudanças estruturais que eventualmente ocorram no contexto.

Antes de aplicar o método para persistência espacial no HoloLens é importante esclarecer algumas restrições impostas pelas limitações do dispositivo. Assim, será possível determinar as condições mínimas necessárias para comportamento adequado do método no HoloLens, compreender os fenômenos que influenciam nos resultados e suas consequências.

4.2.1 *Baixa incidência de infravermelho*

Anteriormente, ao tratar do funcionamento do reconhecimento espacial no HoloLens, a Figura 2.1 descreveu os projetores a laser infravermelhos do dispositivo. Em conjunto com os demais sensores, eles permitem a reconstrução do ambiente real em seu equivalente virtual. Fontes de infravermelho, externas ao HoloLens, podem inserir ruídos neste processo de reconstrução e comprometer a qualidade do mapeamento. A incidência de luz solar, lâmpadas de infravermelho, superfícies que emitem calor, são exemplos de fontes de infravermelho que podem prejudicar o mapeamento do ambiente real. Estes agentes influenciam nos valores dos metadados que relacionam as âncoras aos vértices da malha triangular, representante do ambiente real. Como consequência, as âncoras perdem precisão de posicionamento e orientação.

4.2.2 *Superfícies claras e pouco reflexivas*

Ao incidir sobre uma superfície, a luz sofre simultaneamente reflexão, refração e absorção com intensidades que variam conforme o material e a forma da superfície. A reflexão ocorre quando o feixe de luz atinge a superfície e retorna ao meio que estava propagando. Em superfícies lisas, a reflexão recebe o nome de regular ou especular, pois o feixe de luz refletido mantém as mesmas características do incidente. Em superfícies irregulares, rugosas ou não polidas, o feixe é refletido em várias direções e a reflexão recebe o nome de difusa. A cor de um objeto é definida pela luz que ele reflete de forma difusa na incidência de luz branca (constituída por todas as cores). Assim, um objeto é branco se reflete todas as cores e preto se nenhuma cor é refletida.

Superfícies escuras absorvem a luz emitida pelos projetores a laser do HoloLens. O efeito oposto é observado em superfícies espelhadas ou polidas, que refletem a luz de forma regular. Em ambos casos, os sensores do HoloLens não conseguem captar adequadamente o reflexo da luz projetada e identificar as superfícies do ambiente real. Esta situação gera “buracos” no mapeamento, semelhante ao indicado na Figura 4.3.

As consequências podem ser iguais as observadas na subseção 4.2.1, ou seja, o mapeamento inadequado pode gerar imprecisão na orientação e posição das âncoras.

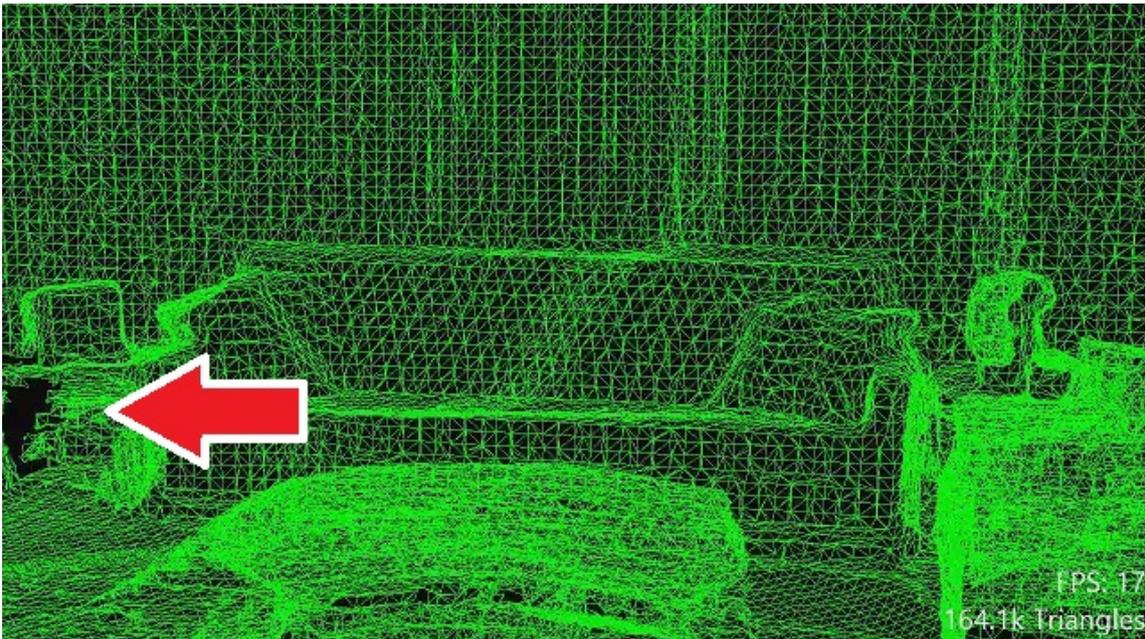


Figura 4.3: Indicação de “buraco” em mapeamento espacial do HoloLens (MICROSOFT, 2018).

4.2.3 Local de calibração fixo

O requisito de escalabilidade dimensional do método proposto implica na criação dinâmica de âncoras. A realização desta atividade depende de um sistema único de coordenadas espaciais. Conforme exposto na seção 2.3, que trata sobre a calibração no HoloLens. A cada execução de aplicação, o dispositivo assume uma nova origem e novas direções de eixos cartesianos. O objetivo de uma calibração é determinar o deslocamento e orientação do sistema de coordenadas do ambiente real em relação ao seu mapeamento. Esta informação de deslocamento permitirá ao método para persistência espacial no HoloLens determinar a posição da âncora primordial, que dará origem as demais âncoras no ambiente. Para o método proposto neste trabalho, o local de calibração deve ser fixo em relação à origem do sistema de coordenadas do ambiente real. A movimentação do local de calibração faria o sistema interpretar de forma incorreta a posição das âncoras, exibindo os objetos virtuais em locais transladados ou rotacionados, conforme seja o movimento do local de calibração.

4.2.4 *Manutenção do identificador de rede WiFi*

O HoloLens é capaz de armazenar informações de diversos mapeamentos em sua memória. Como estratégia para organização dos mapeamentos, o sistema operacional estabelece uma relação deles com os identificadores de rede WiFi presentes no ambiente. Isso permite que o sistema de reconhecimento espacial do HoloLens selecione o mapeamento correspondente ao ambiente e realize a autolocalização. A extinção do identificador de rede faz o sistema interpretar o ambiente como um novo contexto, implicando em outro mapeamento. Desta forma, a manutenção ou reestabelecimento do identificador de rede WiFi permite a reutilização e refinamento das características ambientais capturadas pelo HoloLens nestes mapeamentos. Do contrário, é necessário realizar novo procedimento de calibração para reestabelecer a posição dos objetos virtuais no ambiente.

4.2.5 *Continuidade do mapeamento*

Interrupções no reconhecimento espacial do HoloLens são identificadas como “*Tracking Lost*” (em português: rastreamento perdido). Quando essas interrupções acontecem, é possível observar sobreposições ou lacunas nas superfícies mapeadas pelo HoloLens. A obstrução de sensores ou interrupções na detecção de sinal WiFi determinam o estado de *Tracking Lost*. Neste estado, o dispositivo perde a capacidade de se localizar no ambiente. Na maioria das vezes em que isso acontece o HoloLens consegue recuperar essa capacidade sem prejuízos ao mapeamento. Porém, quando o dano acontece, superfícies “fantasmas” podem surgir no mapeamento. Como consequência, os metadados das âncoras passam a relacionar a posição de objetos virtuais com vértices de superfícies que não existem no ambiente real. É importante dizer que o processo de mapeamento é controlado pelo sistema operacional do dispositivo e o acesso ao código fonte é restrito. Assim, não é possível alterar o comportamento do mapeamento quando um *Tracking Lost* está em curso ou depois que ele acontece. Para remover o mapeamento com problema, é necessário apagá-lo no painel de controle do HoloLens. Os arquivos de mapeamento são nomeados conforme identificadores de rede WiFi em cada ambiente.

4.3 Método para persistência espacial: distribuição de âncoras no ambiente

O método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho determina uma sequência de passos para distribuição das âncoras no ambiente. Este método leva em consideração as restrições descritas na seção 4.2, tornando a sequência implementável em aplicações para o HoloLens.

4.3.1 1º Passo: definir a posição e orientação da âncora primordial

Ter a posição de origem, direção e sentido de crescimento de cada eixo cartesiano (X, Y, Z), definidos no espaço real, são condições necessárias para estabelecer um sistema único de coordenadas espaciais em uma aplicação de realidade aumentada. A realização de calibração, conforme descrito na seção 2.3, permite determinar este local no ambiente e assim instanciar a primeira âncora no mapeamento. Esta âncora primordial dá origem ao conjunto das âncoras necessárias à precisão e acurácia na exibição dos objetos virtuais.

Dentre as possíveis abordagens para calibração são comuns as que utilizam ferramentas de visão computacional para o reconhecimento de marcadores fiduciais (PALMARINI et al., 2018). Almeida (2020) promove uma estratégia de calibração utilizando dois marcadores fiduciais próximos, dispostos em posições conhecidas do ambiente real. Correlacionando este trabalho com o modelo de calibração em duas etapas do aludido autor, a posição da âncora primordial pode ser definida em função do centro do primeiro marcador fiducial e sua orientação em função do centro do segundo marcador. Contudo, esta é uma sugestão desta pesquisa sobre como o procedimento de calibração pode ser executado. Outras estratégias para definir o local e o sistema de coordenadas comum às execuções de uma aplicação podem ser adotadas, conforme julgamento do desenvolvedor.

4.3.2 2º Passo: definir a hierarquia entre âncora e objetos virtuais

He et al. (2019) descrevem um agrupamento hierárquico, onde em determinado conjunto de objetos virtuais apenas um elemento assume o comportamento de âncora, sendo os demais referenciados a partir dele. Para justificar a hierarquia e reduzir a latência em ambientes multiusuários, os autores consideram a ocupação de memória no HoloLens com os metadados das âncoras (cerca de 10 MegaBytes por âncora) *versus* os poucos Bytes necessários para manter as informações de posição e orientação de um objeto virtual relativo à âncora que está subordinado. Mesmo em situações com apenas um usuário, a constante atualização do mapeamento realizada pelo HoloLens, pode gerar demanda por atualizações dos metadados proporcional a quantidade de âncoras presentes no ambiente.

O agrupamento hierárquico proposto por He et al. (2019) mostra-se adequado ao comprometimento mínimo de desempenho computacional citado na questão norteadora desta pesquisa. Assim, fica estabelecido no método para persistência espacial no HoloLens deste trabalho que: um agrupamento hierárquico válido é aquele composto por objetos virtuais que estejam à distância máxima de três metros da sua âncora de referência. Este valor é sugerido, pela fabricante do HoloLens, como limite máximo para manutenção da experiência de usuário com o posicionamento de objetos virtuais (ZELLER et al., 2020).

O método para persistência espacial no HoloLens propõe neste passo, uma avaliação sobre a necessidade de instanciar nova âncora, conforme o limite máximo de distância para os objetos virtuais que serão subordinados. Para isso, estabelece um procedimento de julgamento dessa necessidade, que economiza a ocupação de memória com uma nova âncora ao identificar outra já existente no ambiente com distância inferior ao limite estipulado.

4.3.3 3º Passo: definir procedimento para criação de nova âncora

Quando a distância de um objeto virtual para qualquer âncora extrapola três metros, é necessário criar uma nova âncora e vincular o objeto virtual. A esta âncora, dá-se

o nome de Âncora Líder (AL) do objeto virtual. O local para instanciá-la deve ser coerente com as premissas e restrições do método proposto e não ser conflitante com os demais passos estabelecidos para a distribuição das âncoras no ambiente. Assim, o método para persistência espacial no HoloLens define uma matriz tridimensional de coordenadas para possíveis locais de criação de âncoras, considerando o raio de atuação delas para determinar o espaçamento entre as âncoras em cada eixo cartesiano. Em pelo menos um destes locais a distância para o objeto virtual será menor ou igual aos três metros.

Seja e um valor real (\mathbb{R}) positivo para o **espaçamento entre âncoras** aplicado em cada eixo cartesiano, e seja $\mathbf{a} = (x, y, z)$ as **coordenadas de uma âncora**. Então, se: $a_0 = a$ e $a_1 = a_0 + (e, e, e)$ são duas posições de âncoras, elas estão imediatamente dispostas em diagonal na matriz. Para garantir que qualquer posição no seguimento de reta entre a_0 e a_1 esteja no raio ($r \in \mathbb{R}$) de atuação de uma das âncoras, a distância entre elas deve ser, no máximo, igual ao dobro de r , ou seja, seis metros. Assim, pela equação da distância entre pontos no espaço, temos que $e \approx 3,46m$ para aplicações do HoloLens, conforme esquema ilustrativo da Figura 4.4 e explicação matemática a seguir:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x - x + e)^2 + (y - y + e)^2 + (z - z + e)^2} &= 2r \\ \sqrt{3e^2} &= 2r \\ 3e^2 &= (2r)^2 \\ e^2 &= (2r)^2/3 \\ e &= \sqrt{(2r)^2/3} \\ e &= \sqrt{(2 \cdot 3)^2/3} \quad \text{Substituindo } r \text{ por } 3m \\ e &\approx 3.46m \end{aligned}$$

Dado a **posição de um objeto virtual** qualquer que precise ser fixado no ambiente, é possível determinar a célula da matriz tridimensional de coordenadas, que deve conter a âncora mais próxima deste objeto virtual. A posição desta célula na matriz recebe o nome de Endereço da Âncora Líder (EAL). Seja $\mathbf{p} = (x, y, z)$ a posição relativa ao sistema

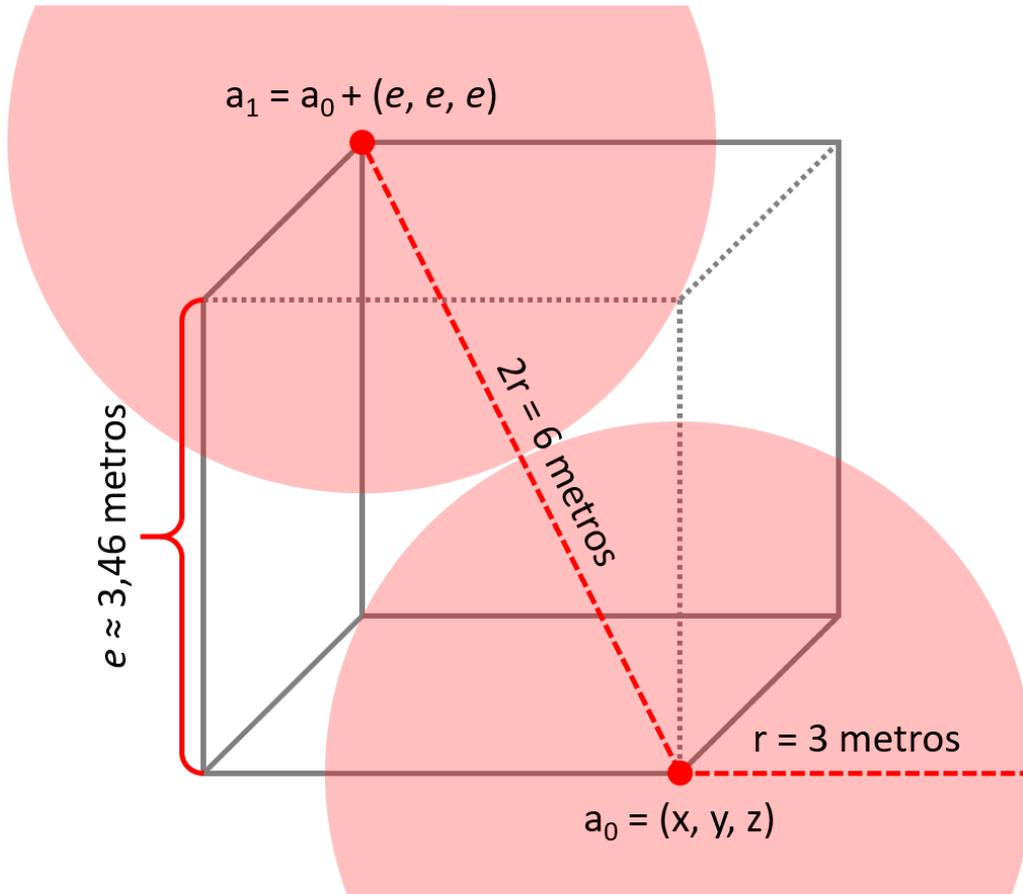


Figura 4.4: Esquematização para definição de espaçamento entre âncoras por eixo.

de coordenadas constituído pela âncora primordial (subsecção 4.3.1) para o objeto virtual que se pretende fixar no ambiente, o vetor formado pelos valores aproximados inteiros (\mathbb{Z}) do quociente entre cada coordenada de p e o espaçamento e determina o $EAL(p)$, ou seja:

$$EAL(p) = \left(\left[\frac{x_p}{e} \right] \in \mathbb{Z}, \left[\frac{y_p}{e} \right] \in \mathbb{Z}, \left[\frac{z_p}{e} \right] \in \mathbb{Z} \right)$$

As Coodenadas da Âncora Líder (CAL) de p , que determinam a posição no mapeamento para instânciar AL, são obtidas pela multiplicação de $EAL(p)$ pelo espaçamento e . Dessa forma, tem-se:

$$CAL(p) = EAL(p) \cdot e$$

Por definição, $EAL(p)$ garante que $CAL(p)$ é a coordenada para a âncora mais próxima de p e que a âncora pode ser compartilhada com outros objetos virtuais, ou seja, $\exists(p \neq q):$ onde $AL(p) = AL(q)$. No método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho estas informações devem ser utilizadas para o julgamento da

necessidade de criar uma nova âncora no ambiente, conforme citado na subseção 4.3.2.

4.4 Avaliação do método para persistência espacial no HoloLens

Esta seção descreve os procedimentos aplicados na avaliação do método para persistência espacial no HoloLens, caracterizando o ambiente para realização do ensaio e os materiais utilizados durante a execução.

Palmarini et al. (2018) citam a relevância de a pesquisa descrever o ambiente adotado para avaliação das soluções propostas, caracterizando os desafios identificados no contexto real e, desta forma, habilitando o pesquisador à construção e/ou identificação de ambiente adequado para avaliação de sua proposta. Assim, a linha de produção de uma indústria de confecção de camisetas foi o ambiente eleito para avaliação do método para persistência espacial no HoloLens proposto nesta pesquisa. A Figura 4.5 ilustra o cenário, que tem aproximadamente 600m³ e dispõe de vários equipamentos, estruturas móveis, variabilidade de iluminação e obstáculos.



Figura 4.5: Linha de produção da indústria de confecção de camisetas, ambiente relevante da avaliação.

A expectativa de funcionamento ideal do método para persistência espacial no HoloLens é que sua implementação habilite as competências de acurácia e precisão nas

aplicações para HoloLens. Por **acurácia**, entende-se à capacidade de posicionar corretamente os objetos virtuais, enquanto **precisão** corresponde à habilidade de exibir os objetos virtuais repetidas vezes na mesma posição. Como forma de avaliar o sucesso do método para persistência espacial no HoloLens, o ensaio apurou respectivamente o erro e a dispersão no posicionamento dos objetos virtuais ao repetir sistematicamente sua exibição.

Como estratégia para minimizar o erro humano no processo de posicionar repetidas vezes objetos virtuais nos locais designados, esta pesquisa utilizou o reconhecimento de marcação fiducial para aferir a posição dos objetos em cada ciclo de repetição. A ferramenta de visão computacional utilizada neste procedimento foi o Vuforia (PTC, 2018). Assim, dez marcadores fiduciais semelhantes à Figura 4.6 foram distribuídos no ambiente. Suas posições, listadas na Tabela 4.1, foram as referências para análise e discussão do experimento, que serão apresentadas na seção 4.5. Elas correspondem aos centros geométricos dos marcadores instalados, adotando-se a posição p_0 como origem do sistema de coordenadas. A noção de direita, frente e topo do marcador em p_0 determinou os sentidos de crescimento dos eixos X, Y e Z respectivamente.

Tabela 4.1: Coordenadas dos marcadores no ambiente de ensaio.

Posição	x(m)	y(m)	z(m)	Distância(m)
p_0	0,000	0,000	0,000	0,000
p_1	3,239	0,238	-0,001	3,248
p_2	6,688	-1,625	0,123	6,883
p_3	12,256	-1,435	0,323	12,344
p_4	18,088	0,056	0,366	18,092
p_5	16,974	6,507	1,162	18,216
p_6	9,725	5,232	-0,019	11,043
p_7	4,585	4,954	0,037	6,750
p_8	-1,450	6,917	-0,008	7,068
p_9	-4,928	-0,106	0,022	4,929



Figura 4.6: Marcador fiducial utilizado no ensaio.

A Figura 4.7 ilustra o ambiente e a distribuição dos marcadores pelo espaço. Os critérios para instalação dos marcadores consideraram:

- a centralização da imagem no campo de visão do observador, um metro à frente do marcador;
- a visualização completa do marcador durante o reconhecimento, evitando que a imagem estivesse parcialmente encoberta;
- a instalação em superfícies planas, minimizando os efeitos de distorção no reconhecimento do marcador;
- a instalação em superfícies fixas em relação à origem do sistema de coordenadas.

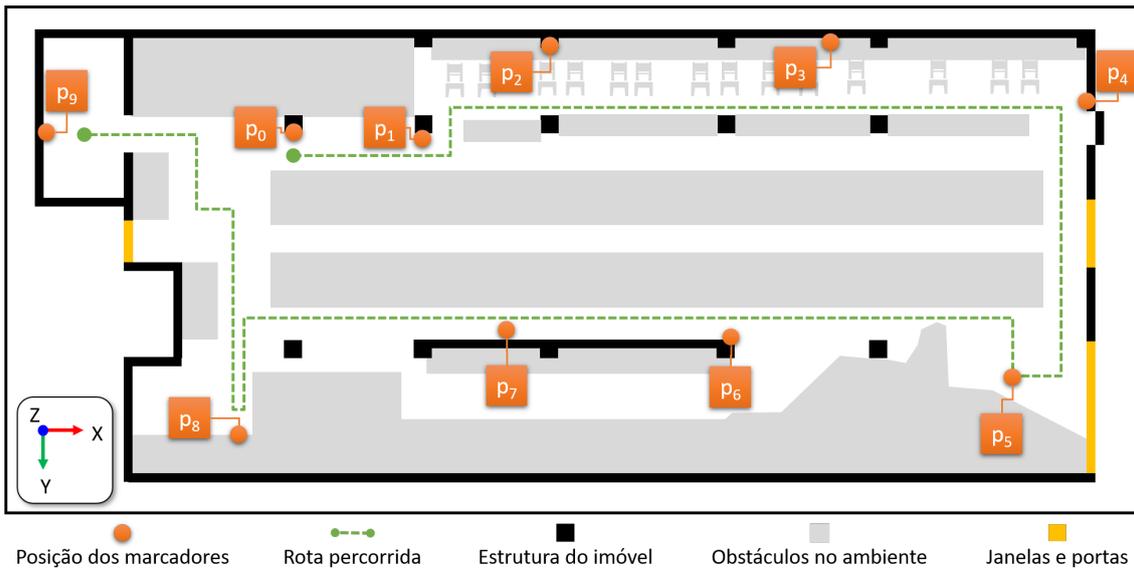


Figura 4.7: Mapa de distribuição dos marcadores no ambiente relevante.

Embora a Figura 4.7 seja uma representação esquematizada do ambiente, não se trata de um desenho técnico em escala. Assim, ela não reflete as irregularidades estruturais observadas no ambiente como: pilares desalinhados, paredes fora de esquadro e mobílias com formas sinuosas. Estas irregularidades promoveram complexidade para realizar medições de distâncias entre marcadores no ambiente. Para garantir uma distribuição uniforme dos marcadores neste contexto seriam necessários equipamentos de medida sofisticados. Entretanto, evitou-se a concentração de marcadores instalados em uma determinada região do ambiente. A coleção de imagens na Figura 4.8 expõe o local de instalação de cada marcador no ambiente.



(a) Marcador em p_0 .



(b) Marcador em p_1 .



(c) Marcador em p_2 .



(d) Marcador em p_3 .



(e) Marcador em p_4 .



(f) Marcador em p_5 .

Figura 4.8: Locais de instalação dos marcadores no ambiente.



(g) Marcador em p_6 .



(h) Marcador em p_7 .



(i) Marcador em p_8 .



(j) Marcador em p_9 .

Figura 4.8: Locais de instalação dos marcadores no ambiente.

4.4.1 O aplicativo de ensaio

Um aplicativo para HoloLens foi desenvolvido com intuito de validar o método para persistência espacial no HoloLens. O código fonte deste aplicativo está disponível no apêndice A desta pesquisa. Ele implementa os procedimentos para distribuição de âncoras no ambiente, definidos na seção 4.3. A aplicação e o ensaio foram divididos nas seguintes etapas:

Etapa 1 - Setup - permitiu realizar o procedimento de calibração em p_0 para determinar a posição da âncora primordial, bem como a direção dos eixos cartesianos, que definem o espaço tridimensional de referência para as coordenadas. Em seguida, permitiu a visitação dos demais marcadores distribuídos no ambiente, para que objetos virtuais fossem posicionados sobre eles e associados hierarquicamente à âncora líder correspondente. Para fins de análise do método para persistência espacial no HoloLens, nesta etapa foram persistidos os endereços das âncoras líderes e as posições relativas dos objetos virtuais;

Etapa 2 - Coleta de Dados - permitiu a exibição de todos os objetos virtuais de referência, conforme informações coletadas na etapa *Setup*. Em seguida, permitiu a comparação visual da posição de cada marcador fiducial com seu objeto virtual de referência correspondente. De forma análoga à etapa *Setup*, um novo objeto virtual foi instanciado sobre cada marcador e suas informações persistidas para análise comparativa com os dados dos objetos de referência.

Além da etapa *Setup*, foram realizadas 100 vezes a etapa Coleta de Dados. A abordagem adotada na avaliação do método para persistência espacial no HoloLens consistiu na observação da distância entre as posições dos objetos virtuais de referência, obtidas na etapa *Setup* e as amostras de posições correspondentes na etapa Coleta de Dados.

Assumindo que **acurácia** é a relação inversamente proporcional à distância dos valores amostrais para valor de referência e **precisão** é a relação inversamente proporcional à distância entre valores amostrais, quanto menores os valores apurados, melhor a performance do método para persistência espacial no HoloLens. Dito isso, a acurácia do método é medida pela distância entre as posições de referência e amostrais, assim como a precisão é medida em função da dispersão entre as amostras.

4.5 Resultados do ensaio

Esta seção expõe e discute os resultados de acurácia e precisão do método para persistência espacial no HoloLens, obtidos experimentalmente conforme procedimentos estabelecidos na seção 4.4.

A Figura 4.9 apresenta a visão de topo para o ambiente virtual resultante do mapeamento realizado pelo HoloLens ao longo da execução do ensaio. Os espaços em branco na figura correspondem majoritariamente às regiões inacessíveis do ambiente por conta de obstáculos como paredes, caixas e equipamentos.

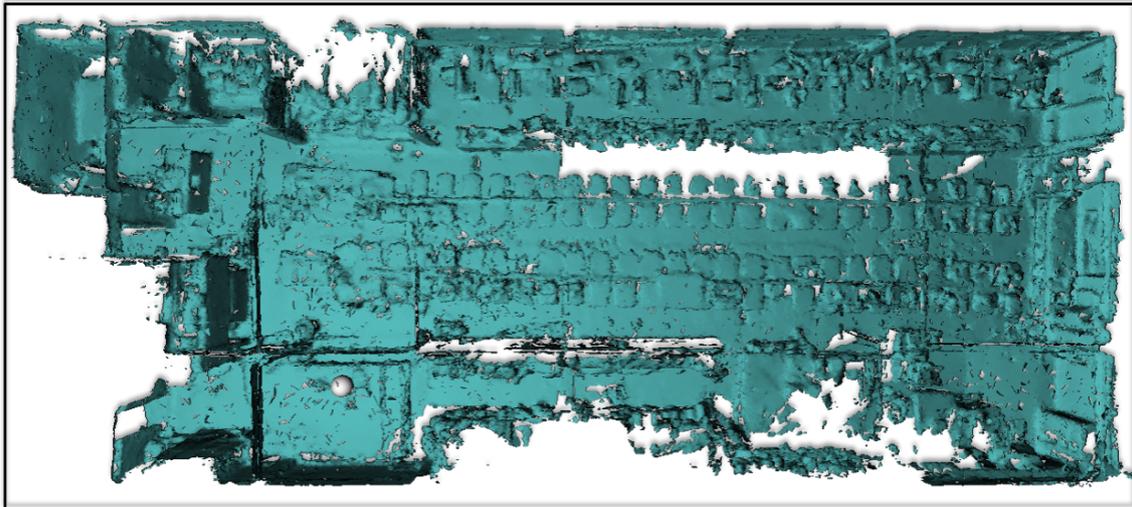


Figura 4.9: Ambiente virtual equivalente ao real, resultante do mapeamento realizado pelo HoloLens.

A Figura 4.10 ilustra a distribuição de âncoras resultante da Etapa 1 -*Setup*. Nela é possível observar a disposição de objetos virtuais de referência sobre os marcadores instalados, as âncoras criadas sob demanda e respeitando o espaçamento estabelecido no método para persistência espacial no HoloLens. A Tabela 4.2 disponibiliza os dados de cada âncora e posição relativa dos objetos virtuais instanciados. Conforme regra definida no método, nenhum objeto virtual esteve a mais de três metros de uma âncora. A matriz de posições válidas de âncoras expõe a prática da distribuição de âncoras no ambiente (seção 4.3).

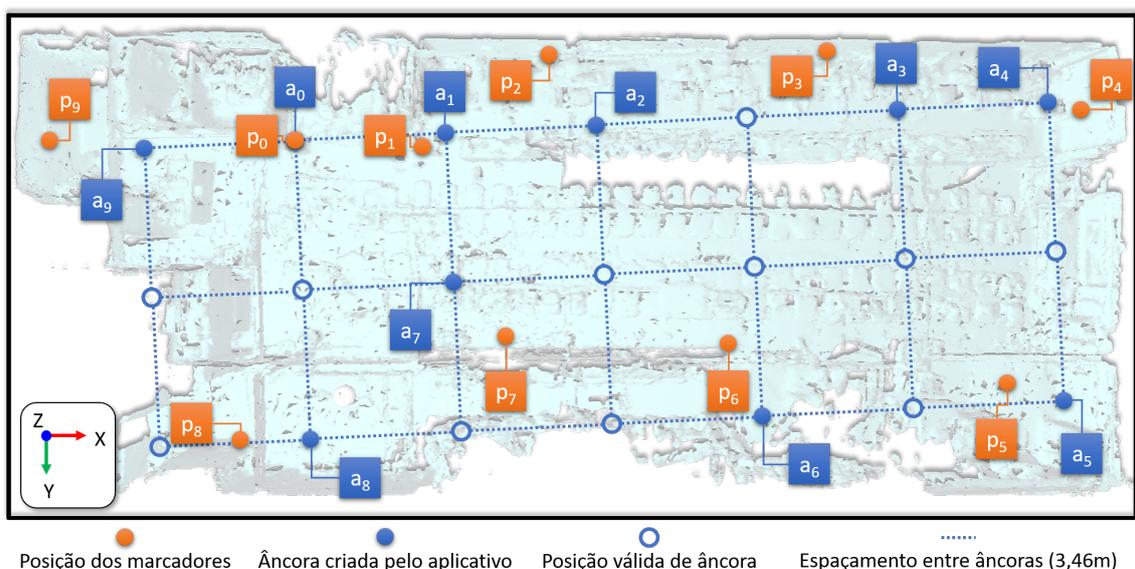


Figura 4.10: Disposição dos objetos virtuais e âncoras, com ambiente virtual em pano de fundo.

Tabela 4.2: Endereços de âncoras e posições relativas dos objetos virtuais, conforme método proposto.

Âncora	Endereço			Objeto Virtual	Coordenada Relativa			Distância(m)
	X	Y	Z		x(m)	y(m)	z(m)	
a_0	0	0	0	p_0	0,000	0,000	0,000	0,000
a_1	1	0	0	p_1	-0,221	0,238	-0,001	0,324
a_2	2	0	0	p_2	-0,232	-1,625	0,123	1,646
a_3	4	0	0	p_3	-1,584	-1,435	0,323	2,162
a_4	5	0	0	p_4	0,788	0,056	0,366	0,871
a_5	5	2	0	p_5	-0,326	-0,413	1,162	1,275
a_6	3	2	0	p_6	-0,655	-1,688	-0,019	1,811
a_7	1	1	0	p_7	1,125	1,494	0,037	1,871
a_8	0	2	0	p_8	-1,450	-0,003	-0,008	1,450
a_9	-1	0	0	p_9	-1,468	-0,106	0,022	1,472

Ao todo, foram coletadas 1000 amostras de posições de objetos virtuais na Etapa 2 - Coleta de Dados. O resultado sumarizado das distâncias euclidianas entre os objetos virtuais de referência e as amostras pode ser observado na Tabela 4.3 e no gráfico da Figura 4.11. O erro médio apurado em 0,011m e o desvio padrão de 0,0077m são, respectivamente, as métricas apuradas para avaliação da acurácia e precisão do método para persistência espacial no HoloLens.

Tabela 4.3: Sumário da distância (m) entre os objetos virtuais de referência e as amostras.

Mínimo	1º Quartil	Mediana	Média	3º Quartil	Máximo	Desvio Padrão
0.000	0.006	0.008	0.011	0.013	0.076	0.0077

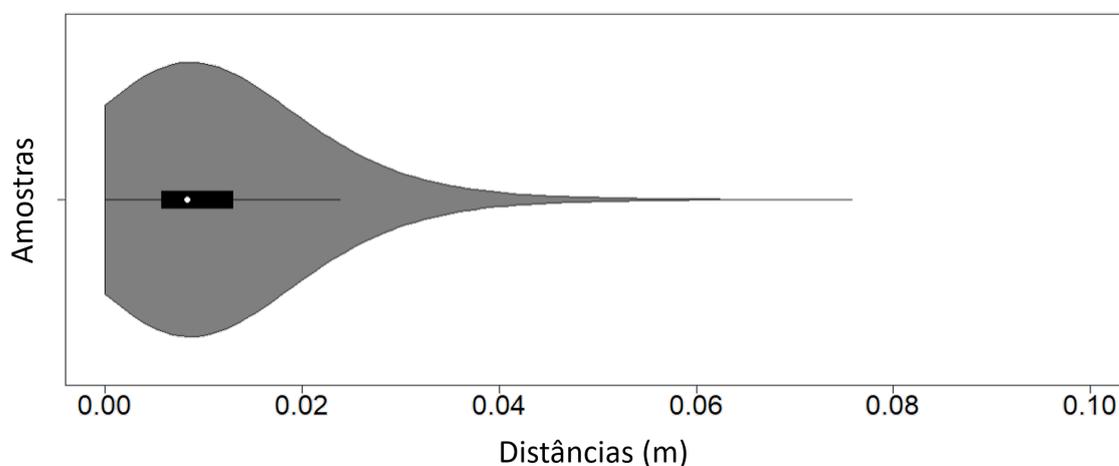


Figura 4.11: Gráfico de violino da distância entre os objetos virtuais de referência e as amostras.

O gráfico de violino da Figura 4.12 aprofunda a visão sumarizada dos dados ao nível de cada objeto virtual de referência. Destaca-se a influência de p_3 e p_9 nos resultados. Respectivamente, esses locais apresentam a menor acurácia e a menor precisão observadas. Dessa forma, fatores distintos influenciam na acurácia e precisão do método proposto.

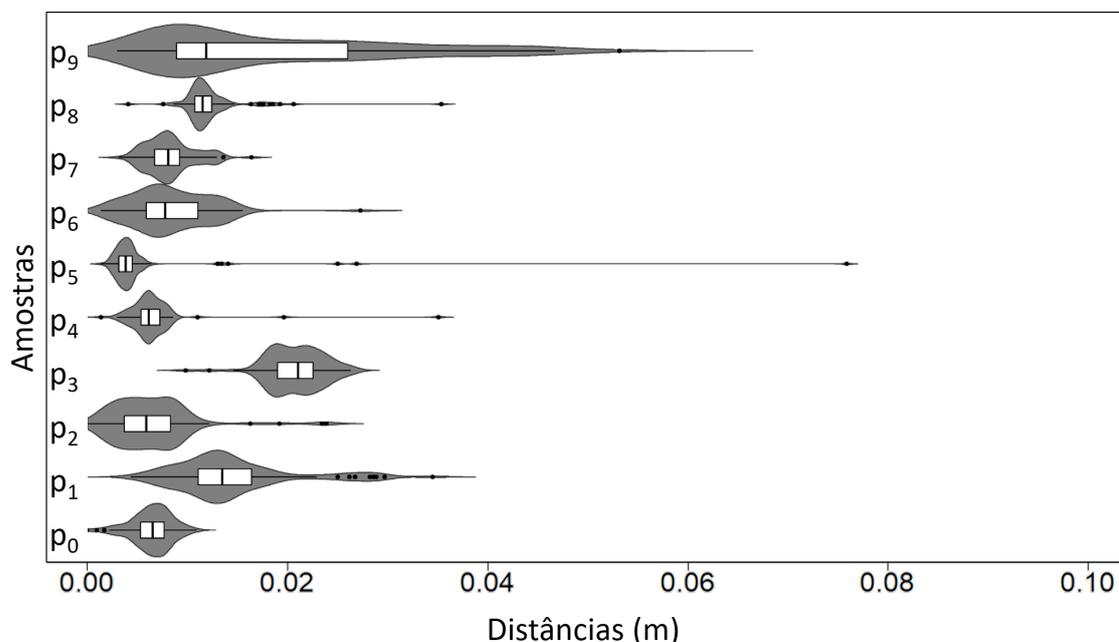


Figura 4.12: Gráfico de violino da distância entre os objetos virtuais de referência e as amostras por posição.

A redução de acurácia do método para persistência espacial no HoloLens observada em p_3 , pode estar associada à proximidade do HoloLens com as estruturas no entorno da posição do objeto virtual correspondente. Nestas condições, foi comum ocorrer interrupções no reconhecimento espacial do HoloLens (*Tracking Lost*) durante a coleta das amostras. A distinção entre as coletas nas quais o *Tracking Lost* ocorreu daquelas onde o fenômeno não foi observado poderiam permitir resultados mais conclusivos sobre sua influência na acurácia. Contudo, esta classificação não foi contemplada no ensaio realizado e enseja pesquisas futuras.

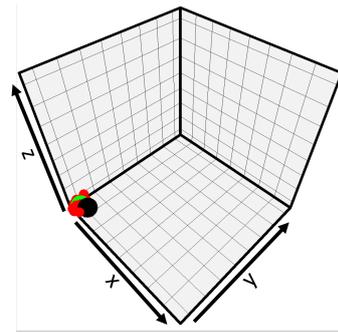
Sobre os aspectos que podem ter comprometido a precisão do método para persistência espacial no HoloLens em p_9 , cita-se a monotonia da região onde o objeto virtual foi disposto. Esta hipótese alinha-se ao discurso que relaciona as assimetrias do espaço real capturados no mapeamento à melhora na precisão das âncoras. Exemplo disso está

no trabalho de Cýrus et al. (2020). Para mitigar os efeitos indesejáveis causados por ambientes monótonos, os autores acrescentam cartazes coloridos ao espaço e observam melhora na precisão das âncoras desta forma.

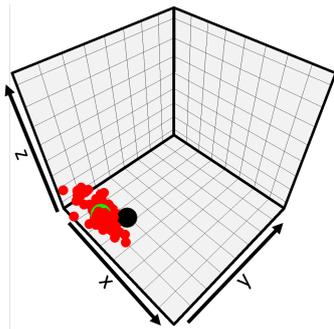
Outra posição de objeto virtual peculiar do experimento foi p_5 . Embora tenha a maior acurácia e precisão observadas, também apresentou a amostra mais distante do objeto virtual de referência. Isso indica intermitência de fator que prejudica o comportamento do método no ambiente de ensaio. A variação na intensidade de luz solar nas proximidades de p_5 pode ter comprometido momentaneamente os dados aferidos pelos sensores do HoloLens. Dentre os objetos virtuais de referência no experimento, este foi o mais próximo de uma das janelas do ambiente. Como explanado, a luz solar é uma fonte de infravermelho e sua oscilação compromete o reconhecimento do ambiente pelo HoloLens.

As amostras por objetos virtuais de referência são apresentadas nos gráficos da Figura 4.13. Os marcadores utilizados para obter a informação de posição dos objetos virtuais foram instalados em diferentes alturas e orientações. Isso proporcionou diferentes perspectivas para quem observou os marcadores durante o ensaio. Contudo, a ausência de distribuição uniforme das amostras nos arredores de cada objeto virtual de referência sugere uma tendência para o erro. De forma empírica, essa tendência é associada à posição do observador em relação ao marcador no momento da coleta de dados. Embora desconhecida, há uma parcela de erro não nula que corresponde ao Vuforia (PTC, 2018), ferramenta de visão computacional utilizada para o reconhecimento do marcador fiducial neste trabalho.

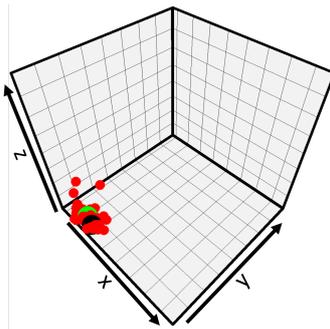
- Posição do objeto de referência
- Amostras da etapa Coleta de Dados
- Posição média da etapa Coleta de Dados



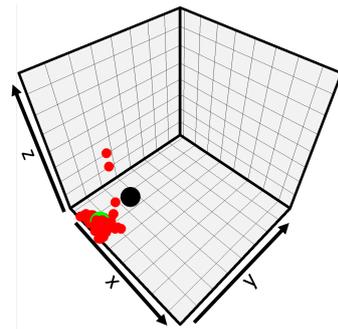
(a) Marcador em p_0 .



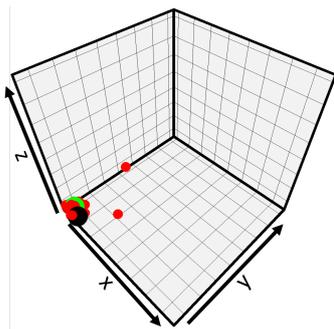
(b) Marcador em p_1 .



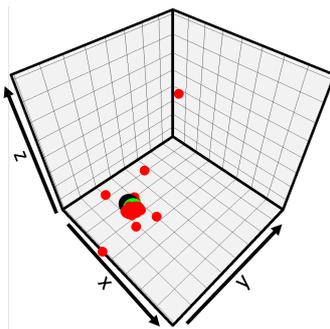
(c) Marcador em p_2 .



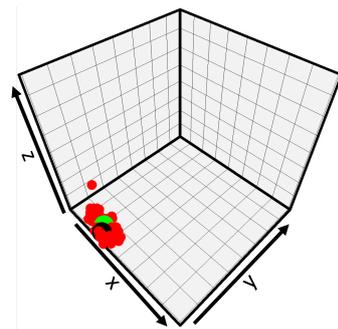
(d) Marcador em p_3 .



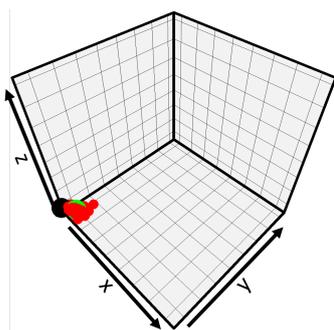
(e) Marcador em p_4 .



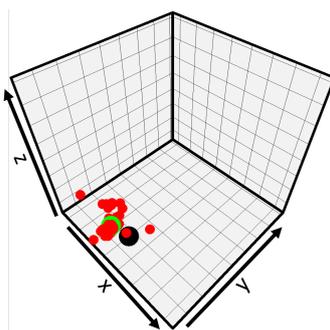
(f) Marcador em p_5 .



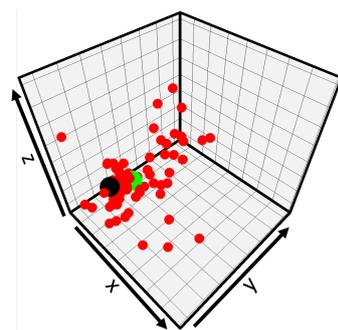
(g) Marcador em p_6 .



(h) Marcador em p_7 .



(i) Marcador em p_8 .



(j) Marcador em p_9 .

Figura 4.13: Posição das amostras em relação aos objetos de referência.

4.6 *Discussão*

Esta seção apresenta comparações e contribuições desta pesquisa à luz dos trabalhos correlatos identificados na subseção 3.1. A ausência de indicadores para acurácia e precisão nas pesquisas correlatas é evidência para a carência de trabalhos técnicos, apontada por Bottani e Vignali (2019). Assim, este trabalho colabora com a ampliação de produções técnicas sobre a adoção do HoloLens em ambientes industriais, estabelecendo critérios numéricos para avaliação e comparação com soluções futuras. Todavia, é possível estabelecer diálogo entre o método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho com seus correlatos através da exposição de possíveis aplicações e contribuições entre as pesquisas.

O acesso à malha de polígonos produzida pelo HoloLens durante o reconhecimento espacial é uma condição necessária para gerar os executáveis das aplicações de Bachras, Raptis e Avouris (2019), Cýrus et al. (2020), He et al. (2019), Sharma et al. (2019), Chusetthagarn, Visoottiviseth e Haga (2018), Jang e Bednarz (2018), Chinara et al. (2018). A partir desta malha, os autores posicionam os objetos virtuais e atribuem comportamento de âncora a eles. No método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho, a criação das âncoras ocorre de forma dinâmica e em tempo de execução (à medida que a malha de polígonos é produzida pelo HoloLens). Dessa forma, aplicações que implementem método proposto nesta pesquisa tem a vantagem de não depender do mapeamento prévio do cenário antes de gerar o executável. Isso possibilita o desenvolvimento de soluções genéricas e adaptáveis ao contexto.

Com foco no esforço necessário para o desenvolvimento de aplicações para HoloLens, Bachras, Raptis e Avouris (2019) realizam um estudo empírico sobre a redução deste esforço em detrimento da experiência de usuário. Eles apontam a utilização de âncoras como instrumento garantidor de acurácia e precisão. Assim como as demais pesquisas encontradas na revisão do estado da arte, eles também não consideram a possibilidade de instanciar as âncoras em tempo de execução. Esta seria uma estratégia para mitigar a complexidade de desenvolvimento, mantendo a qualidade na experiência de usuário. Bachras, Raptis e Avouris (2019) realizam manualmente a inserção das âncoras no am-

biente virtual. Dado que a aplicação desenvolvida por eles é um sistema de navegação para algumas ruas da cidade de Patras (Grécia), a utilização do método para persistência espacial no HoloLens isentaria os desenvolvedores desta atividade manual, ao custo de um erro médio proporcionalmente muito pequeno em comparação as dimensões do ambiente proposto por eles.

Embora Cýrus et al. (2020) considerem que o reconhecimento de marcadores fiduciais é uma alternativa para utilização de âncoras, as técnicas têm diferentes propósitos. Como o próprio nome sugere, âncoras possuem a função de fixar objetos virtuais em determinado local do ambiente real. De fato, a utilização de âncoras não é adequado às situações em que objetos virtuais devam acompanhar objetos reais móveis. A avaliação de acurácia e precisão na representação de objetos virtuais móveis é uma oportunidade de extensão desta pesquisa, que atualmente limita-se a aferir estes indicadores para objetos virtuais fixos.

Com base no método *One For All Shared Experience* (ZELLER et al., 2020), desenvolvido pela Microsoft como meio de compartilhamento de âncoras em ambientes multiusuários, He et al. (2019) propõem uma estrutura de relacionamento entre âncoras e objetos virtuais, que reduz a latência em ambientes de realidade aumentada. De forma semelhante, o método para persistência espacial no HoloLens proposto neste trabalho impõe o mesmo tipo de relacionamento entre âncoras e objetos virtuais, beneficiando-se da redução de dados necessários à manutenção das posições de objetos virtuais. Pela natureza de seus objetivos, as métricas avaliadas por He et al. (2019) estão relacionadas ao tráfego de dados em rede, não tendo foco na avaliação de acurácia e precisão. Assim como os demais trabalhos correlatos, eles também assumem que o mapeamento do ambiente antecede a geração do executável. Isso torna a solução deles funcional apenas para um ambiente específico.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral propor um método para persistência espacial no HoloLens, baseado no conceito de âncora, para alinhamento de hologramas com acurácia e precisão. O método proposto teve como finalidade responder a questão norteadora sobre: como desenvolver soluções de realidade aumentada para ambientes industriais, utilizando o HoloLens para exibir hologramas alinhados aos objetos reais com acurácia e precisão, comprometendo minimamente seu desempenho computacional?

Caracterizar os mecanismos presentes no HoloLens para localização e rastreamento de objetos virtuais, foi o objetivo específico que permitiu a compreensão das capacidades e limitações do dispositivo. Dentre estes mecanismos, tem destaque o conceito de âncoras e sua utilização em ambientes industriais. Sua função de manutenção dos metadados de localização e orientação relativos ao espaço real proporciona precisão e acurácia na exibição de hologramas. O uso racional deste recurso foi objeto de estudo neste trabalho.

O objetivo específico seguinte foi investigar métodos correlatos para persistência espacial no HoloLens, promovendo o diálogo com a comunidade científica. A revisão sistemática de literatura deste trabalho descreveu o método de investigação aplicado. Sua execução permitiu a identificação de carências na literatura que motivam e justificam a elaboração do método para persistência espacial no HoloLens proposto nesta pesquisa.

Com base no conhecimento construído pelo entendimento das capacidades do HoloLens e das experiências em trabalhos correlatos, foi possível alcançar o objetivo específico de definir um método para persistência espacial no HoloLens adaptado ao contexto industrial. Este método mitigou a necessidade de mapeamento prévio do ambiente, adaptando-se a ele em tempo de execução. Além disso, formalizou soluções como a relação entre âncoras e objetos virtuais proposta por He et al. (2019), estabelecendo regras para distribuição das âncoras no ambiente.

Implementar o método para persistência espacial em aplicativo do HoloLens foi o objetivo específico que possibilitou a apuração dos dados de acurácia e precisão do mé-

todo proposto. Os resultados do ensaio revelaram índices de erro e dispersão das amostras proporcionalmente pequenos em comparação ao volume do ambiente utilizado no ensaio. Estes indicadores servem como metas a superar em trabalhos futuros.

O cumprimento do objetivo específico de avaliar o desempenho de precisão e acurácia do método proposto estabeleceu parâmetros técnicos que norteiam a avaliação de métodos futuros. Este trabalho estimula a produção de novos conteúdos científicos que supram as lacunas identificadas por Bachras, Raptis e Avouris (2019).

A discussão dos resultados assumiu o viés das possíveis contribuições que o método para persistência espacial no HoloLens deste trabalho poderia ofertar aos trabalhos correlatos. O sistema de endereçamento de âncoras caracterizou a escalabilidade do método para ambientes com diferentes proporções. A independência de mapeamento prévio do ambiente na geração de executável tornou o método genérico para diferentes contextos de aplicação. O vínculo dos objetos virtuais com suas respectivas âncoras mais próximas forneceu benefícios de desempenho computacional análogos ao trabalho de He et al. (2019).

5.1 Considerações finais

Medidas de contingência à pandemia de COVID-19 influenciaram a realização do experimento com o método para persistência espacial no HoloLens. O ambiente de ensaio inicialmente previsto era um almoxarifado com dimensões superiores ao ambiente utilizado. Neste almoxarifado seria possível verificar o comportamento do método nas três coordenadas cartesianas, além do acesso aos desenhos técnicos que serviriam como ilustração em escala do ambiente. Com as medidas protetivas, o acesso a este espaço foi revogado, sendo necessária a readequação dos planos para a indústria de confecção citada na pesquisa. Este novo local não possui teto com altura suficiente para que deslocamentos verticais demandassem a criação de âncoras em diferentes níveis do eixo Z.

O método de calibração e coleta de dados com reconhecimento de marcador fiducial é uma sugestão técnica, fundamentada nos relatos de experiência em pesquisas como as de Palmarini et al. (2018) e Almeida (2020). Embora esta não seja a única forma

possível para determinar o ponto de origem e direções de eixos cartesianos comuns à toda execução de uma aplicação, as pesquisas citadas recomendam a calibração por reconhecimento de marcação fiducial como forma de reduzir a ação humana no processo.

As suspeitas levantadas pela pesquisa sobre os fatores que influenciaram negativamente o comportamento do HoloLens, em algumas circunstâncias, são potenciais alvos de investigação para trabalhos futuros. Tratam-se de limitações do dispositivo que sugerem esforços para o tratamento destas, a exemplo do funcionamento inadequado do HoloLens na incidência de luz solar.

Embora a pesquisa realizada tenha inspiração nas demandas do setor industrial, o método para persistência espacial no HoloLens que foi proposto não é limitado apenas a este contexto. Sistemas de realidade aumentada com criticidade de precisão e acurácia na exibição dos hologramas podem se beneficiar dos resultados alcançados neste trabalho.

O escopo da pesquisa foi restrito ao mecanismo de persistência espacial disponível para o HoloLens. Contudo, outros sistemas e dispositivos de realidade aumentada podem apresentar diferentes estratégias para suprir a necessidade de fixar objetos virtuais no ambiente real. Realizar a comparação destas estratégias e/ou verificar a compatibilidade do método para persistência espacial no HoloLens apresentado nesta pesquisa são formas de dar continuidade a este trabalho.

O lançamento do HoloLens 2 aconteceu em Fevereiro de 2019 (KELLY, 2019), com início de sua comercialização em Novembro de 2019. Na revisão de literatura realizada nesta pesquisa não foram identificados trabalhos que já estivessem utilizando o HoloLens 2. A Microsoft anunciou que o novo dispositivo contempla melhorias como a ampliação do campo de visão, melhoria de desempenho da unidade de processamento holográfico, aumento na velocidade de processamento, maior estabilidade na exibição dos hologramas, rastreamento ocular e interatividade com todas as articulações das mãos do usuário (MICROSOFT, 2020). Todos estes avanços colaboram para construção de conteúdos de realidade aumentada, ampliando as possibilidades de pesquisa, desenvolvimento e inovação do setor.

É importante ressaltar que a documentação da Microsoft não distingue o conceito de âncora entre as diferentes versões do HoloLens. Suspeita-se que a melhoria na estabilidade de exibição dos hologramas esteja relacionada ao refinamento do mapeamento do ambiente real e do rastreamento de movimentos realizado com o HoloLens. Assim, o método para persistência espacial no HoloLens apresentado nesta pesquisa em teoria também é relevante para o HoloLens 2. Contudo, é necessário investigar os ganhos reais ao utilizar o método para persistência espacial no HoloLens no novo equipamento.

O método para persistência espacial no HoloLens proposto cumpre o objetivo geral desta pesquisa e responde a questão norteadora. Sua implementação em aplicativo para o HoloLens apresentou valores de precisão e acurácia na exibição de hologramas significativamente relevantes em comparação ao volume do ambiente de ensaio. O método demonstrou-se efetivo para aplicações do HoloLens em contextos industriais e semelhantes.

A. APÊNDICE: CÓDIGO FONTE DO APLICATIVO DE ENSAIO

A.1 Classes genéricas do padrão MVC

O código fonte do aplicativo tem inspiração no padrão de arquitetura de *software* conhecido como *Model, View, Controller (MVC)*. Neste padrão o aplicativo é separado em camadas, onde as classes de *Views* são responsáveis pelas interações com o usuário, as classes de *Models* operam sobre manipulações de dados e as classes de *Controllers* implementam as regras de negócio da solução. Assim, para o desenvolvimento do código fonte do aplicativo utilizado no ensaio desta pesquisa, foram definidas as seguintes classes genéricas para contemplar o padrão *MVC*.

```
1 using System;
2
3 namespace Cimatec.MVC
4 {
5     [Serializable]
6     public class ViewModel { }
7 }
```

```
1 namespace Cimatec.MVC
2 {
3     public class Controller { }
4 }
```

```
1 using System;
2
3 namespace Cimatec.MVC
4 {
5     [Serializable]
6     public class Model { }
7 }
```

```

1 using UnityEngine;
2
3 namespace Cimatec.MVC
4 {
5     public class View<VM, C> : MonoBehaviour
6     {
7         where VM : ViewModel, new()
8         where C : Controller, new()
9     {
10        public VM ViewModel = new VM();
11        public C Controller = new C();
12    }
13
14    public class ViewSingleton<VM, C, T> : View<VM, C>
15    {
16        where T : ViewSingleton<VM, C, T>
17        where VM : ViewModel, new()
18        where C : Controller, new()
19    {
20        private static T instance;
21
22        public static T Instance
23        {
24            get
25            {
26                return (instance==null) ? FindObjectOfType<T>() : instance;
27            }
28        }
29
30        protected virtual void Awake()
31        {
32            if ((instance != null) && instance != this)
33            {
34                Application.isEditor?DestroyImmediate(this):Destroy(this);
35            }
36            instance = (T)this;
37        }
38
39        private void OnDestroy()
40        {
41            if (instance == this)
42            {
43                instance = null;
44            }
45        }
46    }
47 }

```

A.2 Main Scene

A cena inicial do aplicativo de ensaio é chamada de “Main” e contém três *game objects* originários do MRTK: HoloLensCamera, DefaultCursor e InputManager. Além disso, foi inserido nesta cena um *game object* vazio chamado “MainView”. Em MainView foram adicionados três componentes de *script* oriundos do MRTK (SpatialMappingObserver, SpatialMappingManager e WorldAnchorManager), além de dois componentes de *script* criados especialmente para esta pesquisa (MainView e SceneManagerService). A Figura A.1 ilustra os componentes de *script* adicionados ao *game object* MainView e os valores dos atributos em cada um deles. Os códigos fontes dos *scripts* criados estão dispostos a seguir.

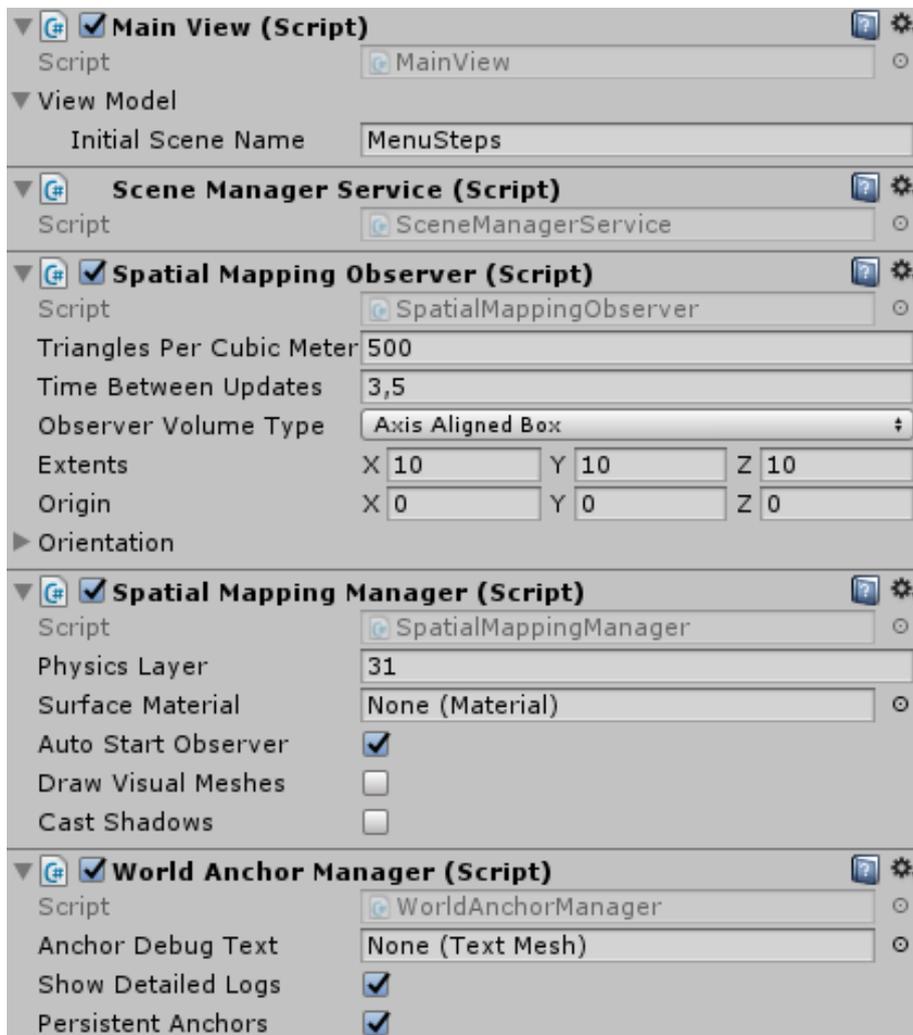


Figura A.1: Atributos dos componentes de *script* do *game object* MainView.

A.2.1 Main (ViewModel, Controller e View)

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using System;
3
4 [Serializable]
5 public class MainVM : ViewModel
6 {
7     public string InitialSceneName = "MenuSteps";
8 }
```

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using Services;
3
4 public class MainController : Controller
5 {
6     public void LoadMenu(string sceneName)
7     {
8         SceneManagerService.Instance.LoadScene(sceneName);
9     }
10 }
```

```
1 using Cimatec.MVC;
2
3 public class MainView : View<MainVM, MainController>
4 {
5     private void Start()
6     {
7         Vuforia.VuforiaBehaviour.Instance.enabled = false;
8         Controller.LoadMenu(ViewModel.InitialSceneName);
9     }
10 }
```

A.2.2 Scene Manager Service

Conjunto de classes criadas para gerenciar a navegação entre cenas no aplicativo.

```
1 using System;
2 using System.Collections;
3 using System.Collections.Generic;
4 using UnityEngine;
5 using UnityEngine.SceneManagement;
6 using Utils;
7
8 namespace Services
9 {
10     [Serializable]
11     public class SceneManagerService : Singleton<SceneManagerService>
12     {
13         public class SceneEntry
14         {
15             public string SceneName { get; set; }
16             public object Parameter { get; set; }
17
18             public SceneEntry(string sceneName, object parameter)
19             {
20                 SceneName = sceneName;
21                 Parameter = parameter;
22             }
23         }
24
25         private readonly string HomeSceneName = "Main";
26
27         public Stack<SceneEntry> Historic { get; private set; }
28
29         public SceneEntry CurrentSceneEntry { get; set; } = null;
30
31         private SceneEntry Previous
32         {
33             get
34             {
35                 if (Historic.Count > 0) { Historic.Pop(); }
36                 if (Historic.Count > 0) { return Historic.Peek(); }
37                 return new SceneEntry(HomeSceneName, null);
38             }
39         }
40
41         protected override void Awake()
42         {
43             base.Awake();
44             DontDestroyOnLoad(this);
45             Historic = new Stack<SceneEntry>();
46         }
47
48         private IEnumerator LoadAsyncScene(
49             SceneEntry entry,
50             bool pushHistoric)
51         {
52             CurrentSceneEntry = entry;
53             if (pushHistoric)
```

```

54     {
55         PushHistoric(entry);
56     }
57
58     AsyncOperation asyncOperation = SceneManager.LoadSceneAsync(
59         CurrentSceneEntry.SceneName,
60         LoadSceneMode.Additive);
61     while (!asyncOperation.isDone)
62     {
63         Debug.LogFormat("Loading {0} ==> {1}%",
64             CurrentSceneEntry.SceneName,
65             asyncOperation.progress * 100);
66         yield return null;
67     }
68 }
69
70 private IEnumerator ChangeCurrentSceneTo(
71     SceneEntry entry,
72     bool pushHistoric)
73 {
74     AsyncOperation asyncOperation = SceneManager.UnloadSceneAsync(
75         CurrentSceneEntry.SceneName);
76     while (!asyncOperation.isDone)
77     {
78         Debug.LogFormat("Unloading {0} ==> {1}%",
79             CurrentSceneEntry.SceneName,
80             asyncOperation.progress * 100);
81         yield return null;
82     }
83     StartCoroutine(LoadAsyncScene(entry, pushHistoric));
84 }
85
86 private void PushHistoric(SceneEntry entry)
87 {
88     if ((Historic.Count > 0) && (Historic.Peek().Equals(entry)))
89     {
90         return;
91     }
92     Historic.Push(entry);
93 }
94
95 public void LoadScene(
96     string sceneName,
97     bool pushHistoric = true,
98     object parameter = null)
99 {
100     LoadScene(
101         new SceneEntry(sceneName, parameter),
102         pushHistoric);
103 }
104
105 private void LoadScene(
106     SceneEntry entry,
107     bool pushHistoric = true)
108 {
109     if (CurrentSceneEntry != null)
110     {
111         StartCoroutine(ChangeCurrentSceneTo(entry, pushHistoric));

```

```
112     }
113     else
114     {
115         StartCoroutine(LoadAsyncScene(entry, pushHistoric));
116     }
117 }
118
119 public void LoadHome(bool pushHistoric = true)
120 {
121     Historic.Clear();
122     LoadScene(HomeSceneName, pushHistoric);
123 }
124
125 public void LoadPrevious()
126 {
127     LoadScene(Previous, false);
128 }
129 }
130 }
```

A.3 Menu Steps Scene

A cena “Menu Steps” é composta por um “Canvas” contendo o componente de *script* MenuStepsView. Neste canvas há também dois botões para seleção das etapas “Setup” ou “Coleta de Dados” no aplicativo. Cada botão responde ao evento “OnClick” executando o método “LoadSetupStep” ou “LoadGetDataStep”, ambos definidos na classe “MenuStepsView”. Os códigos fontes dos *scripts* criados estão dispostos a seguir.

A.3.1 Menu Steps (ViewModel, Controller e View)

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using System;
3
4 [Serializable]
5 public class MenuStepsVM : ViewModel
6 {
7     public string SetupSceneName = "Setup";
8     public string GetDataSceneName = "GetData";
9 }
```

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using Services;
3
4 public class MenuStepsController : Controller
5 {
6     public void LoadScene(string sceneName)
7     {
8         SceneManagerService.Instance.LoadScene(sceneName);
9     }
10 }
```

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using System;
3
4 public class MenuStepsView : View<MenuStepsVM, MenuStepsController>
5 {
6     public void LoadSetupStep()
7     {
8         Controller.LoadScene(ViewModel.SetupSceneName);
9     }
10
11     public void LoadGetDataStep()
12     {
13         Controller.LoadScene(ViewModel.GetDataSceneName);
14     }
15 }
```

A.4 Classes genéricas para as etapas

Visando o reaproveitamento de código nas diferentes etapas de ensaio, foram criadas classes genéricas para que o código fonte de cada uma pudesse se ater as suas especificidades.

```
1 using Cimatec.MVC;
2 using System;
3 using System.Globalization;
4 using System.IO;
5 using UnityEngine;
6
7 public interface IExperimentModel
8 {
9     void WriteData(string anchorAddress, Vector3 position);
10 }
11
12 public abstract class ExperimentModel : Model, IExperimentModel
13 {
14     private static readonly string ROOTPATH = $"{Application.
15         persistentDataPath}/AnchorExperiment/Data";
16     private static readonly string CSV_FORMAT = "
17         {0};{1};{2};{3};{4};{5}";
18     private static readonly string CSV_HEADER = String.Format(
19         CSV_FORMAT, "Timestamp", "Point", "AnchorAddress", "X", "Y", "Z");
20
21     private static DirectoryInfo RootDirectoryInfo;
22     private static string Filename;
23     private static int PointCounter;
24     private static CultureInfo CultureInfo = new CultureInfo("pt-BR");
25
26     public ExperimentModel(string filename)
27     {
28         RootDirectoryInfo = new DirectoryInfo(ROOTPATH);
29         if (!RootDirectoryInfo.Exists)
30         {
31             try
32             {
33                 RootDirectoryInfo.Create();
34             }
35             catch (Exception e)
36             {
37                 Debug.LogError($"Create {ROOTPATH} failed! {e.Message}");
38             }
39         }
40         CreateFile(filename);
41         CultureInfo.NumberFormat.NumberDecimalSeparator = ",";
42     }
43
44     private void CreateFile(string filename)
45     {
46         PointCounter = 0;
47         Filename = $"{RootDirectoryInfo.FullName}/{filename}";
48         FileStream fileStream = null;
49         try
```

```

48     {
49         fileStream = File.Create(Filename);
50     }
51     catch (Exception e)
52     {
53         Debug.LogError($"Create {filename} failed! {e.Message}");
54     }
55     using (StreamWriter writer = new StreamWriter(fileStream))
56     {
57         writer.WriteLine(CSV_HEADER);
58     }
59 }
60
61 public void WriteData(string anchorAddress, Vector3 position)
62 {
63     string data = string.Format(
64         CSV_FORMAT,
65         DateTime.Now.ToString("yyyy/MM/dd hh:mm:ss.fff"),
66         PointCounter++,
67         anchorAddress,
68         position.x.ToString(CultureInfo),
69         position.y.ToString(CultureInfo),
70         position.z.ToString(CultureInfo)
71     );
72     using (StreamWriter writer = File.AppendText(Filename))
73     {
74         writer.WriteLine(data);
75     }
76 }
77 }

```

```

1 using Cimatec.MVC;
2 using HoloToolkit.Unity;
3 using System;
4 using System.Collections.Generic;
5 using System.Linq;
6 using System.Runtime.InteropServices.WindowsRuntime;
7 using UnityEngine;
8 using UnityEngine.XR.WSA;
9 using Vuforia;
10
11 public class ExperimentController : Controller
12 {
13     private static readonly float ANCHOR_SPACING = 3.46f;
14
15     protected Dictionary<string, GameObject> Anchors = new Dictionary<
16         string, GameObject>();
17     protected GameObject AnchorPrefab;
18     protected GameObject MainAnchor;
19     protected IExperimentModel Model;
20
21     private GameObject ObjectPrefab;
22     private Transform Marker;
23
24     #if !UNITY_EDITOR
25     protected WorldAnchorManager AnchorManager = WorldAnchorManager.
26         Instance;
27 #endif

```

```

26
27 public virtual void Start(
28     GameObject anchorPrefab,
29     GameObject objectPrefab,
30     Transform marker
31 )
32 {
33     AnchorPrefab = anchorPrefab;
34     ObjectPrefab = objectPrefab;
35     Marker = marker;
36
37     VuforiaBehaviour.Instance.enabled = true;
38     TrackerManager.Instance.GetStateManager().ReassociateTrackables
39     ();
40 }
41 public void OkClicked()
42 {
43     Vector3 anchorAddress = GetAnchorAddress(Marker);
44     GameObject anchor = GetAnchor(anchorAddress);
45
46     GameObject gObj = GameObject.Instantiate(ObjectPrefab);
47     gObj.transform.position = Marker.position;
48     gObj.transform.parent = anchor.transform;
49
50     Vector3 position = Vector3.Scale(
51         gObj.transform.localPosition,
52         anchor.transform.localScale);
53     Model.WriteData(anchor.name, position);
54 }
55
56 private GameObject GetAnchor(Vector3 address)
57 {
58     GameObject anchor;
59     string anchorName = address.ToString("F0");
60
61     if (!Anchors.TryGetValue(anchorName, out anchor))
62     {
63         // A escala da MainAnchor é 0,1 (10cm).
64         Vector3 position = MainAnchor.transform.TransformPoint(address
65             * ANCHOR_SPACING * 10);
66         anchor = GameObject.Instantiate(
67             AnchorPrefab,
68             position,
69             MainAnchor.transform.rotation);
70 #if !UNITY_EDITOR
71         AnchorManager.AttachAnchor(anchor, anchorName);
72         AnchorManager.AnchorStore.Load(anchorName, anchor);
73 #endif
74         Anchors.Add(anchorName, anchor);
75     }
76
77     anchor.name = anchorName;
78     return anchor;
79 }
80 private Vector3 GetAnchorAddress(Transform marker)
81 {

```

```

82     if (MainAnchor == null) { return InstantiateMainAnchor(marker);
      }
83
84     Vector3 relativePos = MainAnchor.transform.InverseTransformPoint
      (marker.position);
85     relativePos = Vector3.Scale(relativePos, MainAnchor.transform.
      localScale);
86     relativePos /= ANCHOR_SPACING;
87     Vector3 address = new Vector3(
88         Mathf.Round(relativePos.x),
89         Mathf.Round(relativePos.y),
90         Mathf.Round(relativePos.z));
91
92     return address;
93 }
94
95 private Vector3 InstantiateMainAnchor(Transform marker)
96 {
97     Vector3 address = Vector3.zero;
98     string anchorName = address.ToString("F0");
99     MainAnchor = GameObject.Instantiate(AnchorPrefab);
100    MainAnchor.transform.position = marker.position;
101    MainAnchor.transform.rotation = marker.rotation;
102    MainAnchor.name = anchorName;
103    #if !UNITY_EDITOR
104        AnchorManager.AttachAnchor(MainAnchor, anchorName);
105        AnchorManager.AnchorStore.Load(anchorName, MainAnchor);
106    #endif
107    Anchors.Add(anchorName, MainAnchor);
108
109    return address;
110 }
111 }

```

```

1 using Cimatec.MVC;
2 using UnityEngine;
3
4 public class ExperimentView<EC> : View<ViewModel, EC>
5     where EC : ExperimentController, new()
6 {
7     public GameObject AnchorPrefab;
8     public GameObject ObjectPrefab;
9     public Transform Gizmo;
10
11     void Start()
12     {
13         Controller.Start(AnchorPrefab, ObjectPrefab, Gizmo);
14     }
15
16     void Update() { }
17
18     public void OnBtnOkClick()
19     {
20         Controller.OkClicked();
21     }
22 }

```

A.5 Setup Scene

Na cena “Setup” estão implementados os procedimentos para realização da etapa nmeumônica definida na subseção 4.4.1. A cena é composta por um *game object* chamado “ImageTarget” onde foram adicionados três componentes de *script* do Vuforia (ImageTargetBehaviour, TurnOffBehaviour e DefaultTrackableEventHandler), além de um componente de *script* criado especialmente para esta pesquisa (SetupView). A Figura A.2 ilustra os componentes de *script* adicionados ao *game object* ImageTarget e os valores dos atributos em cada um deles. As classes de Model, View e Controller criadas para etapa Setup estão dispostas na subseção a seguir.

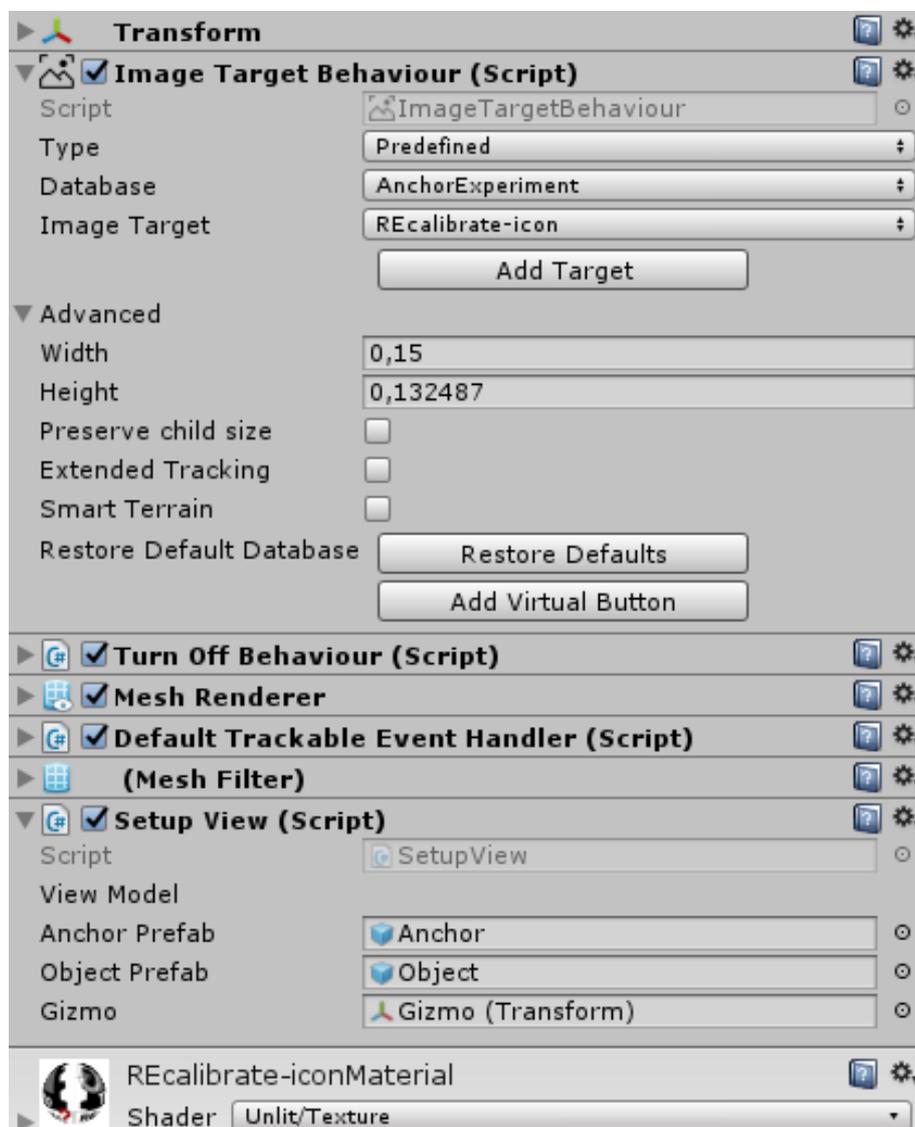


Figura A.2: Atributos dos componentes de *script* do *game object* ImageTarget na cena Setup.

Nos atributos do componente SetupView da Figura A.2 é possível verificar no “ViewModel” a presença de dois *prefabs* (AnchorPrefab e ObjectPrefab), além de um *game object* (Gizmo). Estes elementos não possuem componente de script. Ambos *prefabs* são esferas de 10cm com cores distintas que representam respectivamente instâncias visuais de âncoras e posições dos marcadores fiduciais no ambiente real, durante a execução do ensaio. Estes mesmos elementos serão utilizados novamente no componente GetDataView que será apresentado mais adiante.

A.5.1 Setup (Model, Controller, View)

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class SetupModel : ExperimentModel, IExperimentModel
4 {
5     private static readonly string FILENAME = "Setup.csv";
6
7     public SetupModel() : base(FILENAME) { }
8 }
```

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class SetupController : ExperimentController
4 {
5     public override void Start(
6         GameObject anchorPrefab,
7         GameObject objectPrefab,
8         Transform marker)
9     {
10        base.Start(anchorPrefab, objectPrefab, marker);
11        Model = new SetupModel();
12        #if !UNITY_EDITOR
13            AnchorManager.AnchorStore.Clear();
14        #endif
15    }
16 }
```

```
1 public class SetupView : ExperimentView<SetupController> { }
```

A.6 *GetData Scene*

Na cena “GetData” estão implementados os procedimentos para realização da etapa Coleta de Dados definida na subseção 4.4.1. A cena é composta pelo mesmo *game object* “ImageTarget” apresentado anteriormente na cena Setup. A diferença está na substituição do componente de script “SetupView” para “GetDataView”, conforme ilustra a Figura A.3. O código fonte que determina a mudança de comportamento em função da etapa atual está em sequência.

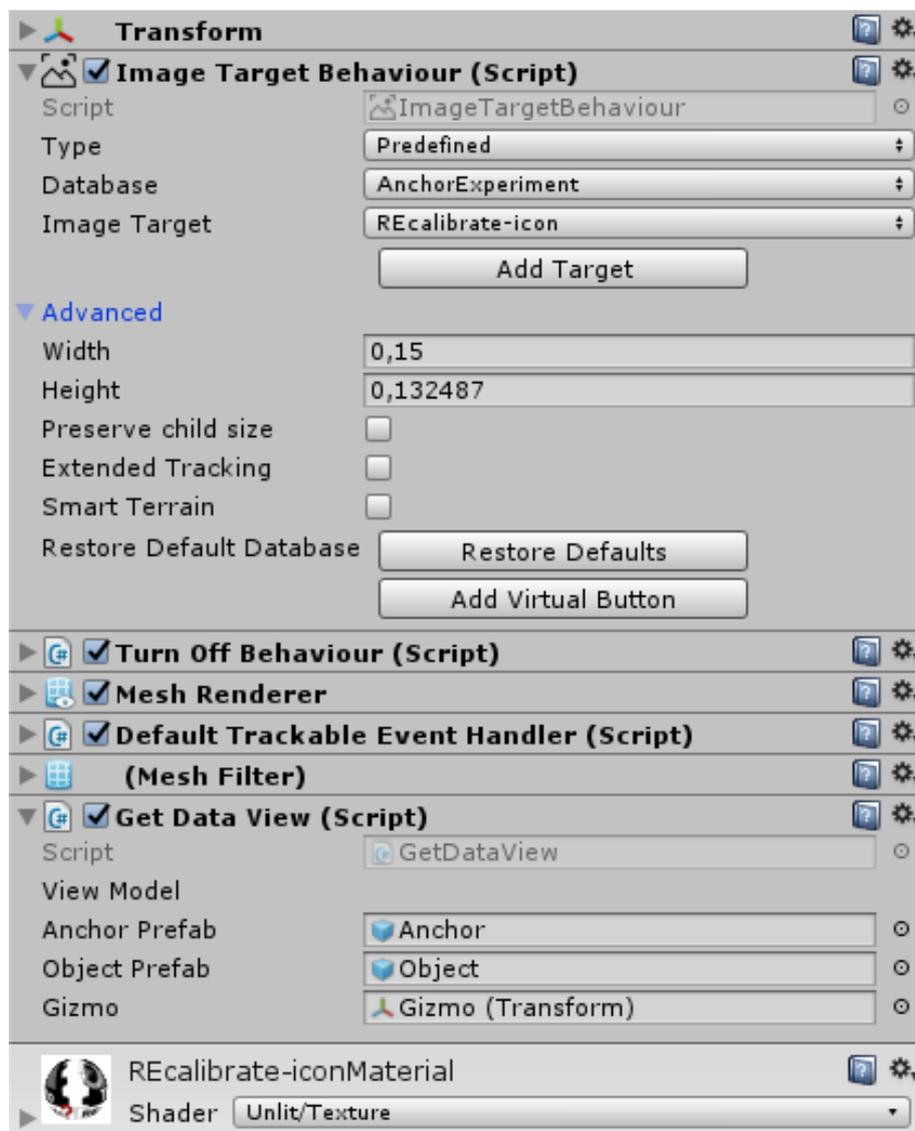


Figura A.3: Atributos dos componentes de *script* do *game object* ImageTarget na cena GetData.

A.6.1 *GetData (Model, Controller, View)*

```
1 using System;
2
3 public class GetDataModel : ExperimentModel, IExperimentModel
4 {
5     private static readonly string FILENAME = "GetData{0}.csv";
6     public GetDataModel() : base(
7         string.Format(
8             FILENAME,
9             DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd_hh-mm-ss")
10        )
11    ) { }
12 }
```

```
1 using UnityEngine;
2
3 public class GetDataController : ExperimentController
4 {
5     public override void Start(
6         GameObject anchorPrefab,
7         GameObject objectPrefab,
8         Transform marker)
9     {
10        base.Start(anchorPrefab, objectPrefab, marker);
11        Model = new GetDataModel();
12
13        #if !UNITY_EDITOR
14        string[] addresses = AnchorManager.AnchorStore.GetAllIds();
15        foreach (string address in addresses)
16        {
17            GameObject anchor = GameObject.Instantiate(AnchorPrefab);
18            AnchorManager.AnchorStore.Load(address, anchor);
19            Anchors.Add(address, anchor);
20
21            if (address == Vector3.zero.ToString("F0"))
22            {
23                MainAnchor = anchor;
24            }
25        }
26        #endif
27    }
28 }
```

```
1 public class GetDataView : ExperimentView<GetDataController> { }
```

B. APÊNDICE: CÓDIGO FONTE DA ANÁLISE DE DADOS

```
1  library(pracma)
2  library(philentropy)
3  library(ggplot2)
4  library(ggribes)
5  library(doSNOW)
6  library(doParallel)
7  library(corrplot)
8  library(Hmisc)
9  library(viridis)
10 library(hrbrthemes)
11 library(vioplot)
12 library(heatmaply)
13 library(scales)
14 library(rgl)
15 library(plot3D)
16
17 DATA_REFERENCE_FILENAME = "reference.csv"
18 DATA_SAMPLE_FILENAME = "samples.csv"
19 CHARTS_FOLDER = "charts"
20
21 # Setting root path
22 setwd("D:/workspace/MCTI/Dissertation - Data Analytics")
23
24 # Creating the chart folder
25 dir.create(CHARTS_FOLDER, showWarnings = F)
26
27 data.reference = read.csv2(
28   file = DATA_REFERENCE_FILENAME,
29   col.names = c('Pt', 'X', 'Y', 'Z'),
30   stringsAsFactors = TRUE)
31
32 data.samples = read.csv2(
33   file = DATA_SAMPLE_FILENAME,
```

```

34   col.names = c('Pt', 'X', 'Y', 'Z'),
35   stringsAsFactors = TRUE)
36
37   data.pts = levels(data.reference$Pt)
38
39   #Setup parallel backend to use many processors. Put -1 for not to
      overload the computer
40   cluster = makeCluster(detectCores() - 1)
41   registerDoSNOW(cluster)
42   pack = c("pracma", "philentropy")
43
44   data.distances = foreach(
45     i = 1:nrow(data.samples),
46     .combine = rbind,
47     .packages = pack
48   ) %dopar% {
49     sample = data.samples[i,]
50     pt = sample$Pt
51     coord.sample = unlist(sample[c('X', 'Y', 'Z')])
52     coord.reference = unlist(data.reference[pt, c('X', 'Y', 'Z')])
53     distance = sample[c('Pt')]
54     distance[c('X', 'Y', 'Z')] = coord.reference - coord.sample
55     distance['Euclidean'] = euclidean(
56       P = coord.sample,
57       Q = coord.reference,
58       testNA = FALSE)
59     distance
60   }
61
62   # Always remember! Stop the cluster
63   stopCluster(cluster)
64   remove(cluster, pack)
65
66   data.distances = na.omit(data.distances)
67

```

```

68 #####
69 ### DENSITY CHART ###
70 #####
71
72 ggplot(data.distances, aes(x = Euclidean, y = Pt, fill = ..x..)) +
73   geom_density_ridges_gradient(
74     scale = 0.9,
75     alpha = 0.1,
76     size = 1,
77     from = 0,
78     to = 0.1,
79     rel_min_height = 0.001) +
80   scale_x_continuous(expand = c(0, 0), n.breaks = 10) +
81   scale_fill_gradient(
82     low = "green",
83     high = "red",
84     space = "Lab",
85     na.value = "grey50",
86     guide = "colourbar",
87     aesthetics = "fill",
88     name = "Distância (m)") +
89   labs (
90     x = 'Distância (m)', y = 'Pontos',
91     title = 'Densidade da Distância Entre os Pontos de Referência
          e Amostras') +
92   theme_ipsum(axis_title_size=12, axis_title_just = "cc") +
93   theme(
94     plot.title = element_text(hjust = 0.5),
95     plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5),
96     legend.position = "right",
97     panel.background = element_rect(
98       fill = "white",
99       colour = "grey50"),
100    panel.border = element_rect(
101      fill = NA,

```

```

102     colour = "black"))
103
104 ggsave(
105   path = CHARTS_FOLDER,
106   filename = "Densidade da Distância Euclidiana Entre os Pontos de
        Referência e Amostras.png",
107   device = "png",
108   width = 32,
109   height = 24,
110   units = "cm",
111   dpi = 'retina')
112
113 #####
114 ### VIOPLLOT CHART ###
115 #####
116
117 ggplot(data.distances, aes(y=Pt, x=Euclidean)) +
118   geom_violin(
119     width=1,
120     fill="grey50",
121     trim=FALSE,
122     scale = "width") +
123   geom_boxplot(width=0.3, color="black") +
124   scale_x_continuous(
125     expand = c(0, 0),
126     limits = c(0, 0.1),
127     n.breaks = 6) +
128   labs(x = '', y = '') +
129   theme(
130     plot.title = element_text(hjust = 0.5),
131     plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5),
132     panel.background = element_rect(
133       fill = "white",
134       colour = "grey50"),
135     panel.border = element_rect(

```

```

136         fill = NA,
137         colour = "white"))
138
139     ggsave(
140         path = CHARTS_FOLDER,
141         filename = "Vioplot da Distância Entre Pontos de Referncia e
142             Amostras.png",
143         device = "png",
144         width = 32,
145         height = 18,
146         units = "cm")
147
148     cLim = c(0, 0.1)
149
150     png(
151         paste(CHARTS_FOLDER, '/Amostras por Ponto.png', sep=''),
152         width = 768,
153         height = 1366,
154         units = "px")
155
156     par(mfrow = c(4, 3), mar = c(0, 0, 1, 0))
157
158     plot.new()
159
160     plot.new()
161
162     data.samples = na.omit(data.samples)
163
164     for(pt in data.pts) {
165         png(
166             paste(CHARTS_FOLDER, '/Amostras_', pt, '.png', sep=''),
167             width = 1360,
168             height = 1360,
169             units = "px")
170
171         samples = data.samples[data.samples$Pt==pt,]
172         reference = data.reference[data.reference$Pt==pt,]
173
174         xMin = min(samples$X, reference$X, na.rm = TRUE)
175         yMin = min(samples$Y, reference$Y, na.rm = TRUE)

```

```

170     zMin = min(samples$Z, reference$Z, na.rm = TRUE)
171
172     xLim = c(xMin, xMin + 0.08)
173     yLim = c(yMin, yMin + 0.08)
174     zLim = c(zMin, zMin + 0.08)
175
176     # Create a scatter plot
177     scatter3D(
178         x=samples$X, y=samples$Y, z=samples$Z,
179         bty = "u",
180         axis.scales = FALSE,
181         xlim=xLim, ylim=yLim, zlim=zLim,
182         col = "red",
183         colkey = FALSE,
184         pch = 20,
185         cex = 10,
186         theta = 45,
187         phi = 45,
188         axes = FALSE,
189         col.panel = "gray95",
190         col.grid = "black",
191         lwd.panel = 10,
192         ticktype = "detailed",
193         nticks = 8)
194
195     # Add reference point (black color)
196     scatter3D(
197         x=reference$X, y=reference$Y, z=reference$Z,
198         labels = pt,
199         id.n = 1,
200         add = TRUE,
201         colkey = FALSE,
202         pch = 20,
203         cex = 20,
204         col = "black")

```

```
205
206 # Add mean point (blue color)
207 scatter3D(
208     x=mean(samples$X), y=mean(samples$Y), z=mean(samples$Z),
209     labels = pt,
210     id.n = 2,
211     add = TRUE,
212     colkey = FALSE,
213     pch = 20,
214     cex = 20,
215     col = "green")
216
217 dev.off()
218 }
219
220 mtext(
221     outer = TRUE,
222     side = 3,
223     "Amostras por Ponto",
224     cex = 3,
225     line=3)
226
227 dev.off()
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. B. de C. **Um Modelo Computacional Baseado em Realidade Aumentada para Localização e Identificação de Componentes em Ambiente Industrial**. Tese (Doutorado) — Senai CIMATEC, 3 2020. 4.3.1, 5.1

AZUMA, R. T. Making augmented reality a reality. In: **Imaging and Applied Optics 2017 (3D, AIO, COSI, IS, MATH, pcAOP)**. Optical Society of America, 2017. p. JTU1F.1. Disponível em: <<http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=AIO-2017-JTu1F.1>>. 1

BACHRAS, V.; RAPTIS, G. E.; AVOURIS, N. M. On the Use of Persistent Spatial Points for Deploying Path Navigation in Augmented Reality: An Evaluation Study. In: **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. [S.l.]: Springer Verlag, 2019. v. 11749 LNCS, p. 309–318. ISBN 9783030293895. ISSN 16113349. 3.1, 4.1, 4.6, 5

BIS Research. **Global Augmented Reality and Mixed Reality Market-Analysis and Forecast (2018-2025)**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://bisresearch.com/industry-report/global-augmented-reality-mixed-reality-market-2025.html>>. 1

BOOTH, A.; SUTTON, A.; PAPAIOANNOU, D. **Systematic approaches to a successful literature review**. [S.l.]: Sage, 2016. 3.1, 3.1.4

BOTTANI, E.; VIGNALI, G. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. **IISE Transactions**, v. 51, n. 3, p. 284–310, mar 2019. ISSN 2472-5854. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/24725854.2018.1493244>>. 1, 4.6

CHINARA, C. et al. ARnold: A mixed reality short film using microsoft hololens. In: **SMPTE 2017 Annual Technical Conference and Exhibition, SMPTE 2017**. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. v. 2018-Janua, p. 1–12. ISBN 9781614829591. 3.1, 4.1, 4.6

CHUSETTHAGARN, D.; VISOOTTIVISETH, V.; HAGA, J. A prototype of collaborative augment reality environment for hololens. In: **2018 22nd International Computer Science and Engineering Conference, ICSEC 2018**. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. ISBN 9781538681640. 3.1, 4.1, 4.6

CÝRUS, J. et al. Cooperation of Virtual Reality and Real Objects with HoloLens. In: **Advances in Intelligent Systems and Computing**. [S.l.]: Springer Verlag, 2020. v. 944, p. 94–106. ISBN 9783030177973. ISSN 21945365. 2.2, 3.1, 4.1, 4.5, 4.6

FIALA, M. Artag, a fiducial marker system using digital techniques. In: IEEE. **2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)**. [S.l.], 2005. v. 2, p. 590–596. 2.3.1

FUNK, M.; KOSCH, T.; SCHMIDT, A. Interactive worker assistance: Comparing the effects of in-situ projection, head-mounted displays, tablet, and paper instructions.

In: **Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing**. New York, NY, USA: ACM, 2016. (UbiComp '16), p. 934–939. ISBN 978-1-4503-4461-6. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2971648.2971706>>. 1

GATTULLO, M. et al. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 56, p. 276 – 286, 2019. ISSN 0736-5845. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584518301236>>. 1

HE, W. et al. Reducing Latency in a Collaborative Augmented Reality Service. In: **Proceedings - VRCAI 2019: 17th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry**. [S.l.]: Association for Computing Machinery, Inc, 2019. p. 1–9. ISBN 9781450370028. (document), 3.1, 4.1, 4.1, 4.2, 4.3.2, 4.6, 5

JANG, J.; BEDNARZ, T. Holo sensor for smart home, health, entertainment. In: **ACM SIGGRAPH 2018 Appy Hour, SIGGRAPH 2018**. [S.l.]: Association for Computing Machinery, Inc, 2018. ISBN 9781450358071. 3.1, 4.1, 4.6

KAMPHUIS, C. et al. Augmented reality in medical education? **Perspectives on medical education**, Springer, v. 3, n. 4, p. 300–311, 2014. 2.3.1

KATO, H. et al. Artoolkit manual. **PC version**, v. 2, 1999. 2.3.1

KELLY, H. Microsoft's new \$3,500 HoloLens 2 headset means business. **CNN Business**, CNN, Feb 2019. Disponível em: <<https://edition.cnn.com/2019/02/24/tech/microsoft-hololens-2/index.html>>. 5.1

LEE, K. Augmented reality in education and training. **TechTrends**, Springer, v. 56, n. 2, p. 13–21, 2012. 2.3.1

LIU, Y. et al. Technical evaluation of hololens for multimedia: a first look. **IEEE MultiMedia**, IEEE, v. 25, n. 4, p. 8–18, 2018. (document), 1, 2.1, 2.1, 2.3

LU, A. et al. Towards mobile immersive analysis: A study of applications. In: **2016 Workshop on Immersive Analytics (IA)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 25–30. 1

MARTINETTI, A. et al. Reflections on the limited pervasiveness of augmented reality in industrial sectors. **Applied Sciences**, v. 9, n. 16, p. 3382, aug 2019. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3382>>. 1

MASOOD, T.; EGGER, J. Augmented reality in support of industry 4.0—implementation challenges and success factors. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Elsevier Ltd, v. 58, p. 181–195, aug 2019. ISSN 07365845. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584518304101>>. 1

MCJUNKIN, J. L. et al. Development of a mixed reality platform for lateral skull base anatomy. **Otology and Neurotology**, Lippincott Williams and Wilkins, v. 39, n. 10, p. e1137–e1142, 2018. ISSN 15374505. 3.1

MICROSOFT. **Spatial mapping - Mixed Reality**. 2018. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial-mapping>>. (document), 1, 2.2, 2.2, 4.3

MICROSOFT. **HoloLens 2**. 2020. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>. 5.1

NEGES, M. et al. Combining visual natural markers and imu for improved ar based indoor navigation. **Advanced Engineering Informatics**, Elsevier, v. 31, p. 18–31, 2017. 1

NEWCOMBE, R. A. et al. Kinectfusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: IEEE. **2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality**. [S.l.], 2011. p. 127–136. 2.1

PALMARINI, R. et al. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 49, p. 215 – 228, 2018. ISSN 0736-5845. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584517300686>>. 1, 2.3.1, 4.1, 4.3.1, 4.4, 5.1

PTC. Vuforia. Disponível em: <https://developer.vuforia.com/>. Acesso em: 23 Dez 2018. 2018. 2.3.1, 4.4, 4.5

QIAN, L. et al. Comparison of optical see-through head-mounted displays for surgical interventions with object-anchored 2D-display. **International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery**, Springer Verlag, v. 12, n. 6, p. 901–910, jun 2017. ISSN 18616429. 3.1

RABBI, I.; ULLAH, S. A survey on augmented reality challenges and tracking. **Acta Graphica**, v. 24, n. 1-2, p. 29–46, 2016. ISSN 1848-3828. Disponível em: <<http://www.actagraphica.hr/index.php/actagraphica/article/view/44>>. 1

SANNA, A. et al. Using handheld devices to support augmented reality-based maintenance and assembly tasks. In: **2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics, ICCE 2015**. [s.n.], 2015. p. 178–179. Cited By :16. Disponível em: <www.scopus.com>. 1

SAPORITO, S. de S. **Proposta de um Marcador Fiducial e Algoritmo para Estimativa de Coordenadas Espaciais**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. 2.3.1

SHARMA, V. S. et al. An extended reality approach for creating immersive software project workspaces. In: **Proceedings - 2019 IEEE/ACM 12th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering, CHASE 2019**. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. p. 27–30. ISBN 9781728122397. 3.1, 4.1, 4.6

SYBERFELDT, A. et al. Support systems on the industrial shop-floors of the future – operators' perspective on augmented reality. **Procedia CIRP**, v. 44, p. 108 – 113, 2016. ISSN 2212-8271. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116002341>>. 1

The R Foundation. **The R Project for Statistical Computing**. 2020. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. 3.2

Unity Technologies. **Unity3D**. 2020. Disponível em: <<https://unity.com/>>. 4.1

WEBEL, S. et al. An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. **Robotics and autonomous systems**, Elsevier, v. 61, n. 4, p. 398–403, 2013. 2.3.1

YU, S.; QI, L.; TIE, Y. A Calibration Algorithm for Real-Time Scene-Aware Portable Augmented Reality. In: **2019 8th International Symposium on Next Generation Electronics, ISNE 2019**. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. ISBN 9781728120621. 3.1

ZELLER, M. et al. **Spatial anchors**. 2020. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial-anchors>. 4.1, 4.3.2, 4.6

ZHOU, D. T.; ZHOU, T. T.; ZHOU, A. H. **Wearable augmented reality eyeglass communication device including mobile phone and mobile computing via virtual touch screen gesture control and neuron command**. [S.l.]: Google Patents, 2015. US Patent 9,153,074. 2.3.1

Realidade Aumentada em Contexto Industrial: Um Método para Persistência Espacial no HoloLens.

Jandson Santos Nunes

Salvador, Outubro de 2020.