



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

BRENO SALVADOR DE FREITAS



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DE
USABILIDADE DE SISTEMAS DE REALIDADE AUMENTADA APLICADAS A
CENÁRIOS DA INDÚSTRIA



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2021

BRENO SALVADOR DE FREITAS

INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DE USABILIDADE
DE SISTEMAS DE REALIDADE AUMENTADA APLICADAS A CENÁRIOS DA
INDÚSTRIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Professor Danilo Freire de Souza Santos, D.Sc.
Orientador

Campina Grande
2021

BRENO SALVADOR DE FREITAS

INVESTIGAÇÃO E ANÁLISE DE FERRAMENTAS PARA AVALIAÇÃO DE USABILIDADE
DE SISTEMAS DE REALIDADE AUMENTADA APLICADAS A CENÁRIOS DA
INDÚSTRIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Trabalho aprovado em: 07 / 10 / 2021

Professor Danilo Freire de Souza Santos, D.Sc.
Orientador

Professor Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior, D.Sc.
Avaliador

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais. A presença do Senhor além do carinho, afeto, dedicação e cuidado dos meus pais durante toda a minha existência e caminhada foram a mola propulsora que permitiu o meu avanço, mesmo durante os momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a graduação e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

À minha família, que me incentivou em todos os momentos enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao professor Danilo Freire, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação.

Aos professores e colegas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me ajudaram na trajetória e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

À Universidade Federal de Campina Grande, essencial no meu processo de formação profissional como engenheiro eletricitista, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos da graduação.

*“Nenhuma Engenharia
constrói caráter, mas com
caráter se faz os melhores
engenheiros.”*

Jordan Lucas.

RESUMO

Visando a necessidade de distanciamento social em contexto laboral devido à pandemia do Covid-19, tão como o avanço tecnológico da indústria 4.0, o presente trabalho desenvolveu uma metodologia de avaliação de usabilidade de sistemas de Realidade Aumentada voltados para a manutenção colaborativa remota de máquinas industriais. Para tanto, se propõe neste trabalho nove requisitos mínimos de usabilidade que devem ser cumpridos para que esses sistemas sejam viáveis em cenários reais da indústria. Para empregar e testar os requisitos mínimos, foi feita uma avaliação analítica em um caso de uso de um cenário industrial e uma validação com o protótipo de um sistema de Realidade Aumentada usado na manutenção de uma máquina em uma fábrica de doces. Foi relatado quais requisitos foram cumpridos pelos sistemas, o quanto eles são viáveis para a indústria e a efetividade da metodologia. Por fim, foi feita uma discussão sobre a importância da metodologia, elucidando a consequência de promover sistemas de Realidade Aumentada com uma ótima usabilidade na indústria.

Palavras-chave: Covid-19, Indústria, Metodologia, Usabilidade, Sistemas, Realidade Aumentada, Manutenção Colaborativa Remota, Máquinas, Requisitos Mínimos, Avaliação Analítica, Validação.

ABSTRACT

Aiming at the need for social distancing in the work context due to the Covid-19 pandemic, as well as the technological advance of industry 4.0, this work developed a methodology for evaluating the usability of Augmented Reality systems aimed at remote collaborative maintenance of industrial machines. Therefore, the work proposed nine minimum usability requirements that must be met for these systems to be viable in real industry scenarios. To employ and test the minimum requirements, an analytical evaluation was carried out in a use case of an industrial scenario and a validation was made with a prototype of an Augmented Reality system used in the maintenance of a machine in a candy factory. It was reported which requirements were met by the systems, how viable they are for the industry and the effectiveness of the methodology. Finally, a discussion was made about the importance of the methodology, elucidating the consequence of promoting Augmented Reality systems with excellent usability in the industry.

Keywords: Covid-19, Industry, Methodology, Usability, Systems, Augmented Reality, Remote Collaborative Maintenance, Machines, Minimum Requirements, Analytical Evaluation, Validation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de fluxo do sistema proposto.....	23
Figura 2 – Arquitetura do sistema proposto	24
Figura 3 – Interface gráfica do usuário do ponto de vista do operador remoto.....	25
Figura 4 – Geometrias de ferramentas em formato CAD 3D padrões do sistema proposto	25
Figura 5 – (a) Engenheiro auxiliando na manutenção através de um PC; (b) Técnico recebendo a assistência do engenheiro usando um HMD Hololens da Microsoft	26
Figura 6 – Metodologia criada para adaptar as heurísticas	29
Figura 7 – Homem usando um Hololens 2 com óculos de grau em conjunto.....	35
Figura 8 – Representação de uma pequena aplicação com Three.js	38
Figura 9 – Página para entrar em uma sessão de RA	40
Figura 10 – Página para criar uma sessão de RA	40
Figura 11 – Representação da sessão de RA	41
Figura 12 – Exemplo de interação com desenho livre.....	42
Figura 13 – Usuário local apontando a câmera do smartphone para a máquina embaladora.....	43
Figura 14 – Tela do laptop do usuário remoto enquanto ele desenha alguns traços virtuais no painel da máquina.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulário de checagem de requisitos mínimos de usabilidade	31
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
RA	Realidade Aumentada
AR	<i>Augmented Reality</i>
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)
RV	Realidade Virtual
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de programação de aplicações)
UAEE	Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
MDN	<i>Mozilla Developer Network</i> (Rede do Desenvolvedor Mozilla)
WebGL	<i>Web Graphics Library</i> (Biblioteca Gráfica da Web)
3D	3 Dimensões
ID	Identificação/Identificador
HMD	<i>Head-Mounted Display</i> (Display Montado na Cabeça)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
PDF	<i>Portable Document Format</i> (Formato de Documento Portável)
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Linguagem de Consulta Estruturada)
PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
IHC	Interface Homem-Computador
TXT	Texto

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Estrutura do trabalho.....	14
2	Fundamentação Teórica.....	16
2.1	Realidade Aumentada na Indústria 4.0	16
2.2	Manutenção Colaborativa Remota Baseada em Realidade Aumentada.....	17
2.3	Avaliação de Usabilidade de Sistemas de Realidade Aumentada.....	19
3	Caso de Uso de Realidade Aumentada na Indústria	22
4	Metodologia.....	28
4.1	Adaptação de Heurísticas de Usabilidade para Sistemas Colaborativos Remotos de Realidade Aumentada.....	28
4.2	Metodologia para Avaliar Usabilidade de Sistemas Colaborativos Remotos de Realidade Aumentada para Manutenção de Máquinas Industriais	30
5	Avaliação Analítica da Metodologia no Cenário da Indústria.....	34
6	Sistema ARMain	37
6.1	Fundamentação Tecnológica.....	37
6.1.1	WebXR.....	37
6.1.2	Three.js.....	37
6.2	Protótipo do ARMain.....	39
6.3	Teste do Protótipo Na Indústria	42
7	Validação da Metodologia com o ARMain	45
7.1	Avaliação da Usabilidade do ARMain.....	45
7.2	Discussão Sobre os Resultados	47
8	Conclusão	49
	Referências	50

1 INTRODUÇÃO

É notável que algumas tecnologias antes vistas apenas no cinema em filmes de ficção científica, estão cada vez mais se tornando realidade. Tecnologias como o toque de tela, conversas por vídeo através de *webcam* e a biometria digital, hoje em dia encontram-se acessíveis na palma da mão através de dispositivos móveis inteligentes. Esse avanço tecnológico está possibilitando cada vez mais a evolução de outras tecnologias como a Realidade Aumentada (RA).

A RA é uma tecnologia que permite a sobreposição de objetos virtuais com o ambiente físico, através de algum dispositivo tecnológico. Essa tecnologia pode ser usada e explorada nos mais variados tipos de aplicações, em espaços internos e externos.

Para DE PACE et al. (2018), apesar de alguns anos atrás a falta de dispositivos de custo acessível ter sido a principal barreira para uma ampla adoção de aplicativos de RA, a ampla adoção de dispositivos móveis removeu essa limitação, já que eles apresentam todos os sensores e unidades de processamento necessários para desenvolver e implantar aplicativos de RA.

A RA vem sendo utilizada não apenas para entretenimento, na medicina, aplicações militares, educação e turismo, como também em cenários da indústria. Na indústria, essa tecnologia abre espaço para o desenvolvimento de sistemas que objetivam o aumento da eficiência e rendimento da produtividade, tão como a prevenção de custos adicionais na manutenção industrial, dentre outras vantagens.

Para desenvolver sistemas de RA para a indústria, é muito importante se preocupar com a usabilidade da aplicação, principalmente nessa fase em que a tecnologia ainda é considerada uma novidade no dia a dia da maioria dos profissionais. Por isso, esse trabalho tem como foco a análise e avaliação da usabilidade de sistemas de RA para manutenção colaborativa remota na indústria.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliar a usabilidade de sistemas de RA para manutenção colaborativa remota na indústria. A metodologia define requisitos mínimos a serem cumpridos para que os sistemas tenham uma usabilidade que satisfaça as necessidades e exigências mínimas do usuário.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Realizar um estudo sobre o emprego da RA na indústria 4.0 e sobre a manutenção colaborativa remota baseada em RA;
- Descrever um caso de uso de RA na indústria;
- Adaptar heurísticas de usabilidade de sistemas similares ou complementares à RA para sistemas colaborativos remotos de RA;
- Desenvolver uma metodologia com requisitos mínimos para avaliar usabilidade de sistemas colaborativos remotos de RA na indústria;
- Fazer a validação da metodologia em um caso prático;
- Analisar os resultados obtidos com a metodologia proposta e discutir sobre os desafios do uso da RA na indústria 4.0.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste primeiro capítulo, o presente trabalho está dividido em oito capítulos posteriores. No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica, a qual explicita como a RA está sendo empregada para melhorar a eficiência e produtividade dos processos na indústria 4.0; como a manutenção colaborativa remota na indústria 4.0 está evoluindo com a implantação da RA; e a importância da avaliação de usabilidade de sistemas de RA tão como a apresentação de alguns métodos avaliativos. Posteriormente, no Capítulo 3, é apresentado um caso de uso de RA na indústria. No Capítulo 4, é tratada a metodologia utilizada para avaliar a usabilidade de sistemas de RA na manutenção colaborativa remota de máquinas industriais. Em seguida, no Capítulo 5, é feita uma avaliação analítica do caso de uso apresentado no Capítulo 3, usando a metodologia apresentada no Capítulo 4. No Capítulo 6, é apresentado o ARMain, um sistema usado para manutenção colaborativa remota através de RA. Na etapa seguinte, Capítulo 7, é feita a validação da metodologia apresentada no Capítulo 4 utilizando-a para avaliar a usabilidade do protótipo do

ARMain, além de uma discussão sobre a efetividade da metodologia na avaliação tão como a compatibilidade do protótipo no meio industrial. O trabalho é finalizado no Capítulo 8, com o encaminhamento das conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentadas considerações de alguns autores que estudam a importância da RA na quarta revolução industrial, o impacto que a manutenção na indústria sofre com a chegada e avanço dos sistemas de RA e o quanto importante é a avaliação da usabilidade desses sistemas.

2.1 REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA 4.0

Após as três primeiras revoluções industriais, a quarta e nova revolução industrial deu espaço à indústria 4.0 no século XXI, cujo objetivo está sendo introduzir novas tecnologias avançadas em sistemas de manufatura e fábricas. Para PERASSO (2016), essas novas tecnologias chegam para marcar com a automatização, nanotecnologia, robótica, inteligência artificial, RV (Realidade Virtual), RA, impressoras 3D, drones, sistemas de armazenamento de energia e a internet das coisas, tornando a indústria cada vez mais inteligente e eficiente.

De acordo com SANTI et al. (2021), a RA é mundialmente conhecida como uma das tecnologias de ponta da atualidade e um dos pilares da indústria 4.0. Para DE PACE et al. (2018), a aplicação de RA na indústria é relevante, pois melhora muito a comunicação no design do produto e no desenvolvimento da produção, ajudando a identificar e evitar erros de design nas fases iniciais do processo de desenvolvimento; reduzindo o número de protótipos físicos; e economizando tempo e custo para as empresas.

Além disso, DE PACE et al. (2018) também elenca algumas das principais áreas de aplicação de RA na indústria 4.0, como:

- Colaboração Humano-Robô;
- Manutenção;
- Montagem;
- Reparo;
- Treinamento de mão de obra;
- Inspeção de produtos;

- Monitoramento de construção.

No domínio da Colaboração Humano-Robô, a RA é usada para criar interfaces eficientes para interagir com robôs industriais. Já nas tarefas de manutenção, montagem e reparo, a RA melhora suas próprias produtividades. Nas operações de treinamento de mão de obra, os usuários encontram na RA uma solução poderosa para aprimorar suas habilidades. Quanto à inspeção de produtos, os controladores podem notar qualquer discrepância de itens usando sistemas de RA poderosos e versáteis. Por fim, nas operações de monitoramento de construção, a RA destaca qualquer erro ou desvio de uma instalação de forma simples e intuitiva. Dessa forma, a RA pode ser empregada para aumentar a produtividade em quase todas as atividades na indústria, desde atividades básicas no chão de fábrica até suporte a processos de manutenção e treinamento.

Segundo Kolberg et al. (2015), a RA é uma das tecnologias da Indústria 4.0 que permite a automação enxuta, a qual mescla automação com os conceitos de produção enxuta. Nesse caso, a RA torna os colaboradores operadores mais inteligentes de tal forma que eles possam obter informações sobre tempo de ciclo restante dentro de seus campos visuais, apoiando o processo *just-in-time* de produção.

Tendo em vista os diversos campos de atuação da RA na indústria atual, um dos que mais chamam atenção é a de manutenção. Com a RA, a manutenção se tornou mais inteligente e ágil, aumentando a produtividade e eficiência na produção tão como evitando custos adicionais. Isso vem se mostrando possível devido à manutenção colaborativa remota baseada em RA.

2.2 MANUTENÇÃO COLABORATIVA REMOTA BASEADA EM REALIDADE AUMENTADA

Sabe-se que a manutenção é um fator essencial para a produção na indústria, principalmente quando se lida com máquinas. Uma boa manutenção caracteriza-se por uma alta eficácia e eficiência, reduzindo substancialmente as chances das máquinas voltarem a apresentar defeitos e reparando o mais rápido possível, respectivamente.

RODDEN (1991) classifica os sistemas colaborativos em quatro tipos divididos em duas dimensões. Os sistemas da primeira dimensão interagem de forma síncrona ou assíncrona. Algumas atividades, como *brainstorming* requerem que os membros do grupo

cooperem de maneira síncrona, já outras requerem atividades independentes que são discutidas de forma assíncrona. A segunda dimensão diz respeito à localização geográfica dos usuários, que podem estar distribuídos pela rede, colaborando remotamente ou localizados em um mesmo ambiente, colaborando defronte.

Segundo KIRNER et al. (2005), ao ser utilizada em conjunto com o suporte de comunicação existente atualmente, a RA promove uma convergência de recursos que possibilitam, às pessoas remotamente localizadas, usufruírem das vantagens do trabalho presencial, incluindo os vários tipos de interação, mesmo estando em ambientes remotos. Assim, a evolução de outros sistemas vem dando suporte ao desenvolvimento de novos sistemas que permitam uma ótima comunicação entre os operadores local e remoto.

Uma máquina que apresenta defeito pode parar uma linha de produção e isso significa prejuízo, então quanto menos tempo ela ficar inativa durante o período de produção, melhor. A RA chega para aumentar tanto a eficácia quanto a eficiência da manutenção, substituindo os métodos antigos presenciais pela manutenção colaborativa remota baseada em RA. Esse método, por meio de um sistema de hardware e software, permite que o operador local da máquina consiga fazer a manutenção com o suporte de um especialista geograficamente distante, sem a necessidade de deslocamento do especialista até onde a máquina se encontra, evitando possíveis gastos adicionais para a fábrica. Dessa forma, a manutenção consegue ser feita de maneira síncrona e remota.

Ademais, sabe-se que o trabalho remoto vem se mostrando cada vez mais presente na vida dos profissionais, principalmente com o advento da pandemia do Covid-19 que aumentou consideravelmente a necessidade por distanciamento. Na indústria, os sistemas colaborativos remotos baseados em RA foram muito vantajosos também nesse sentido. Os operadores local e remoto não precisam interagir entre si presencialmente aumentando os riscos de contaminação, já que o sistema colaborativo remoto baseado em RA possibilita a interação à distância.

Alguns sistemas de RA para manutenção colaborativa remota já vêm sendo desenvolvidos e implantados em algumas fábricas. Porém, como esses sistemas ainda são relativamente novidades para a maioria dos profissionais da indústria, sua usabilidade deve ser aperfeiçoada e estar em constante evolução para facilitar sua operação.

De acordo com o autor MARSH (1999), usabilidade é a capacidade de realizar tarefas de forma eficaz, eficiente e satisfatória. Ele acredita que quanto mais pessoas conseguirem alcançar os seus objetivos e tarefas e quanto mais satisfeitas elas se sentirem, mais utilizável será considerada a interface de utilizador do sistema avaliado. Para

NIELSEN (1993), o conceito de usabilidade está totalmente relacionado com aceitabilidade. Enquanto a usabilidade engloba a eficácia, eficiência e satisfação, a aceitabilidade foca em tornar o sistema admissível prática e socialmente.

O sistema de RA para manutenção também deve visar uma ótima experiência do usuário, tanto para casos de hardwares como HMDs, como para softwares. Empresas como a Microsoft vêm melhorando cada vez mais a experiência dos usuários com o seu HMD Hololens, buscando conforto no encaixe do dispositivo na cabeça do usuário e um menor peso para que ele possa usar por um longo tempo sem cansar a cabeça. Os softwares que estão sendo implementados tanto para dispositivos como HMDs, como para outros dispositivos móveis (smartphones, tablets, etc), estão sendo programados de forma que facilite o entendimento do usuário aumentando sua curva de aprendizagem a partir de interações com objetos virtuais amigáveis e compreensíveis.

2.3 AVALIAÇÃO DE USABILIDADE DE SISTEMAS DE REALIDADE AUMENTADA

Quando uma tecnologia está frequentemente em transição do setor de pesquisa para o setor industrial, sua transformação de objeto de estudo em produto exige uma ótima usabilidade e qualidade como resultado, já que sistemas que são familiares para pesquisadores não necessariamente são para profissionais da indústria. Por isso, os estudos relacionados à RA também vêm se preocupando não apenas com a interação de conteúdo virtual com o ambiente real, mas também com a interação de potenciais usuários com a tecnologia. Dessa forma, pesquisas a respeito da avaliação da usabilidade de interfaces de RA vêm acontecendo com o propósito de dar suporte a esse cenário.

De acordo com KOSTARAS et al. (2009), foram feitos alguns estudos individuais sobre a usabilidade de algumas aplicações específicas. Como os métodos para avaliar usabilidade de sistemas de RA ainda estão em fase embrionária, esses estudos usaram alguns métodos existentes de avaliação de usabilidade, os quais podem ser divididos em três categorias:

- Investigação;
- Inspeção;
- Teste.

Os métodos de investigação são considerados apropriados para avaliar sistemas de RA. Eles são compostos por questionários e entrevistas, os quais reúnem dados subjetivos que se relacionam com as opiniões e preferências dos usuários em fatores como operacionalidade, eficácia, compreensibilidade e estética do sistema. Para obter conclusões seguras, eles devem ser somados a outros métodos, já que apenas questionários e entrevistas não são suficientes para uma ótima avaliação da usabilidade.

Os métodos de inspeção também são apropriados para avaliar sistemas de RA, porém é essencial que eles sejam modificados para que cubra algumas peculiaridades e novas técnicas de utilização dos sistemas de RA.

Os métodos de teste através do usuário é considerado o principal dos três, pois entrega as conclusões mais efetivas quando avalia sistemas tradicionais. Para aplicar esses métodos à RA, alguns procedimentos também devem ser alterados, se adequando às necessidades de novas interfaces e equipamentos, considerando hardware e software, procurando evitar uma série de problemas metodológicos.

Sabe-se que a principal diferença entre sistemas tradicionais e os de RA é a interação com o ambiente físico, fazendo com que esse método se encaixe com facilidade na avaliação de sistemas tradicionais mas com dificuldade em sistemas de RA. Os sistemas de RA lidam com o ambiente físico de uma forma mais complexa, já que os usuários se movem livremente e interagem também livremente com objetos virtuais presentes no ambiente aumentado, ao invés de simplesmente interagirem com objetos reais e facilmente reconhecidos em sua frente. Sendo assim, é necessário que, para fazer os testes, a organização e contexto do ambiente de teste também seja levado em consideração.

Além disso, o registro das interações dos usuários também é mais complicado de obter porque o emprego de imagens estereoscópicas em sistemas de RA torna a coleta de dados em vídeo um procedimento difícil, uma vez que existe a necessidade do emprego de múltiplas câmeras. Para lidar com essa dificuldade, os dados estereoscópicos devem ser acessados com o uso de hardware ou software especializados.

Outra dificuldade que pode ser citada surge quando os sistemas de RA envolvem vários usuários, exigindo um laboratório de testes com um espaço maior que o tradicional.

Como pode ser observado, mesmo o método que seria considerado como o que pode mais se encaixar na avaliação de usabilidade de sistemas de RA também tem suas dificuldades. Isso acontece porque os métodos ou adaptações de métodos tradicionais para avaliação de usabilidade de sistemas de RA ainda são considerados escassos e

limitados, e por isso há a necessidade de elaboração de um método totalmente direcionado para este campo.

3 CASO DE USO DE REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA

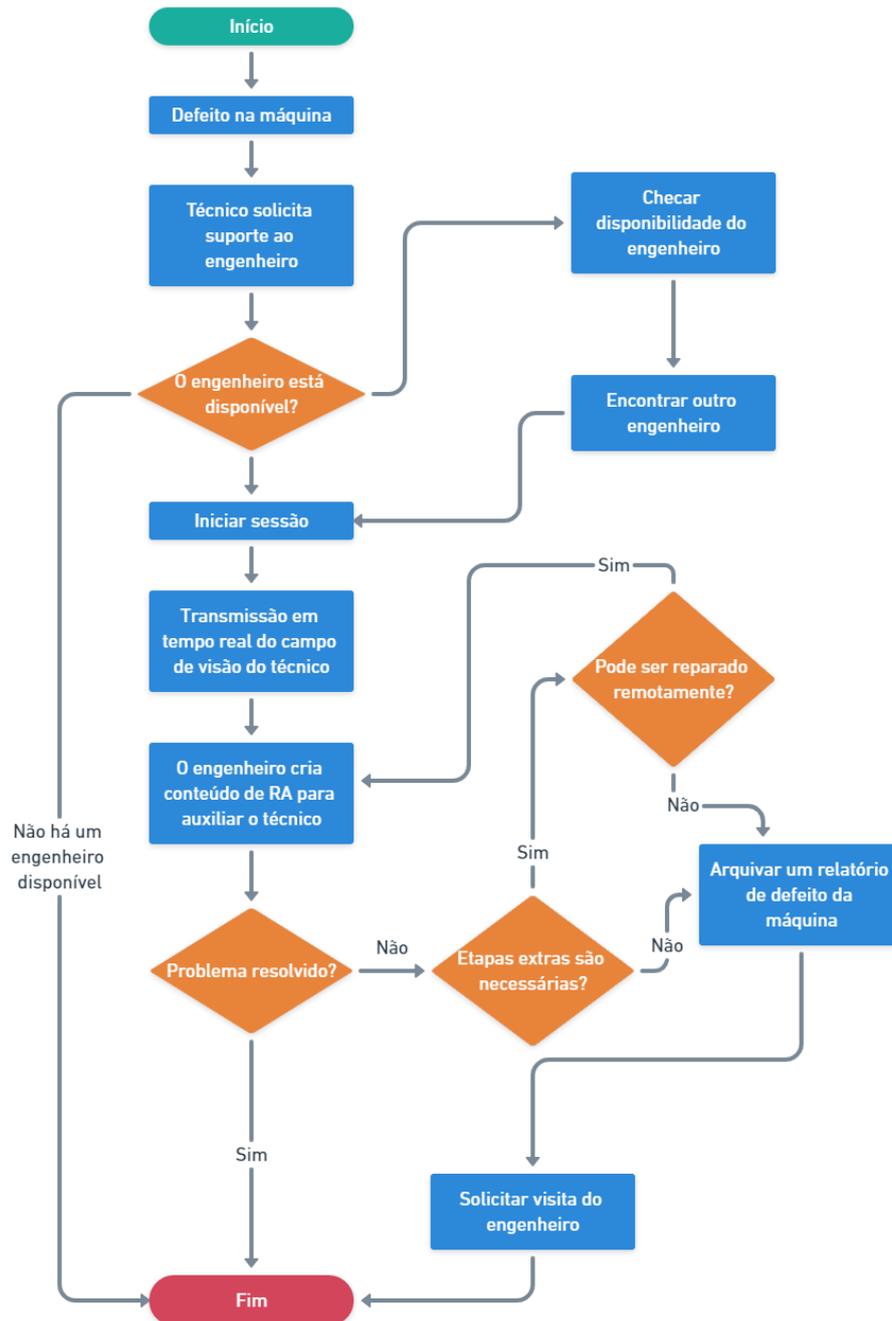
É sabido que já há algumas aplicações de sistemas de realidade aumentada em cenários da indústria atualmente. Um caso de uso é um sistema de RA para manutenção remota colaborativa de grandes máquinas, onde um operador local verifica e faz a manutenção da máquina de ponta a ponta com o auxílio de um operador remoto.

A proposta é fazer com que a manutenção e reparo de máquinas se tornem mais eficientes para o técnico, sendo ele o operador local situado aos arredores da máquina, quanto para o engenheiro especialista da máquina, o qual muitas vezes se encontra relativamente distante. Dessa forma, o engenheiro não precisa se deslocar até o local da máquina para auxiliar em seu reparo ou em sua manutenção geral, evitando desperdício de tempo e custos de deslocamento.

Para o caso de uso apresentado por MOURTZIS et al. (2020), o sistema é usado a partir do momento que uma máquina apresenta defeitos ou caso seja necessária uma manutenção periódica preventiva. Logo em seguida, o técnico que se encontra na indústria usa um dispositivo móvel para entrar em contato com o engenheiro especialista e um HMD Microsoft Hololens para suportar o reconhecimento do ambiente real no seu campo de visão e o recebimento de objetos virtuais que serão possivelmente postos como indicadores ou apontadores. Enquanto isso, o engenheiro usa um computador desktop para se conectar ao técnico. Assim, por meio de protocolos de comunicação dedicados e uma conexão estabelecida, um *streaming* de vídeo do dispositivo do técnico é transmitido em tempo real para o engenheiro especialista, configurando uma teleconferência. Nessa teleconferência, o técnico passa as informações para o engenheiro via voz ou texto para que ele fique a par da situação da máquina. Após isso, o técnico liga o aparelho de RA que escaneia em 3D o ambiente em sua frente, permitindo que o engenheiro possa passar as instruções a partir de indicadores virtuais usando conteúdo de realidade aumentada sob demanda. Desse modo, o dispositivo HMD permite que o técnico consiga visualizar os indicadores virtuais no ambiente real em sua frente, mostrando o que deve ser feito em cada parte da máquina.

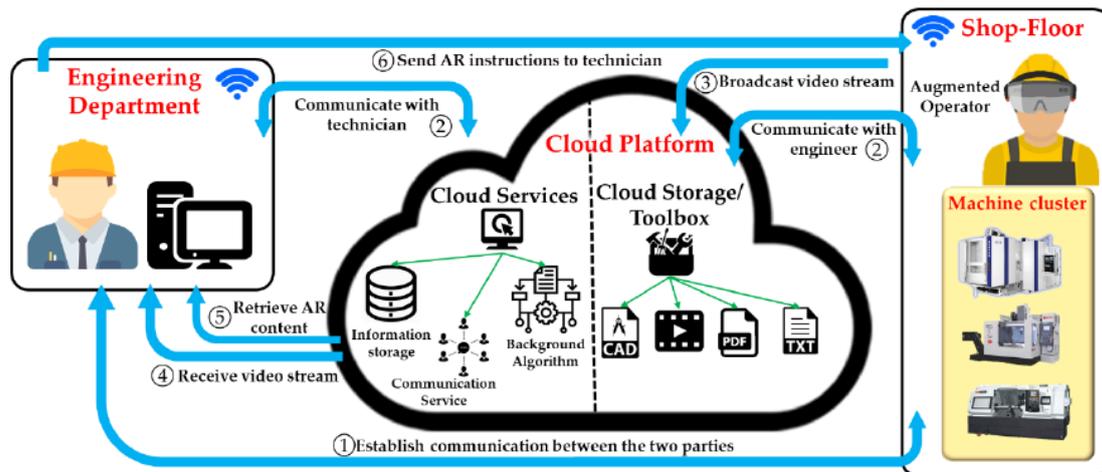
Na Figura 1, é possível ver um diagrama de fluxo do sistema proposto. E na Figura 2, pode-se ver a arquitetura do mesmo sistema e a sua sequência de etapas.

Figura 1 – Diagrama de fluxo do sistema proposto.



Fonte: Adaptado de (MOURTZIS; SIATRAS; ANGELOPOULOS, 2020).

Figura 2. Arquitetura do sistema proposto.

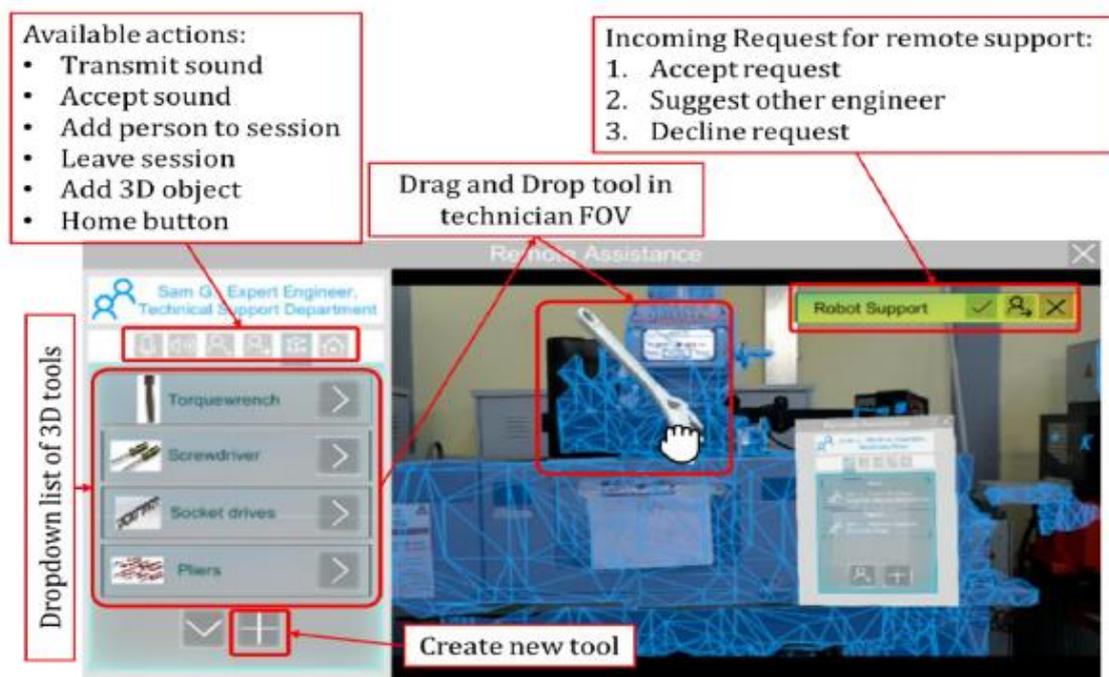


Fonte: (MOURTZIS; SIATRAS; ANGELOPOULOS, 2020).

Ao que diz respeito à arquitetura do sistema proposto, a conexão entre os operadores é online, por intermédio de uma plataforma em nuvem, onde eles podem trocar informações via formato CAD, PDF, TXT além de vídeo como já mencionado anteriormente através da teleconferência. Além disso, tanto o técnico como o engenheiro podem visualizar um ao outro no canto da tela, o que facilita as experiências dos dois. Para que as geometrias dos indicadores virtuais fiquem salvas, o sistema usa um banco de dados SQL na nuvem. Essas geometrias são importadas apenas pelo engenheiro, onde elas podem ser vistas como uma caixa de ferramentas virtual, representando os indicadores virtuais. Caso uma ferramenta necessária não esteja entre as presentes na nuvem, o engenheiro pode adicionar novas ferramentas mais específicas para a máquina em questão, de forma que seja algo customizado de acordo com as necessidades.

Em relação à interface gráfica do usuário, como pode ser vista na Figura 3, o engenheiro pode escolher as ferramentas no canto inferior esquerdo, bastando arrastar e soltar a ferramenta escolhida no campo de visão do técnico. Para adicionar uma nova ferramenta específica, o engenheiro deve pressionar o ícone “mais” que aciona a função “criar ferramenta”, a qual adiciona a geometria em um tipo de arquivo adequado, juntamente com informações relevantes e uma descrição da ferramenta. Os formatos que o banco de dados na nuvem pode receber são das geometrias dos objetos virtuais, sendo .fbx, .dae (Collada), .3ds, .dxf, .obj, já que o mecanismo foi desenvolvido com uso da *engine* de jogos Unity 3D. Um algoritmo de busca inteligente pode gerar sugestões automaticamente para o engenheiro durante a fase de criação da cena de RA.

Figura 3. Interface gráfica do usuário do ponto de vista do operador remoto.



Fonte: (MOURTZIS; SIATRAS; ANGELOPOULOS, 2020).

Na Figura 4, pode-se ver as ferramentas que o engenheiro tem como opção inicialmente, as quais geralmente são as mais comuns na indústria.

Figura 4. Geometrias de ferramentas em formato CAD 3D padrões do sistema proposto.



Fonte: (MOURTZIS; SIATRAS; ANGELOPOULOS, 2020).

Após testar o sistema *in vitro* numa oficina mecânica, foram obtidos *feedbacks* de alguns engenheiros especialistas nas máquinas em questão e técnicos de chão de fábrica. Na Figura 5, é possível ver o teste e validação dos pontos de vista dos dois operadores.

Figura 5. (a) Engenheiro auxiliando na manutenção através de um PC; (b) Técnico recebendo a assistência do engenheiro usando um HMD Hololens da Microsoft.



Fonte: (MOURTZIS; SIATRAS; ANGELOPOULOS, 2020).

Após os testes, foram elencados alguns pontos fortes do sistema, como:

- Esforço mínimo de desenvolvimento exigido pelo engenheiro especialista, bastando arrastar e soltar objetos virtuais no ambiente aumentado;
- Capacidade de criar sessões online devido ao uso da API multijogador do Unity 3D, suportando a conexão remota de vários usuários simultâneos;
- Compatibilidade com vários dispositivos, sendo eles PCs, HMDs e dispositivos móveis de mão;
- O ambiente aumentado é atualizado mesmo com o técnico se movendo;
- Usa objetos virtuais muito vívidos e realísticos por causa do alto poder computacional do Microsoft Hololens;
- Usa ferramentas com aspectos realísticos como indicadores ao invés de apontadores ou setas.

Já os pontos fracos que podem ser considerados são após a descrição do sistema, levando em conta seu fluxo de funcionamento, sua arquitetura, sua interface gráfica de usuário e as ferramentas dispostas inicialmente para uso do engenheiro:

- O alto custo de um HMD. O Hololens 2 da Microsoft custa US\$ 3.500,00 de acordo com a própria MICROSOFT (2021) e mais de R\$40.000,00 em algumas lojas no Brasil;
 - Uma possível solução seria desenvolver o sistema para dispositivos móveis como smartphones e/ou tablets que suportam RA, os quais são significativamente mais baratos.
- A quantidade de ferramentas dispostas inicialmente para o engenheiro é pequena. Isso faz com que na maioria das vezes ele tenha que criar uma nova;
 - Uma sugestão de solução seria o aumento na quantidade de ferramentas presentes inicialmente no banco de dados do sistema, o que não seria uma tarefa árdua e ajudaria consideravelmente o engenheiro.

Apesar de o caso de uso apresentado neste capítulo ser semelhante ao apresentado adiante no Capítulo 6, vale ressaltar que ele é usado como base para uma avaliação analítica da metodologia proposta no trabalho que será apresentada no capítulo seguinte. Já o caso de uso do Capítulo 6, ele é utilizado na validação da mesma metodologia, a qual é realizada no Capítulo 7.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentado como uma metodologia de avaliação de usabilidade de sistemas colaborativos remotos de RA para manutenção de máquinas industriais, se origina de uma adaptação de heurísticas tradicionais de usabilidade.

4.1 ADAPTAÇÃO DE HEURÍSTICAS DE USABILIDADE PARA SISTEMAS COLABORATIVOS REMOTOS DE REALIDADE AUMENTADA

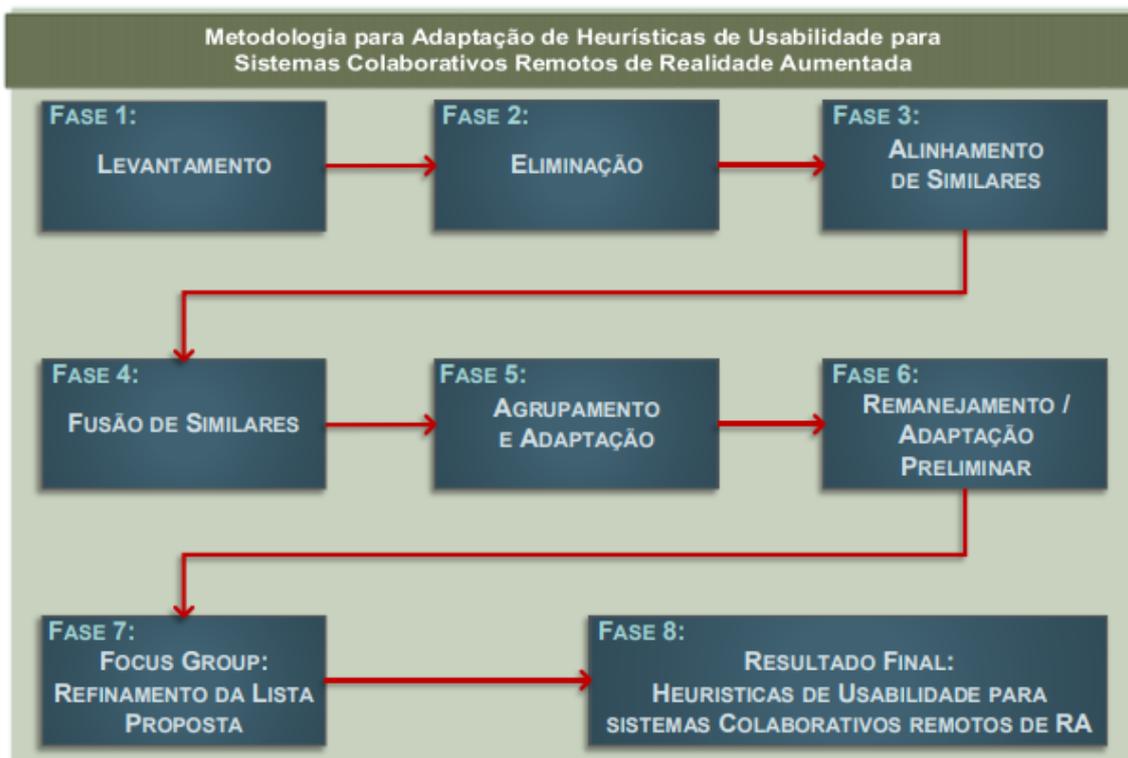
Sabe-se que a realidade aumentada ainda é uma área de estudo considerada em fase embrionária. Por este motivo, é necessário buscar conhecimento em áreas complementares ou similares para elaborar heurísticas que possibilitem a avaliação da usabilidade de sistemas de RA.

Para avaliação de usabilidade de sistemas colaborativos remotos de RA na indústria, foi utilizada como referência a metodologia proposta por FRANKLIN (2014), a qual tem o objetivo de adaptar princípios e heurísticas de áreas similares ou complementares à área de RA, como:

- Princípios gerais de usabilidade;
- Princípios de design de IHC;
- Orientações ou diretrizes de design para RA em dispositivos móveis;
- Heurísticas de usabilidade para avaliação de sistemas colaborativos em geral.

A adaptação passa por oito fases até obter como resultado nove heurísticas que podem ser usadas como requisitos para avaliar a usabilidade de sistemas colaborativos remotos de RA. As fases da adaptação podem ser observadas na Figura 6.

Figura 6 – Metodologia criada para adaptar as heurísticas.



Fonte: (FRANKLIN, 2014).

A primeira fase do processo serviu para um levantamento de 46 heurísticas, princípios e *guidelines* de outras áreas similares ou complementares à de RA. A segunda fase serviu para fazer uma filtragem dos princípios que mais se adequam com o escopo da RA colaborativa remota, ficando apenas 28 remanescentes. A terceira fase foi necessária para selecionar e alinhar heurísticas com conceitos similares. Na quarta fase, foi realizada a fusão dos conceitos similares em uma só heurística, além de adicionar alguns atributos, resultando em cinco heurísticas. Na fase cinco, há a adaptação de outras heurísticas a partir do agrupamento entre as heurísticas remanescentes que não foram utilizadas na fusão de conceitos similares da fase quatro. Este agrupamento foi feito porque as ideias centrais das heurísticas se cruzavam de forma complementar. Na fase seis, as heurísticas resultantes das fases quatro e cinco foram remanejadas de forma a propor uma lista de 14 heurísticas para avaliar usabilidade de interfaces de sistemas colaborativos de RA remota. Na fase sete, as 14 heurísticas foram entregues a cinco especialistas, sendo dois mestres em Design com 2 a 7 anos de experiência em IHC e RA, respectivamente; um mestre em Ciência da Computação com 6 anos de experiência também em IHC e RA; e dois graduandos em Design com média de 2 anos de experiência em IHC e RA. A ideia é que eles analisassem as heurísticas e dessem um retorno após a

realização de um *Focus Group*, o qual é um grupo demograficamente diverso de pessoas reunidas que faz uma discussão e fornece feedback contínuo sobre cada heurística. E por fim, na fase oito, foi obtido o resultado final da proposta de heurísticas da metodologia de adaptação, reduzindo o número de heurísticas de 14 para 9 após a otimização dos especialistas.

4.2 METODOLOGIA PARA AVALIAR USABILIDADE DE SISTEMAS COLABORATIVOS REMOTOS DE REALIDADE AUMENTADA PARA MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS INDUSTRIAIS

As nove heurísticas resultantes das oito fases de adaptação podem ser ajustadas para avaliar especificamente a usabilidade de sistemas de RA usados na manutenção de máquinas na indústria de forma colaborativa e remota entre um operador local e um operador remoto. Esse ajuste teve como resultado nove requisitos mínimos de usabilidade que devem ser seguidos na avaliação e no projeto de tais sistemas. Os requisitos são:

- **R1** – O sistema deve usar dispositivo(s) de interação adequado(s) para o conforto dos operadores durante a manutenção da máquina;
- **R2** – O sistema deve evitar o uso de interações desnecessárias com o ambiente aumentado e adequar o conteúdo virtual ao contexto que os operadores estão inseridos, facilitando o auxílio do operador remoto e consequentemente contribuindo na redução da curva de aprendizado a partir de interações intuitivas;
- **R3** – Além de disponibilizar o uso de indicadores genéricos simples, como por exemplo uma seta, para interações no ambiente aumentado, o sistema deve proporcionar formas de interação de acordo com a preferência e habilidade dos operadores, como ferramentas de uso comum na indústria;
- **R4** – O sistema deve oferecer um feedback constante e adequado das interações e estar de acordo com as expectativas de percepção dos operadores, sempre reportando para o operador remoto o status atual do rastreamento do conteúdo aumentado, seja se houve atraso ou qualquer outra informação importante para a experiência durante a manutenção;

- **R5** – O sistema deve adequar a experiência sensorial do operador local ao escopo da percepção esperada pela aplicação, através de conteúdo virtual que permita distinção entre o real e o virtual quando posicionado em meio ao ambiente aumentado;
- **R6** – O sistema deve organizar o conteúdo virtual de forma que não torne a máquina nem seus arredores obscuros, evitando sobrecarga cognitiva ao facilitar a identificação das áreas que são importantes para a manutenção e precisam de atenção imediata;
- **R7** – O sistema deve apresentar o conteúdo aumentado com distinção de profundidade, distância e contraste suficientes para a percepção dos operadores;
- **R8** – O sistema deve oferecer opções de interação, que somadas ao ambiente aumentado, sejam adequadas para enriquecer a experiência dos operadores quanto ao escopo da comunicação colaborativa remota baseada em RA, como comunicação por voz, por texto ou outros métodos de colaboração.
- **R9** – O sistema deve promover a proteção do conteúdo de RA compartilhado e permitir que cada operador tenha gerência sobre suas próprias interações no ambiente aumentado.

O presente trabalho propõe esses nove requisitos mínimos de usabilidade que devem ser cumpridos para se ter uma usabilidade aceitável. Dessa forma, recomenda-se que os sistemas de RA usados na manutenção colaborativa remota de máquinas industriais chequem cada um dos requisitos usando o formulário que se encontra na Tabela 1.

Tabela 1 – Formulário de checagem de requisitos mínimos de usabilidade.

	Requisitos mínimos	Esse requisito está sendo cumprido? Como?	Esse requisito está sendo violado? Como?
1	O sistema deve usar dispositivo(s) de interação adequado(s) para o conforto dos operadores durante a manutenção da máquina		
2	O sistema deve evitar o uso de interações desnecessárias com o ambiente aumentado e adequar		

	o conteúdo virtual ao contexto que os operadores estão inseridos, facilitando o auxílio do operador remoto e consequentemente contribuindo na redução da curva de aprendizado a partir de interações intuitivas		
3	Além de disponibilizar o uso de indicadores genéricos simples, como por exemplo uma seta, para interações no ambiente aumentado, o sistema deve proporcionar formas de interação de acordo com a preferência e habilidade dos operadores, como ferramentas de uso comum na indústria		
4	O sistema deve oferecer um feedback constante e adequado das interações e estar de acordo com as expectativas de percepção dos operadores, sempre reportando para o operador remoto o status atual do rastreamento do conteúdo aumentado, seja se houve atraso ou qualquer outra informação importante para a experiência durante a manutenção		
5	O sistema deve adequar a experiência sensorial do operador local ao escopo da percepção esperada pela aplicação, através de conteúdo virtual que permita distinção entre o real e o virtual quando posicionado em meio ao ambiente aumentado		
6	O sistema deve organizar o conteúdo virtual de forma que não torne a máquina nem seus arredores obscuros, evitando		

	sobrecarga cognitiva ao facilitar a identificação das áreas que são importantes para a manutenção e precisam de atenção imediata		
7	O sistema deve apresentar o conteúdo aumentado com distinção de profundidade, distância e contraste suficientes para a percepção dos operadores		
8	O sistema deve oferecer opções de interação, que somadas ao ambiente aumentado, sejam adequadas para enriquecer a experiência dos operadores quanto ao escopo da comunicação colaborativa remota baseada em RA, como comunicação por voz, por texto ou outros métodos de colaboração		
9	O sistema deve promover a proteção do conteúdo de RA compartilhado e permitir que cada operador tenha gerência sobre suas próprias interações no ambiente aumentado		

Fonte: Autoria própria.

Ao avaliar e testar o sistema, sugere-se que o desenvolvedor vá preenchendo o formulário até que todos os requisitos mínimos sejam cumpridos.

5 AVALIAÇÃO ANALÍTICA DA METODOLOGIA NO CENÁRIO DA INDÚSTRIA

Com o objetivo de avaliar a metodologia e seus requisitos mínimos de usabilidade que foram propostos no capítulo anterior, será realizada uma avaliação analítica do trabalho proposto por MOURTZIS et al. (2020).

Primeiramente, é necessário avaliar a interação e conforto que o sistema fornece. Como foi visto, o engenheiro especialista não precisa usar um HMD para que consiga projetar o conteúdo de RA no campo de visão do técnico, mas sim apenas um PC. De fato, isso é benéfico em termos de conforto para o engenheiro, já que não precisa carregar nenhum peso acoplado à sua cabeça. Já para o técnico, o sistema foi projetado para ele usar um HMD Hololens da Microsoft para que possa ver os indicadores que o engenheiro está adicionando no auxílio da manutenção ou reparo da máquina que se encontra em sua frente. Apesar disso, o Hololens 2 otimizou o formato e conforto quanto ao peso em relação à versão anterior. De acordo com o criador do Hololens, KIPMAN (2019), a Microsoft redesenhou a forma como o HoloLens 2 se adapta à cabeça do usuário. O design industrial para o HoloLens 2 permitiu imitar a facilidade e universalidade de colocar um chapéu, inclusive com o centro de gravidade ajustado para que o peso não afetasse o conforto do usuário. Além disso, este HMD permite o uso de óculos de grau em conjunto como pode ser visto na Figura 7, melhorando ainda mais o conforto do técnico. Portanto, pode-se afirmar que o requisito R1 foi cumprido, já que o projeto do sistema levou em consideração o conforto dos usuários.

Figura 7 – Homem usando um Hololens 2 com óculos de grau em conjunto.



Fonte: (QZ.COM, 2019).

A respeito do requisito R2, o *design* intuitivo de interações do sistema é considerado adequado, evitando interações desnecessárias com o ambiente aumentado já que as interações a partir de indicadores virtuais são suficientes para o entendimento dos operadores local e remoto. Ademais, a disponibilidade de ferramentas contextualizadas para máquinas como pode ser visto na Figura 4 assim como a possibilidade de adição de novas ferramentas por parte do engenheiro, faz com que haja uma redução na curva de aprendizado dos operadores, facilitando o entendimento do técnico. Assim, pode-se dizer que o requisito R2 também é cumprido.

Quanto ao requisito R3, o engenheiro tem a opção de adicionar as ferramentas que lhe convier para facilitar o auxílio na manutenção ou reparo. Por outro lado, pode-se notar a falta de interações com objetos virtuais mais genéricos, como uma simples seta para indicar um determinado local na máquina ou uma ferramenta de desenho livre.

Sobre o requisito R4, o HoloLens 2 é um dispositivo que dá feedback constante para o usuário sobre o status do rastreamento do ambiente aumentado tão como da precisão das interações com o conteúdo de RA.

A respeito do requisito R5, as ferramentas disponíveis no sistema têm geometria e tamanho de acordo com as ferramentas reais, dificultando a percepção dos operadores quanto ao que é real ou virtual. Acredita-se que a aparência das ferramentas fossem menos realísticas, a percepção do usuário melhoraria e conseqüentemente sua experiência ao usar o sistema.

Quanto ao requisito R6, como pode ser visto nas figuras 3 e 5, ao fazer o reconhecimento do ambiente que se encontra no campo de visão do técnico, tornando o ambiente aumentado, o sistema faz com que a máquina fique coberta com uma camada azul um pouco transparente que possui diversas arestas. Isso facilita a identificação da máquina e o posicionamento das ferramentas sobre ela sem obscurecê-la.

Sobre o requisito R7, o uso do HMD Hololens 2 oferece a noção de distância e profundidade em que a máquina e as ferramentas virtuais estão. Isso facilita a compreensão de cada parte do ambiente aumentado, seja da máquina, seja do ambiente ao redor dela.

O sistema também cumpre o requisito R8, pois dá várias opções de interação entre os operadores local e remoto. Como pode ser visto na Figura 3, nas opções disponíveis na interface gráfica do usuário, eles podem interagir via voz, via texto e inclusive via transferência de arquivos PDF. Isso certamente facilita a comunicação entre os dois e consequentemente o auxílio do especialista. A comunicação de voz é crucial, incluindo a operação de apontamento, que complementa a comunicação verbal ou textual entre os colaboradores. O fato de o técnico não estar com as mãos ocupadas justamente pelo uso de um HMD, permite que ele faça apontamentos ou gestos com as mãos com auxílio vocal, como: “esse aqui”, “aquele”, “aqui”. O engenheiro também pode usar dessas falas ao posicionar as ferramentas.

E por fim, quanto ao requisito R9, como pode ser visto na Figura 5, tanto o engenheiro quanto o técnico têm suas próprias interfaces gráficas de usuário. Essa abordagem admite a gerência sobre suas próprias interações no ambiente aumentado e controle sobre a configuração de sua própria interface, como ativar ou desativar sua entrada e saída de áudio ou alterar o volume do áudio da comunicação. Isso atribui uma autonomia para cada um dos operadores e não permite que o técnico interfira na pose do conteúdo que o engenheiro posicionou.

6 SISTEMA ARMAIN

Neste capítulo, são apresentadas as tecnologias que foram estudadas e utilizadas no desenvolvimento do ARMain, um sistema colaborativo remoto de RA para manutenção de máquinas industriais.

6.1 FUNDAMENTAÇÃO TECNOLÓGICA

6.1.1 WEBXR

O WebXR¹ é uma API do *Immersive Web Community Group*, que tem colaboradores do Google, Microsoft, Mozilla e outros (Google Developers, 2021). Essa tecnologia fornece a funcionalidade necessária para trazer tanto a RA quanto a Realidade Virtual (RV) para a web. O “XR” do WebXR vem justamente da Realidade Cruzada, a qual representa a junção de AR e VR que do inglês são escritos *Augmented Reality* e *Virtual Reality*.

Com o módulo de RA do WebXR, é possível desenvolver aplicações de RA para o uso em navegadores web e dispositivos móveis que suportam RA, permitindo que o conteúdo virtual seja alinhado com o ambiente real antes de ser exibido aos usuários da aplicação.

De acordo com o MDN (2021), o WebXR não é uma tecnologia de renderização e nem fornece recursos para gerenciar dados 3D. Embora essa tecnologia gerencie o tempo, o agendamento e os vários pontos de vista relevantes ao desenhar a cena, ela não sabe como carregar, gerenciar, renderizar nem texturizar conteúdo de RA. Felizmente, o WebGL² e as várias estruturas e bibliotecas baseadas em WebGL estão disponíveis para tornar tudo isso possível.

6.1.2 THREE.JS

¹ Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebXR_Device_API>

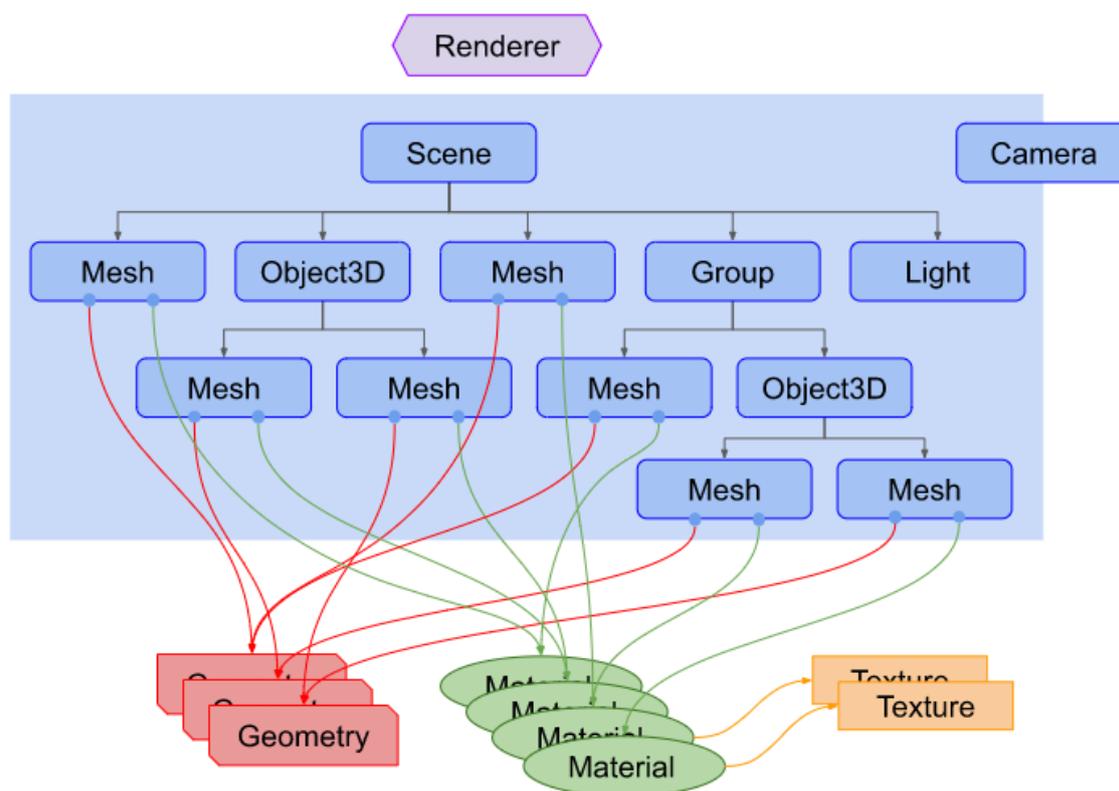
² Disponível em: <<https://www.khronos.org/webgl/>>

Uma das bibliotecas que têm como base o WebGL é a Three.js. Ela foi criada por Ricardo Cabello e lançada no Github em abril de 2010. De acordo com a própria documentação do Three.js³, o Three.js *Fundamentals* (2021), ela nada mais é que uma biblioteca Javascript e API que tenta facilitar ao máximo a obtenção de conteúdo 3D em uma página da web, criando computação gráfica 3D usando WebGL e exibindo-as.

A Three.js complementa muito bem o WebXR, pois ela lida com cenas, luzes, sombras, materiais, texturas, matemática 3D e todas as coisas que teriam que ser programadas se fosse usar WebGL diretamente.

Para entender melhor como funciona o desenvolvimento com a biblioteca, observar a Figura 8.

Figura 8. Representação de uma pequena aplicação com Three.js.



Fonte: (Three.js Fundamentals, 2021).

A Figura 8 representa um diagrama de uma estrutura de uma pequena aplicação feita com Three.js. Para desenvolver uma aplicação com essa ferramenta, é necessário criar um renderizador que é o principal objeto. Além dele, também é necessário criar uma câmera e uma cena que são passados para o renderizador para que ele renderize a parte

³ Disponível em: <<https://threejs.org/>>

da cena 3D que está dentro do tronco da câmera como uma imagem 2D para uma tela chamada canvas.

Dentro da cena, são instanciados alguns objetos de classes como:

- *Mesh*: classe que representa objetos baseados em malha poligonal triangular;
- *Object3D*: classe base para a maioria dos objetos 3D. Fornece um conjunto de propriedades e métodos para manipular objetos no espaço 3D;
- *Group*: são quase idênticos aos *Object3D*;
- *Light*: classe base abstrata para luzes. Em resumo, representa a luz dentro da cena;
- *Camera*: classe base abstrata para câmeras. Em resumo, é a câmera que captura todos os objetos que se encontram dentro da cena.

Como pode ser visto na Figura 8, esses objetos são filhos do objeto *Scene* que permite a configuração de o que e onde é renderizado pelo Three.js, como os objetos listados acima. Isto posto, pode-se observar que os últimos elementos são da classe *Mesh*. Cada objeto *Mesh* tem uma geometria como esfera, cubo, plano ou outra, e um material que representa sua cor, brilho e textura.

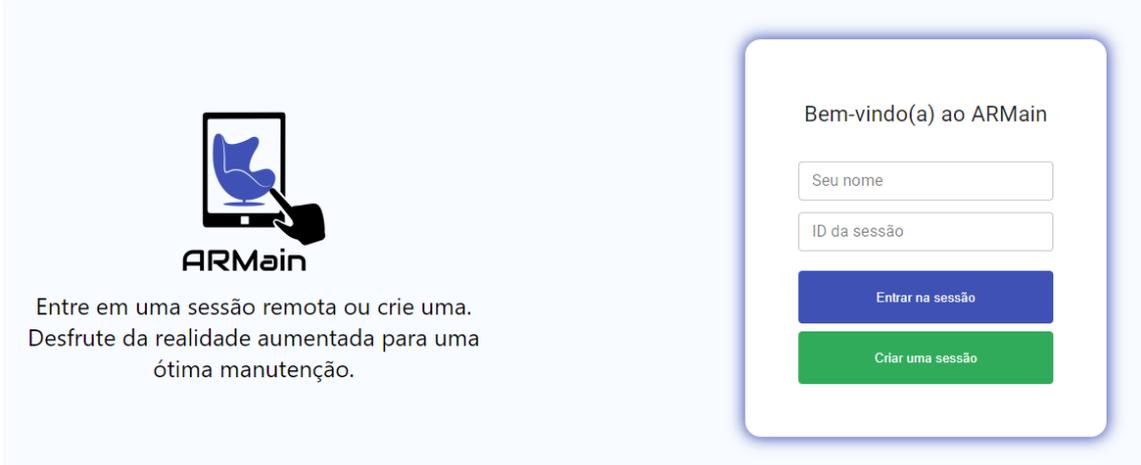
Todo esse contexto da biblioteca Three.js integrado ao WebXR permite uma imersão bastante interessante com RA, onde a cena renderizada é o ambiente real aumentado, a câmera é um recurso do dispositivo móvel do usuário e os objetos virtuais mencionados são posicionados pelo usuário no ambiente aumentado de interesse.

6.2 PROTÓTIPO DO ARMAIN

Com o *frontend* do protótipo do ARMain sendo implementado com a biblioteca Javascript de criação de interface de usuário, React.js⁴, ele conta com uma página para criar uma sessão de RA para fazer uma manutenção colaborativa remota em máquinas industriais e outra página para entrar em uma sessão já criada previamente. Nas Figuras 9 e 10, pode-se ver as interfaces das páginas.

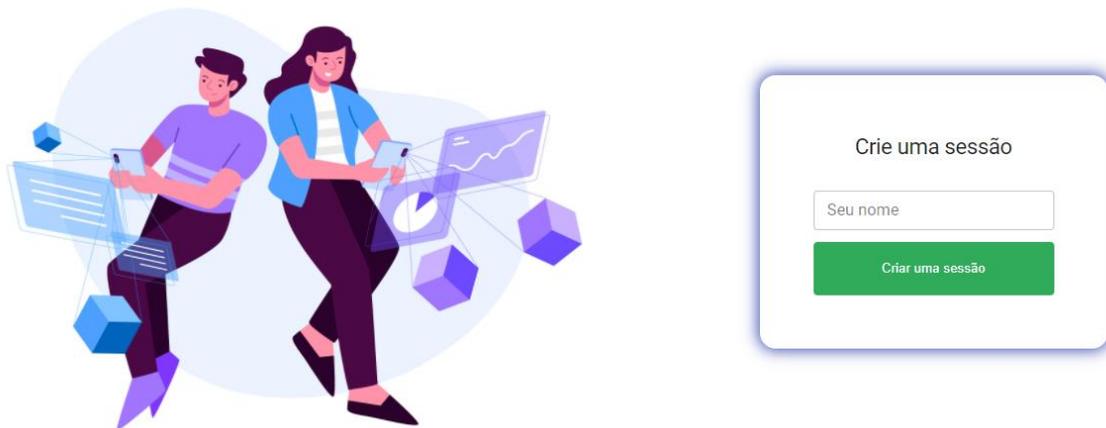
⁴ Disponível em: <<https://pt-br.reactjs.org/>>

Figura 9. Página para entrar em uma sessão de RA.



Fonte: Autoria própria.

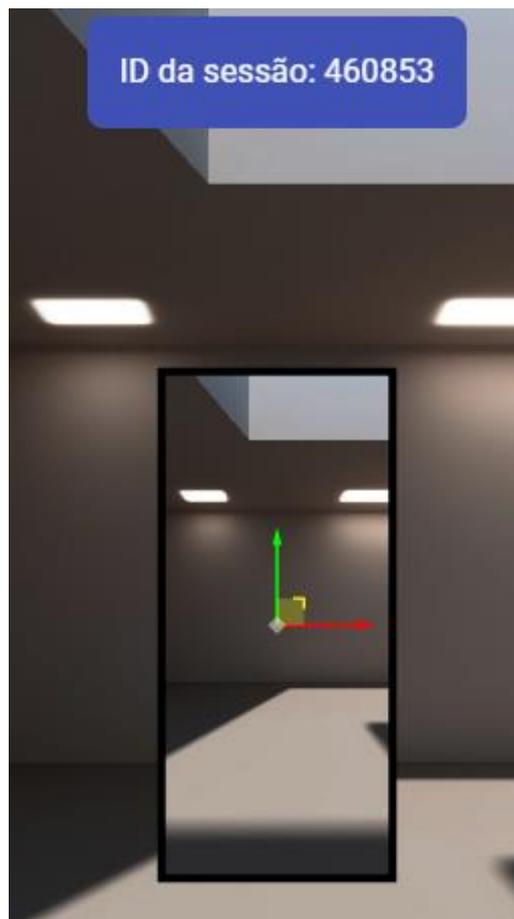
Figura 10. Página para criar uma sessão de RA.



Fonte: Autoria própria.

Para fazer testes no protótipo do ARMain, foi usado o emulador WebXR API no navegador *Chrome*. Com ele, foi possível simular uma cena de um ambiente aumentado e um dispositivo móvel usando as funcionalidades do WebXR e do Three.js em conjunto. A Figura 11 mostra como fica a simulação da cena quando um usuário está dentro de uma sessão durante uma manutenção remota.

Figura 11. Representação da sessão de RA.



Fonte: Autoria própria.

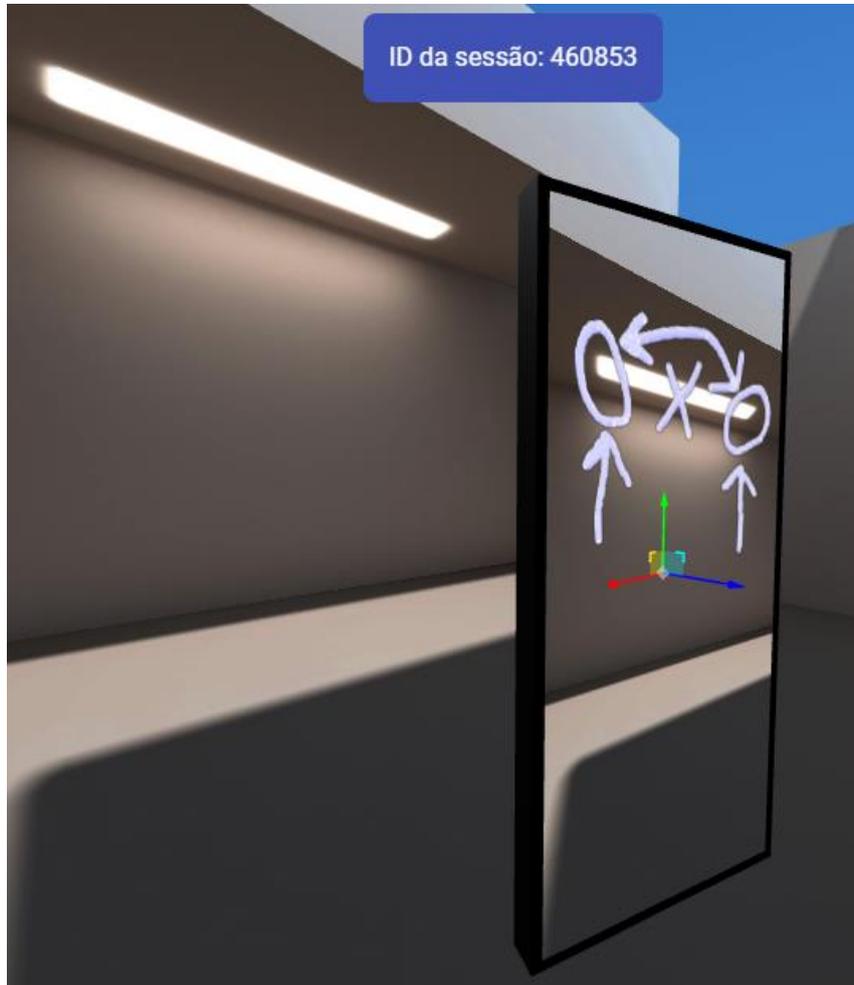
Ao entrar numa sessão ou criar uma, é gerado um ID de seis dígitos para identificar a sessão, o qual fica à mostra nas telas dos dispositivos móveis dos operadores local e remoto da manutenção. Assim que o operador remoto visualiza o ID em sua tela, ele está apto a compartilhar o número com o operador local para que ele também entre na mesma sessão.

Durante a sessão, o operador remoto deve orientar o operador local a posicionar a câmera do dispositivo móvel a aproximadamente 1m de distância da máquina para que ele consiga desenhar objetos virtuais de qualquer formato em cima da máquina ou ao redor da mesma, posicionando uma âncora que lembra um tubo flexível, o qual é implementado usando o Three.js.

A Figura 12 mostra um exemplo de uso do desenho livre com o ARMain. Como é apenas um simulador de um ambiente real aumentado, foi usado uma luminária virtual no lugar de uma máquina real somente para exemplificar. É visto que o operador remoto tem total liberdade para desenhar setas, círculos e outros objetos geométricos para indicar

o que ele deseja enquanto auxilia o operador local. Após posicionar a âncora, o operador local pode se movimentar livremente já que o desenho já foi posicionado e fica fixo onde foi posicionado.

Figura 12. Exemplo de interação com desenho livre.



Fonte: Autoria própria.

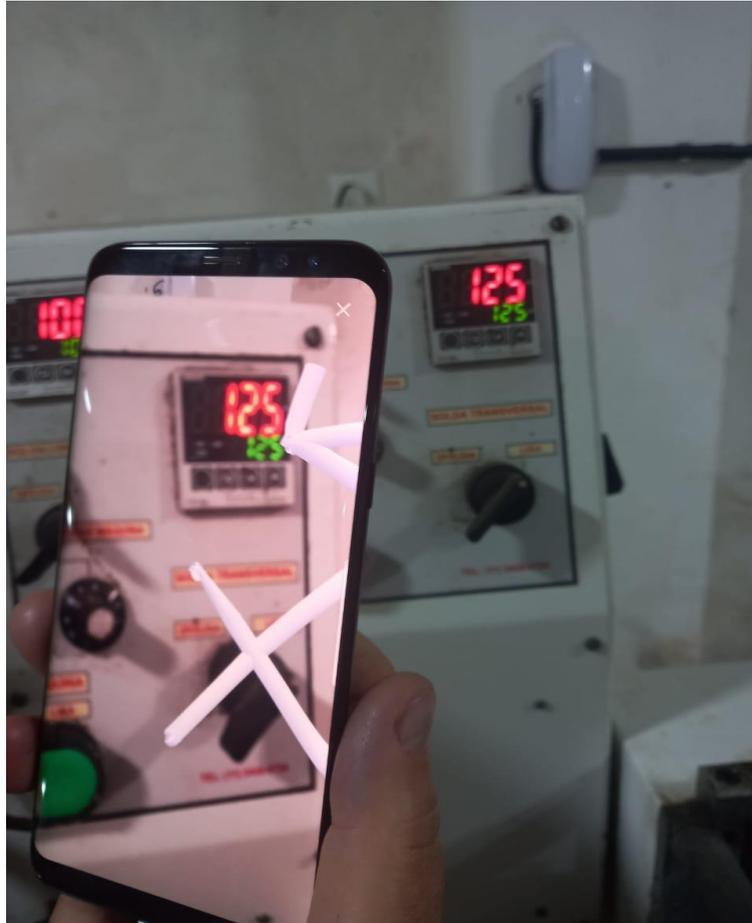
O ideal é que esse processo seja feito juntamente com comunicação por voz no próprio ARMain, porém essa funcionalidade não chegou a ser implementada. Sendo assim, foi considerada a necessidade de outra tecnologia para estabelecer uma comunicação por voz durante a manutenção com o sistema.

6.3 TESTE DO PROTÓTIPO NA INDÚSTRIA

Para fazer um teste real com o ARMain, foi necessário usá-lo em um cenário da indústria, simulando a manutenção de uma máquina. O teste foi feito na Karico, uma

fábrica de doce de banana localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. Lá, foi feita a manutenção de uma máquina utilizada para embalar pequenas unidades de doce. Na Figura 13, pode-se observar o usuário local apontando a câmera de um smartphone para o painel da máquina embaladora durante a manutenção remota com o ARMain.

Figura 13. Usuário local apontando a câmera do smartphone para a máquina embaladora.

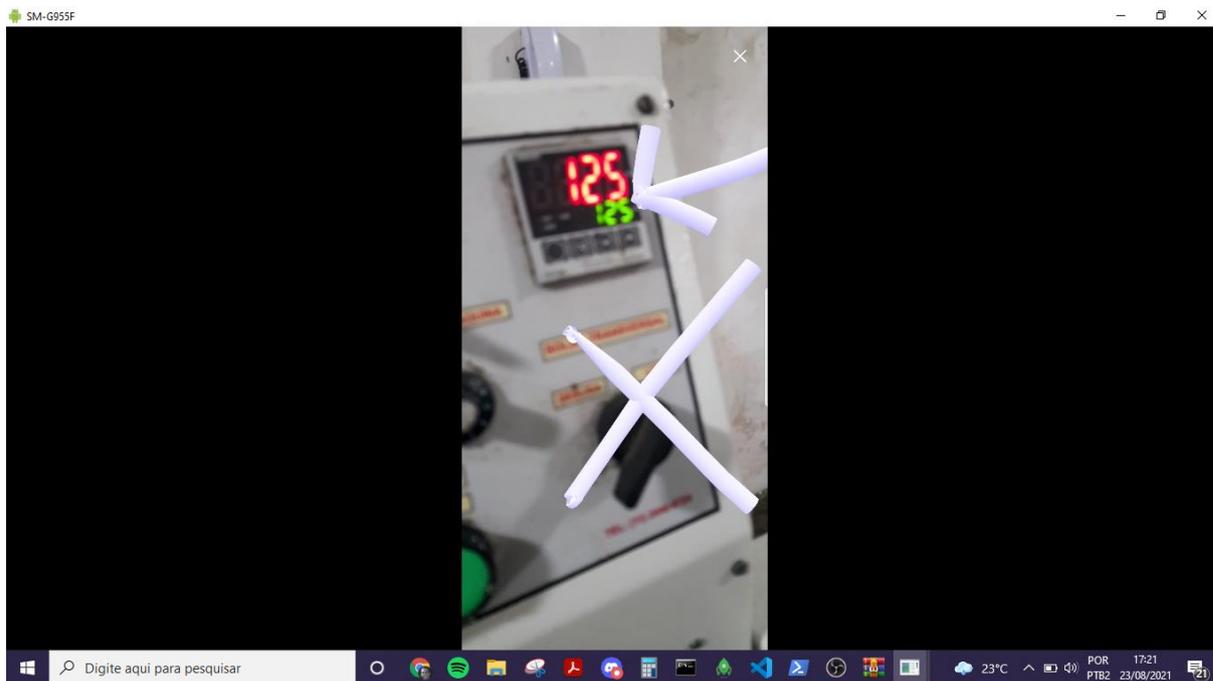


Fonte: Autoria própria.

Enquanto o usuário local aponta a câmera, o usuário remoto, especialista na manutenção da máquina, usa a âncora de desenho livre para indicar alguns pontos de interesse no painel da máquina, procurando traçar formatos que o usuário local entenda facilmente, como um “x” e uma seta.

Na Figura 14, pode-se ver o ponto de vista do usuário remoto em seu laptop, onde ele usa o cursor do mouse para desenhar os traços no painel da máquina e indicar o que deseja enquanto fala com o usuário local.

Figura 14. Tela do laptop do usuário remoto enquanto ele desenha alguns traços virtuais no painel da máquina.



Fonte: Autoria própria.

Como tudo foi feito em nível de protótipo, a comunicação entre o dispositivo móvel do operador local e o laptop do operador remoto foi simulada através de wi-fi usando o software *scrcpy*⁵. Esse software é usado para fazer espelhamento de tela ao permitir o controle de um dispositivo Android a partir de um computador desktop.

⁵ Disponível em: <<https://github.com/Genymobile/scrcpy>>

7 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA COM O ARMAIN

Neste capítulo, é feita uma avaliação da usabilidade do protótipo do ARMain com o uso da metodologia proposta no trabalho e em seguida é discutido sobre a efetividade da metodologia na avaliação tão como a compatibilidade do protótipo no meio industrial.

7.1 AVALIAÇÃO DA USABILIDADE DO ARMAIN

Para averiguar se o protótipo do ARMain é um sistema de RA com usabilidade adequada para manutenção colaborativa remota de máquinas industriais, pode-se usar a metodologia proposta neste trabalho. Sendo assim, faz-se necessário verificar se o protótipo do sistema cumpre os nove requisitos mínimos de usabilidade para concluir se ele é um ótimo candidato para ser empregado na indústria a partir de uma versão final. Em seguida, o sistema é avaliado passando por casa requisito:

- Foi percebido durante o teste que o protótipo cumpre o requisito R1, pois o sistema atribui conforto para os operadores local e remoto fazerem a manutenção da máquina por tempo suficiente sem incômodo. O laptop confere um conforto para um longo período de manutenção, além de fácil operação ao desenhar com a âncora usando um *mouse* e não necessita estar acoplado ao usuário para que seja utilizado. O smartphone é leve, fácil de manusear e operar, e é um dispositivo do dia a dia de qualquer profissional, também permitindo conforto por longos períodos.
- O sistema também cumpre o requisito R2, pois o protótipo evita o uso de interações desnecessárias com o ambiente aumentado permitindo apenas o desenho livre que é necessário para indicar o que se deseja, além de que o sistema permite que o operador remoto adeque o conteúdo virtual ao contexto em que ele e o operador local estão inseridos, desenhando formatos como uma seta simplesmente para indicar, um xis para indicar algo negativo ou um sinal de visto para indicar algo positivo em algum local da máquina. Dessa forma,

a curva de aprendizado do operador local durante a manutenção tende a diminuir, facilitando o entendimento sobre o que o operador remoto está tentando instruir.

- Foi percebido também que o sistema não cumpre o requisito R3. Faz-se necessário a disponibilidade de outras âncoras além de uma genérica e o protótipo não supre essa possível necessidade do operador remoto. No caso de reparo numa máquina, uma ou mais âncoras em formato de ferramentas comuns da indústria seriam adequadas, enquanto o desenho livre pode chegar a confundir o operador local, principalmente se o operador remoto tiver dificuldade em desenhar com o cursor do *mouse*. Isso, de fato, aumenta a curva de aprendizado durante a manutenção.
- O protótipo também não cumpre o requisito R4, pois ele não oferece um feedback constante sobre as interações e rastreamento do ambiente aumentado. A interface do usuário não possui nenhuma informação sobre o estado atual do sistema, como a indicação de algum atraso ou perda dos dados, ou se a âncora inserida no ambiente aumentado realmente se estabilizou e se fixou ou não onde foi posicionada pelo operador remoto.
- O requisito R5 é cumprido pelo protótipo, dado que a diferença entre o conteúdo virtual e o que é real é nitidamente perceptível. O formato da âncora de desenho livre tem uma geometria, cor e textura característicos de conteúdo virtual, se diferenciando muito bem do conteúdo aumentado.
- Como o ARMain é uma aplicação suportada em dispositivos móveis como smartphones com ótima capacidade, sabe-se que as câmeras atuais de tais dispositivos conseguem captar uma imagem que não torna a máquina nem seus arredores obscuros. Além disso, a interface limpa do ARMain juntamente com a âncora de desenho livre também facilitam a identificação das áreas importantes do objeto em manutenção. Sendo assim, o sistema também cumpre o requisito R6.
- Quanto ao requisito R7, o protótipo do ARMain apresenta o conteúdo aumentado com distinção de profundidade, distância e contraste suficientes para a percepção dos operadores. Portanto, o sistema também cumpre o sétimo requisito.

- Já o requisito R8, o protótipo não o cumpre já que não oferece outras opções de interação além das âncoras, como comunicação por texto e/ou voz. É essencial que o sistema disponibilize ferramentas para os operadores se comuniquem durante a manutenção. A aplicação não deve depender de outras aplicações para que consiga estabelecer uma comunicação entre os usuários, como foi no caso do teste realizado com o protótipo.
- Por fim, o protótipo também não cumpre o requisito R9, visto que a âncora de desenho livre é exatamente o mesmo para os dois. O sistema deveria ter uma âncora de desenho livre para cada operador, diferenciando ao menos a cor para que seja perceptível na tela de cada um, qual desenho é de quem.

7.2 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS

Como pode-se perceber, o protótipo do ARMain não cumpre todos os nove requisitos mínimos de usabilidade propostos pela metodologia. Isso significa que ele ainda não possui uma usabilidade adequada para ser empregado na indústria. Como o protótipo não cumpre os requisitos R3, R4, R8, e R9, ele não se adequa 44,44% das vezes à indústria. Esse valor é considerado alto e é um sinal de que o protótipo ainda precisa ser melhorado nos devidos requisitos para que sua versão final cumpra todos os requisitos e assim tenha uma usabilidade aceitável.

A metodologia de avaliação de usabilidade mostra-se bastante clara quanto ao mínimo necessário que um sistema deve cumprir e por isso requer que 100% deles sejam cumpridos. Dessa forma, ela é bastante fácil de usar e permite que os engenheiros prestem atenção aos pontos mais relevantes durante o projeto de um sistema de RA para manutenção colaborativa remota na indústria.

Por outro lado, como o ARMain ainda está em fase de protótipo, é entendível que não cumpra todos os requisitos mínimos. Dessa forma, a metodologia pode ser vista como uma ferramenta a ser usada durante todas as fases de desenvolvimento de um sistema, incluindo a fase de prototipagem, até ele se ajustar totalmente aos requisitos mínimos para uma usabilidade adequada.

O uso da metodologia para avaliar a usabilidade do protótipo do ARMain serviu principalmente para justificar a inadequação à indústria ao não cumprir certos requisitos mínimos de usabilidade. Ela mostra que não basta cumprir apenas um requisito ou outro,

mas sim todos. Não adianta ser ergonomicamente confortável para os operadores, se não oferecer uma curva de aprendizado confortável. Não adianta oferecer uma boa noção de profundidade e contraste entre os conteúdos virtuais e aumentados se não possibilita a comunicação por voz ou texto durante a manutenção através do próprio sistema. Pode-se dizer que os requisitos mínimos se complementam e devem ser todos levados em consideração.

Dito isto, a metodologia se mostra apropriada para avaliar a usabilidade de sistemas de RA voltados para manutenção colaborativa remota de máquinas industriais. Assim, a engenharia passa a não depender totalmente dos métodos tradicionais e pode voltar sua atenção para um método de avaliação inteiramente direcionado à RA.

8 CONCLUSÃO

Levando em consideração a insuficiência dos métodos tradicionais de avaliação de usabilidade para sistemas de RA na indústria, a metodologia de avaliação de usabilidade composta por nove requisitos mínimos proposta neste trabalho veio para contribuir preenchendo essa lacuna, com foco acentuado em sistemas direcionados à manutenção colaborativa remota de máquinas industriais.

A metodologia não vem para ser absoluta, pois ela permite que outras metodologias possam vir a somar ou aperfeiçoá-la no futuro. Mais estudos e pesquisas a respeito de novas técnicas de avaliação de sistemas de RA estão surgindo e a tendência é que os sistemas se tornem cada vez mais presentes na indústria de uma forma que os operadores se sintam cada vez mais à vontade, confortáveis, e tenham mais facilidade de operá-los em sua rotina profissional.

A consequência de ter sistemas de RA com uma ótima usabilidade na indústria é uma maior adesão por parte da própria indústria. O resultado disso é uma economia significativa de tempo e dinheiro já que a manutenção passa a ocorrer inteiramente de forma colaborativa remota.

REFERÊNCIAS

- FRANKLIN, F. F. (2014). *Heurísticas de Usabilidade para Sistemas Colaborativos Remotos de Realidade Aumentada*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Recife.
- MOURTZIS, D; SIATRAS, V; ANGELOPOULOS, J. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). **Applied Sciences**, Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, 26504 Patras, Grécia, 2020. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1855> >. Acesso em: 01 de maio de 2021.
- KIPMAN, A; GERSHGORN, D. The three things you notice when trying on Microsoft’s HoloLens 2. **Quartz**, Barcelona, 2019. Disponível em: < <https://qz.com/1559172/the-three-things-you-notice-when-trying-on-microsofts-hololens-2/>>. Acesso em: 03 de maio de 2021.
- KOSTARAS, N; XENOS, M. Assessing the Usability of Augmented Reality Systems. 13th Panhellenic Conference on Informatics, PCI2009, Proceedings, pp. 197–201, Corfu, Greece, 10-12 Setembro 2009.
- MICROSOFT. Microsoft, 2021. Página de compra do HoloLens 2. Disponível em: < microsoft.com/en-us/p/holoLens-2/91pnzzznzwcw/?activetab=pivot:overviewtab>. Acesso em: 05 de maio de 2021.
- SANTI, G, M; CERUTI, A; LIVERANI, A; OSTI, F. Augmented Reality in Industry 4.0 and Future Innovation Programs. **Technologies**, Departamento de Engenharia Industrial, Universidade de Bologna, 40136 Bologna, Itália, 2021.
- DE PACE, F; MANURI, F; SANNA, A (2018). Augmented Reality in Industry 4.0. *American Journal of Computer Science and Information Technology*, Vol.6 No.1:17.
- PERASSO, V. (2016). O que é 4º revolução industrial e como ela deve afetar nossas vidas. Disponível em: < <http://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309&hlpt-BR> > Acesso em: maio de 2018.
- KOLBERG, D. & ZÜHLKE, D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. 2015.
- MARSH, T. “Evaluation of Virtual Reality Systems for Usability”. Doctoral Consortium CHI, Oxford Univertisy Press, pp. 15-20. 1999.
- NIELSEN, J. Usability Engineering, Academic Press Limited. 1993
- RODDEN, T. A survey of CSCW systems. *Interacting with Computers*, 3(3), 1991 319-353.
- KIRNER, C., ZORZAL, E., Aplicações Educacionais em Ambientes Colaborativos com Realidade Aumentada. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Informática na Educação. 2005, v. 1, n. 1, p. 114.