

RENATO VINÍCIUS RAMOS GONÇALVES DE JESUS

Análise de desempenho de instruções de trabalho utilizando realidade aumentada

Guaratinguetá - SP
2024

Renato Vinícius Ramos Gonçalves de Jesus

Análise de desempenho de instruções de trabalho utilizando realidade aumentada

Monografia de Especialização apresentada ao Conselho de Curso de Especialização em Gestão da Produção da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do certificado de Especialização em Gestão da Produção.

Orientador (a): Dr. José Roberto Dale Luche

Guaratinguetá - SP
2024

J58a

Jesus, Renato Vinícius Ramos Gonçalves de
Análise de desempenho de instruções de trabalho
utilizando realidade aumentada / Renato Vinícius Ramos
Goncalves de Jesus - Guaratinguetá, 2024.

69 f : il.

Bibliografia: f. 63-69

Especialização em Gestão da Produção – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de
Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche

1. Planejamento da produção. 2. Realidade aumentada.
3. Controle de processo. 4. Produtividade do trabalho.
I. Título.

CDU 658.5

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/9203

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE INSTRUÇÕES DE TRABALHO UTILIZANDO
REALIDADE AUMENTADA**

RENATO VINÍCIUS RAMOS GONÇALVES DE JESUS

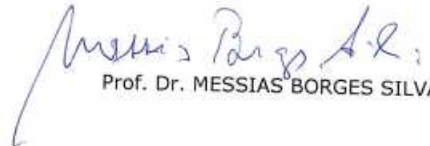
ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"ESPECIALISTA EM GESTÃO DA PRODUÇÃO"

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO DA PRODUÇÃO


Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon
Coordenador

Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO DALE LUCHE


Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA


Profa. Dra. CLAUDIA REGINA DE FREITAS

Dezembro/2024

DADOS CURRICULARES

RENATO VINÍCIUS RAMOS GONÇALVES DE JESUS

NASCIMENTO	02.08.1985 – São José dos Campos / SP
FILIAÇÃO	Renato Antônio Gonçalves de Jesus Cacilda Aparecida Ramos de Jesus
2005/2010	Engenharia Mecânica - bacharel UNESP/Guaratinguetá
2001/2003	Técnico em Eletrônica ETEP – Escola Técnica Profº Everardo Passos

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Roberto Dale Luche* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais Renato e Cacilda, a minha esposa Wanessa e aos meus filhos João e Lucas, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“All that is necessary to break the spell of inertia and frustration is this: Act as if it were impossible to fail.”

Dorothea Brande

RESUMO

Instruções de trabalho são elementos fundamentais para a organização da produção na indústria. Recentemente, algumas tecnologias foram desenvolvidas para melhorar as instruções de trabalho no ambiente de produção. Uma destas tecnologias é a Realidade Aumentada. Este trabalho tem o objetivo de demonstrar a importância das instruções de trabalho para o processo em termos de qualidade, eficiência e ciclo. Também busca avaliar as vantagens e desvantagens da realidade aumentada aplicada para criação das instruções de trabalho. Para o experimento, foi utilizado um conjunto de 9 blocos que deve ser montado em uma caixa, simulando uma montagem de baixo ciclo. Um total de 101 pessoas diferentes participaram de pelo menos uma das etapas do experimento. Na primeira etapa não houve nenhum tipo de auxílio. Na segunda etapa foi introduzido um desenho 2D como informação auxiliar. Na terceira etapa, a instrução de trabalho em realidade aumentada foi disponibilizada para auxiliar na montagem. A instrução em RA foi criada utilizando o software XRProj e visualizada no dispositivo Microsoft HoloLens 2. Os resultados confirmaram a importância das instruções de trabalho ao atingir uma taxa de sucesso na montagem de 100%, na terceira etapa, enquanto a primeira etapa obteve apenas 30% de sucesso. Quando avaliado o ciclo de montagem, a realidade aumentada apresentou uma melhora de 35% em relação ao método tradicional. Outros aspectos como não qualidade, eficiência, demanda de treinamento também contribuíram para concluir que a realidade aumentada tem melhor desempenho que o método tradicional.

PALAVRAS-CHAVE: Instruções de trabalho; Realidade Aumentada; HoloLens; Roteiro de Produção.

ABSTRACT

Work instructions are fundamental elements for organizing production at industry. Recently, some technologies have been developed to enhance work instructions on manufacturing environment. One of them is Augmented Reality. The article aims to demonstrate the importance of work instructions for processes regarding to quality, efficiency and assembly cycle. Additionally, it intends to evaluate pros and cons for augmented reality applied to create work instructions, comparing it with a traditional method, 2D drawing. For experimental stages, it was used a set of 9 bricks that should be assembled in a box to simulate a low-cycle assembly. In total, 101 different people participated in at least one of the stages. At the first stage, there was no aid to assemble. In the second stage a 2D drawing was introduced as auxiliar information. At third stage, the augmented reality work instruction was presented to support assembly. The AR instruction was created on XRProj software applied in a Microsoft Hololens 2 device. The results confirmed the importance of work instructions by achieving 100% of success on assembly attempts on stage 3 as stage 1 achieved 30% of success. When evaluated assembly cycle augmented reality presented an improvement of 35% compared to traditional method. Other aspects such as non-quality, efficiency, demand of training also contributed to conclude augmented reality performs better than traditional method.

KEYWORDS: Work Instruction; Augmented Reality; Hololens; Assembly. Process plan.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Artigos Publicados sobre aplicações Hololens - 2016 a 2021	17
Figura 2 – Quantidade de publicações por ano com os termos “Augmented Reality” e “Hololens”.	18
Figura 3 - Classificação da pesquisa	21
Figura 4 – Continuum de Millgram.....	30
Figura 5 – Sensorama: simulador de realidade virtual	31
Figura 6 - Exemplo de aplicação de realidade aumentada utilizando projetores.	34
Figura 7 - Aplicação de realidade aumentada utilizando dispositivo portátil.....	34
Figura 8 - Comparativo entre 'optical see-through' e 'video see-through'	35
Figura 9 - Evolução dos dispositivos HMD ao longo dos anos.....	36
Figura 10 - Problema utilizado no experimento	39
Figura 11 - Dimensões da caixa, bloco maior e bloco menor	39
Figura 12 - Conjunto da caixa mais blocos montados no software CATIA V5.....	40
Figura 13 - Modelagem dos blocos no software DELMIA CATIA V5, desenho planificado.	41
Figura 14 - Desenho em duas dimensões da caixa montada, gerado a partir do software DELMIA CATIA V5	42
Figura 15 - Tela inicial XRProj	43
Figura 16 - Modelos carregados e posicionados no software XRProj. Em destaque, os recursos Hotspot e Camadas.....	44
Figura 17 - Procedimento com tarefas criadas no XRProj	45
Figura 18 - Diversos tipos de animação no XRProj	45
Figura 19 - Montagem dos blocos Etapas 1 e 2.....	48
Figura 20 - Montagem dos blocos Etapa 3	49
Figura 21 - Participantes etapa 1 por faixa etária	51
Figura 22 - Resultados e tempo médio de montagem da etapa 1	52
Figura 23 - Participantes etapa 2 por faixa etária	53
Figura 24 - Resultados e tempo médio de montagem da etapa 2	54
Figura 25 – Participantes etapa 3 por faixa etária	56
Figura 26 - Resultados e tempo médio de montagem da etapa 3	57
Figura 27 - Tempos por Etapa	58
Figura 28 - Eficiência (Montou vs Não Montou).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Origem das publicações resultantes da pesquisa na base Web Of Science.....	19
Tabela 2 - Resultados Etapa 1 – Montou vs Não montou	50
Tabela 3 - Participantes Etapa 1 por gênero	50
Tabela 4 - Resultados Etapa 2 – Montou vs Não montou	52
Tabela 5 - Participantes Etapa 2 por gênero	53
Tabela 6 - Resultados Etapa 3 – Montou vs Não montou	55
Tabela 7 - Participantes Etapa 3 por gênero	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre dispositivos de Realidade Virtual	32
Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens ao utilizar Realidade Aumentada	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HMD	Head Mounted Display
AR	Augmented Reality
VR	Virtual Reality
XR	Extended Reality
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	15
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	16
1.2.1	Análise de trabalhos acadêmicos.....	16
1.2.2	Pesquisa na base de dados Web of Science.....	17
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivo Geral.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
1.5	MATERIAIS E MÉTODOS	21
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1	INSTRUÇÕES DE TRABALHO.....	24
2.2	DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NAS INDÚSTRIAS	25
2.2.1	Um breve histórico das revoluções industriais.....	25
2.2.2	Indústria 4.0	27
2.3	REALIDADE MISTA	29
2.4	REALIDADE VIRTUAL	30
2.5	REALIDADE AUMENTADA	32
2.5.1	Dispositivos de realidade aumentada.....	33
2.5.2	Aplicações de realidade aumentada	36
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	38
3.1	DESENVOLVIMENTO	38
3.1.1	Conjunto de blocos	38
3.1.2	Modelamento 3D.....	40

3.1.3	Instrução em realidade aumentada.....	42
4	PROPOSTA DE EXPERIMENTO	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1	ETAPA 1 – FAMILIARIZAÇÃO	50
5.2	ETAPA 2 – AUXÍLIO COM DESENHO EM DUAS DIMENSÕES	52
5.3	ETAPA 3 – AUXÍLIO COM REALIDADE AUMENTADA.....	54
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES.....	57
6	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Instruções de trabalho são elementos fundamentais para a organização da produção em uma indústria. Conforme PEINADO e GRAEML (2007), desde a adoção do padrão ISO-9000 nas indústrias brasileiras, durante a década de 90, as instruções de trabalho tornaram-se fundamentais para garantir que as empresas tenham seus processos documentados e melhorados.

As instruções de trabalho visam padronizar a maneira de executar um processo de forma que, ao final, seja obtido um produto com as especificações esperadas pelo setor de engenharia e design da fábrica. Além disso, a padronização do processo é importante para garantir que o produto utilize o mínimo de recursos (horas-homem, horas-máquina e matéria prima) e entregue o máximo de qualidade, dentro de um prazo pré-determinado. Segundo ZAMPIERI et al. (2024), a padronização do processo é uma ferramenta eficiente para melhorar os processos aumentando a eficiência na utilização dos recursos da empresa.

Conforme RODRIGUES et al. (2024), uma instrução de trabalho ou trabalho padronizado deve conter detalhes de todas as etapas que constituem o processo a ser executado, com o intuito de padronizar a sua realização para minimizar erros, desvios e variações, obtendo assim uma maior qualidade.

Alguns setores como o da indústria aeroespacial, apesar de fabricar produtos com alta tecnologia embarcada, ainda apresentam instruções de trabalho que utilizam poucos recursos tecnológicos, como assinatura para evidenciar o completamento da atividade, e baseadas em papel. Estas instruções, baseadas em papel, utilizam textos como fonte primária de comunicação do processo a ser executado, conforme FANG et al. (2023).

Um segmento específico que se destaca pelo nível de evolução nos últimos anos, são os dispositivos de realidade aumentada. Conforme RAJ et al. (2024), um rápido desenvolvimento nas últimas décadas tornou possível a tecnologia de realidade aumentada ser aplicada em diversos setores, incluindo o setor de manufatura. Uma das aplicações da tecnologia neste setor é a elaboração de instruções de trabalho.

A representação visual de um componente ou sistema complexo em elementos gráficos nas instruções de trabalho, melhora o processo de montagem em termos de eficiência, condições de trabalho e minimiza a possibilidade de erros durante a execução do processo. De acordo com o estudo feito por MOMPEU et al. (2024) a representação gráfica, trazida por instruções em realidade aumentada, é capaz de reduzir o esforço mental e aumentar a produtividade dos

operadores, pois reduz tarefas mentais como visualizar, procurar, lembrar e interpretar informações.

Sendo assim, este trabalho visa desenvolver uma instrução de trabalho em realidade aumentada para demonstrar sua eficácia e entender quais vantagens a tecnologia de realidade aumentada pode trazer.

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

1.2.1 Análise de trabalhos acadêmicos

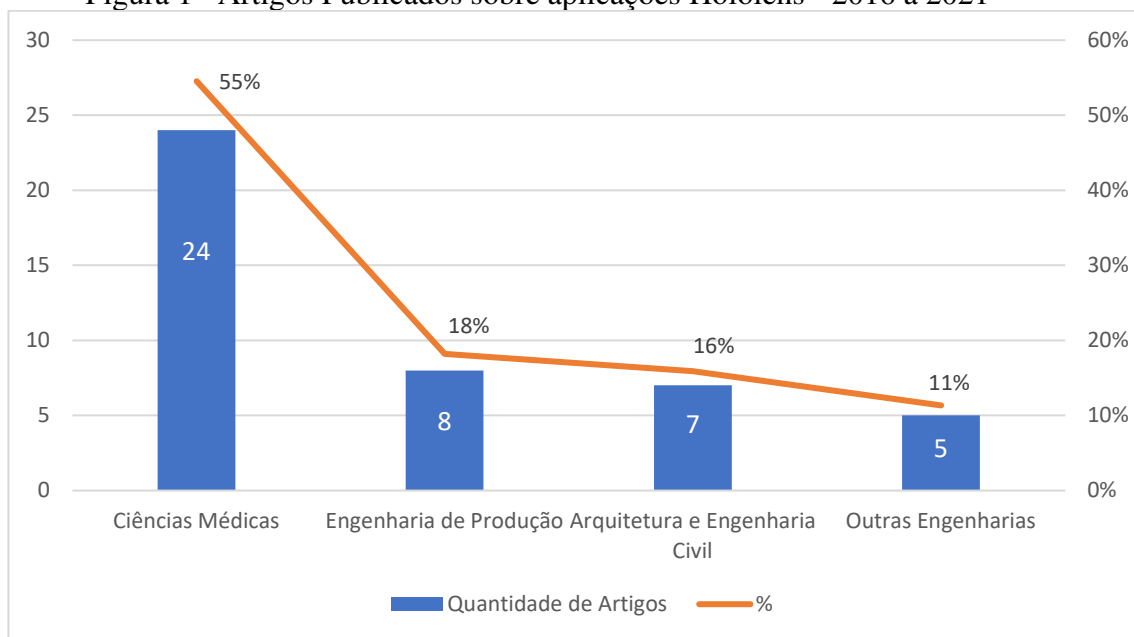
O trabalho desenvolvido possui relevância científica uma vez que o tema abordado, realidade aumentada, vem sendo alvo de constante e crescente interesse pela comunidade científica.

O trabalho de PARK et al. (2021) estudou as publicações recentes com o tema de realidade aumentada, especialmente no que se refere a aplicações com o uso do Microsoft Hololens. Ao pesquisar nas bases de artigos acadêmicos *Google Scholar*, *SCOPUS* e *Web of Science*, foram utilizadas as palavras-chave “*Hololens*”, “*virtual reality*”, “*augmented reality*”, “*mixed reality*” e “*visualization*”.

O resultado da pesquisa de PARK et al. (2021) apontou 83 artigos no total, publicados entre 2016 e 2021, período pré-estabelecido pelos autores como critério de pesquisa. Ao aplicar filtros que eliminavam artigos duplicados, escritos em linguagem de difícil compreensão, não publicados, entre outros critérios, os autores encontraram 44 artigos. Destes 44 artigos, apenas 8 foram desenvolvidos no contexto da Engenharia de Produção.

A maior parte dos artigos avaliados no trabalho de PARK et al. (2021) teve como tema a área de ciências médicas. Os autores, inclusive, indicam na seção de conclusões que trabalhos com tema de realidade aumentada, em especial o Hololens, na área de manufatura ainda são raros e que a tecnologia pode ser aplicada desde o desenvolvimento até a fabricação do produto, manutenção e treinamento. Portanto, esta área seria alvo de trabalhos futuros dado o estudo publicado pelo artigo de PARK et al. (2021).

Figura 1 - Artigos Publicados sobre aplicações Hololens - 2016 a 2021



Fonte: PARK et al. (2021)

Com relação ao tema proposto, estudo da aplicação de realidade aumentada para desenvolvimento de instruções de trabalho, ao pesquisar as bibliografias existentes nota-se uma lacuna entre as que de alguma maneira já abordaram este tema, com o que foi proposto neste trabalho.

Isto fica evidente ao comparar a tecnologia utilizada nos trabalhos de FIORENTINO et al. (2014) e HOU et al. (2013), analisados no trabalho de VORRABER et al. (2020), quando este último menciona que ambos os trabalhos encontraram resultados positivos com uso de tecnologia de realidade aumentada, em comparação aos métodos tradicionais como instruções em papel.

Porém, um ponto a ser observado é que os trabalhos de FIORENTINO et al. (2014) e HOU et al. (2013) foram desenvolvidos utilizando-se de tecnologias mais antigas para realidade aumentada, como projetores e monitores que faziam a função dos dispositivos mais modernos que possuímos a disposição atualmente, como o Microsoft Hololens.

O fato de serem mais antigos, não quer dizer que são ineficientes, mas que existe espaço para novos estudos que os comparem com as tecnologias mais recentes.

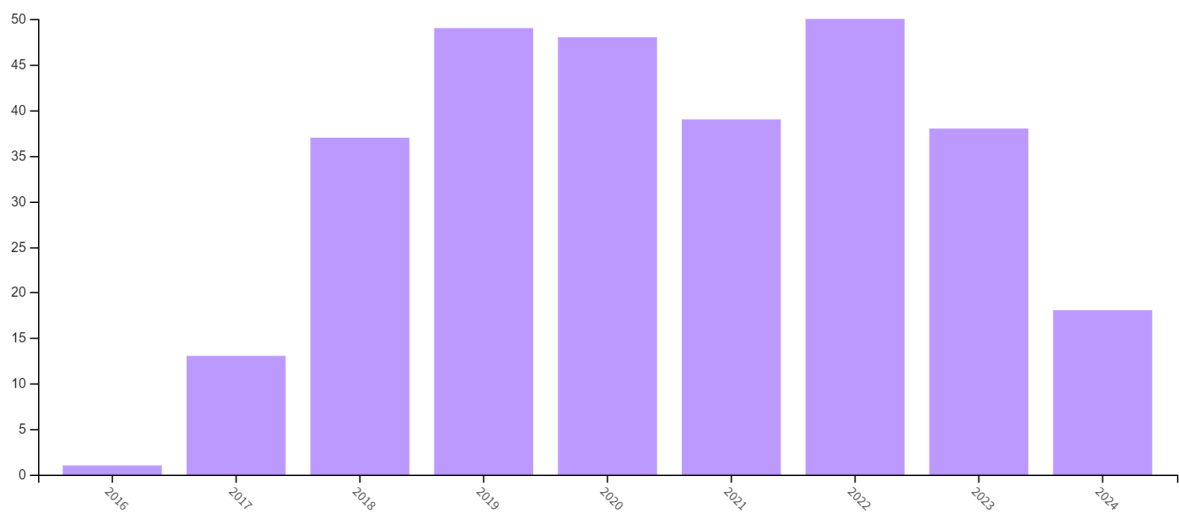
Sendo assim, resta investigar o quanto estes novos hardwares e softwares que temos para uso pode influenciar nos ganhos já observados por estes trabalhos.

1.2.2 Pesquisa na base de dados Web of Science

Adicionalmente, foi realizada uma pesquisa na base de dados do site *Web of Science*. No caso deste trabalho, foram pesquisados artigos acadêmicos que tiveram a publicação realizada nos últimos anos, desde o lançamento do Microsoft Hololens em 2016 (WHITE (2019)).

Os termos pesquisados foram os seguintes: “*Augmented Reality*” e “*Hololens*” no campo “Palavras-chave do autor”. O resultado apontou a existência de 293 publicações no total. A distribuição destas publicações ao longo dos anos está mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Quantidade de publicações por ano com os termos “*Augmented Reality*” e “*Hololens*”.



Fonte: Base de dados do site Web of Science (2023).

Avaliando os dados da Figura 2, nota-se que há um crescente interesse da comunidade científica em pesquisar com o tema de realidade aumentada e aplicações com Hololens. Em 2017 foram 13 trabalhos publicados, já em 2018 o número saltou para 37, representando um crescimento de 184%. De 2018 para 2019, os números continuaram crescendo, saltando de 37 para 49 publicações (aumento de 32%). Em 2020, os números se mantiveram, 48 publicações. Já em 2021, com todos os problemas causados pela pandemia de COVID-19, o crescimento foi freado, tendo sido publicados 39 trabalhos. Em 2022, foi atingido o pico, 50 trabalhos publicados, possivelmente devido ao acúmulo de trabalhos afetados pelas medidas da COVID-19. Em 2023, os números caíram um pouco em relação ao anterior, 38 trabalhos publicados.

Apesar desta recente diminuição no número de trabalhos publicados, nota-se que o assunto ainda é tema de interesse dos pesquisadores, pois se mantém no mesmo patamar do ano da arrancada, 2018 (37 trabalhos publicados). Além disso, novos lançamentos de dispositivos estão programados para os próximos anos, o que ajudará o tema a se manter relevante para pesquisas no futuro próximo.

Além da falta de trabalhos acadêmicos que tragam pesquisa com realidade aumentada para a área de Engenharia de Produção, assunto discutido no trabalho de PARK et al. (2021), destaca-se a necessidade de desenvolvimento tecnológico para o país. Pois o uso de tecnologias de realidade aumentada e virtual trazem um significativo aumento de qualidade, produtividade e competitividade para as indústrias que as utilizam, fato este confirmado por BLAGA e TAMAS (2018).

Portanto, após pesquisar a quantidade e a distribuição dos trabalhos ao longo dos anos, um outro dado analisado foi o país de origem da publicação com a intenção de saber quantos dos 293 trabalhos encontrados foram pesquisas realizadas no Brasil. A Tabela 1 mostra a quantidade de trabalhos publicados por país de origem.

Tabela 1 – Origem das publicações resultantes da pesquisa na base *Web Of Science*.

Ranking	País	Quantidade de Publicações	% de 215
1º	Estados Unidos da América	89	30,4%
2º	Alemanha	47	16,0%
3º	Itália	29	9,8%
4º	Inglaterra	22	7,5%
5º	Canadá	18	6,1%
6º	China	17	5,8%
7º	Suíça	13	4,6%
	Espanha	13	4,6%
	Austrália	9	3,1%
9º	Japão	9	3,1%
	Coreia do Sul	9	3,1%
19º	Brasil	3	1,0%

Fonte: Base de dados do site Web of Science (2024).

A partir da análise dos dados do quadro 1, podemos observar que há um espaço grande para pesquisas relacionadas ao tema de realidade aumentada com aplicações no Hololens, especialmente no Brasil. O assunto é tema recorrente de pesquisas em países desenvolvidos que estão na vanguarda do desenvolvimento das tecnologias relacionadas a indústria 4.0. Portanto, faz-se necessário mais estudos nesta área no Brasil.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em duas partes: Objetivo Geral e Específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma instrução de trabalho de montagem mecânica, utilizando a tecnologia de realidade aumentada.

1.3.2 Objetivos Específicos

Demonstrar a eficácia das instruções de trabalho como meio auxiliar de produção que garante uma montagem com maior qualidade, eficiência e menor ciclo.

Verificar as vantagens ou desvantagens em utilizar a tecnologia de realidade aumentada para escrever instruções de trabalho.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A proposta deste trabalho foi experimentar a tecnologia de realidade aumentada em um processo de montagem de peças. As atividades estudadas nesta pesquisa são comuns no setor industrial geral, pois envolve a montagem de um conjunto de blocos que simula a montagem de um produto de baixa complexidade e baixo ciclo, até 5 minutos.

A atividade de montagem dos blocos não requer operadores familiarizados e qualificados no processo. As atividades de baixo ciclo e baixa complexidade são muito comuns nos mais diversos setores industriais. A intenção de utilizar a montagem dos blocos é simular uma situação comum, que ocorre todos os dias em nossas empresas.

Esta pesquisa teve a intenção de observar o desempenho da aplicação de realidade aumentada para a construção de instruções de trabalho. Portanto, para analisar se o desempenho é satisfatório, ou não, foi necessário compará-lo com um método já conhecido, no caso desta pesquisa, instruções de trabalho baseados em desenho 2D.

Neste trabalho, foi proposto um experimento que simula uma montagem de baixo ciclo e baixa complexidade. Como consequência, podemos dizer que esta escolha limitou os resultados da pesquisa. Especialmente, com relação aquelas atividades que possuem alto ciclo e complexidade.

A instrução de trabalho em realidade aumentada desenvolvida para a atividade de montagem de blocos foi experimentada em uma sala, com apoio de uma mesa ou bancada, com luminosidade adequada para a realização do trabalho e baixo nível de ruído.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

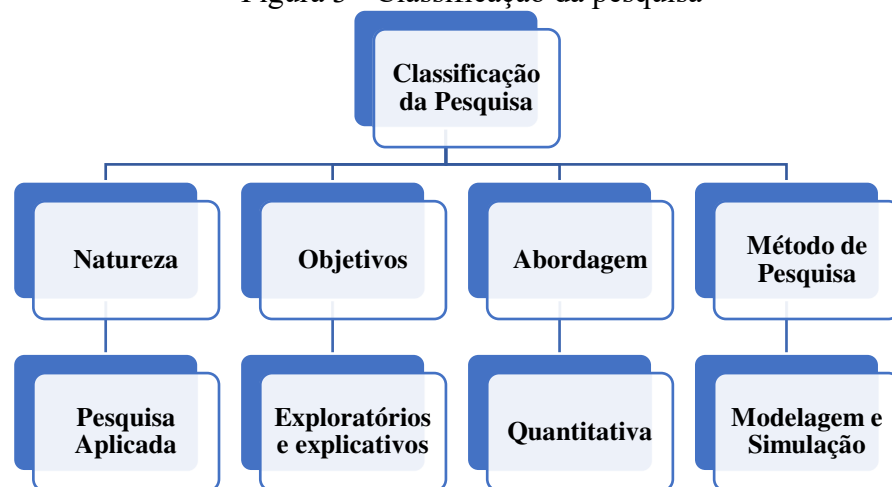
Quanto a natureza, este trabalho deve ser definido como pesquisa aplicada, pois busca oferecer soluções para um problema específico, conforme o conceito de CERVO et al. (2006). Já em relação a abordagem, trata-se de uma abordagem quantitativa, uma vez que serão estabelecidas variáveis, para então medir, coletando dados por meio do experimento proposto, permitindo assim analisar os resultados e chegar a uma conclusão final, conforme conceito de MIGUEL et al. (2012).

Este trabalho, conforme conceito de GIL (2002), pode ter seu objetivo classificado como exploratórios e explicativos. É exploratório, pois através dele foi possível familiarizar-se mais com o tema, levantar hipóteses que pudessem ser testadas em estudos posteriores. Também é explicativo, porque visa basicamente testar as hipóteses levantadas na fase exploratória, resultando em uma melhor compreensão dos fenômenos que podem influenciar nos resultados das variáveis.

Em relação ao meio, a pesquisa será conduzida em um ambiente controlado, utilizando um experimento preparado para testar as hipóteses e variáveis definidas para o tema.

Quanto ao método de pesquisa, este trabalho utilizará modelagem e simulação. Através deste método, será construído um modelo de pesquisa, uma abstração da realidade, que ajudará na descrição e simulação de um ambiente produtivo, conforme conceito de MIGUEL et al. (2012).

Figura 3 - Classificação da pesquisa



Fonte: Adaptado de PRODANOV e FREITAS (2013).

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, o seguinte método foi proposto:

Desenvolver uma instrução de trabalho em realidade aumentada para avaliar as dificuldades encontradas no processo de criação deste tipo de procedimento.

Testar os procedimentos escritos, em realidade aumentada e desenho 2D, com operadores habituais e não-habituais com montagens mecânicas para determinar se há ganhos em termos de produtividade, qualidade da informação, a partir da experiência dos usuários.

Comparar os resultados obtidos com os procedimentos escritos em realidade aumentada, em relação aos procedimentos escritos no meio tradicional (desenho 2D). Também, comparar o cenário onde não há instrução de trabalho em relação ao cenário em que há uma instrução de trabalho.

Esta pesquisa foi desenvolvida utilizando um conjunto de blocos montáveis de nove peças, cujo nome comercial é ‘Encaixe se for capaz’, fornecido pela empresa Elo7.

Para a construção do desenho em duas dimensões, foi utilizado o software CATIA V5.

Para a construção da instrução em realidade aumentada foi utilizado o software XR Proj.

Para a reprodução da instrução em realidade aumentada foi utilizado o HoloLens 2, óculos de realidade aumentada, fabricado pela Microsoft.

A pesquisa foi realizada com base em experimentos conduzidos em diferentes ambientes, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, em um ambiente empresarial e em ambientes variados com voluntários dispostos a realizar o experimento.

O experimento foi realizado em três etapas distintas. Na primeira etapa, os participantes receberam o conjunto de blocos para montagem, mas sem nenhum tipo de auxílio. Na segunda etapa, foi introduzido um suporte tradicional: um desenho em duas dimensões para orientar a montagem. Por fim, na terceira etapa, os participantes utilizaram uma instrução em realidade aumentada como ferramenta de apoio para realizar a tarefa.

A maior parte dos voluntários que realizaram o experimento passaram pela etapa 1. Foram 101 participantes no total. Na etapa 1 foram 84 participantes. A etapa 2 foi realizada por 69 participantes. Já a etapa 3 foi realizada por 61 pessoas. Estas quantidades foram muito influenciadas pela disponibilidade de tempo dos voluntários para a realização do experimento, a necessidade de conhecimento técnico para realizar a etapa 2 e a disponibilidade de conexão para realizar a etapa 3, com o dispositivo de realidade aumentada.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em 6 capítulos. No primeiro capítulo, há uma introdução do tema a ser abordado na pesquisa e uma justificativa do porquê este tema precisa ser estudado, fundamentado por pesquisa bibliográfica de autores que já se debruçaram sobre o tema, seguido de uma análise na base *Web of Science*, avaliando a quantidade de artigos publicados por ano, bem como a localidade em que cada um foi publicado.

Na segunda parte, temos uma análise de artigos já publicados para formar o referencial teórico que sustenta este trabalho.

Na terceira parte, há uma descrição do problema a ser estudado onde foram apresentados detalhes do desenvolvimento do experimento desta pesquisa.

A proposta do experimento foi discutida, em detalhes, na quarta seção. Já na quinta parte são apresentados os resultados e discutido de forma sucinta algumas características observadas durante o experimento.

Na sexta e última parte são apresentadas algumas conclusões a respeito do trabalho, confrontando os resultados com os objetivos propostos na seção inicial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão expostos uma fundamentação teórica dos principais assuntos abordados no trabalho. As referências são artigos pesquisados nas principais bases de dados, como *Web of Science* e *Scopus*.

2.1 INSTRUÇÕES DE TRABALHO

Segundo GUO et al. (2024), as instruções de trabalho são elementos essenciais para a organização do processo de manufatura de uma indústria, através da qualidade das informações contidas nela é possível obter os principais objetivos de um sistema de manufatura: maximizar a produtividade, eficiência e reduzir custos, minimizando os erros.

De acordo com BESHARAT-FOUMANI (2019), as instruções de trabalho são um meio necessário entre as etapas de projeto e produção. Nelas estão especificadas a sequência ótima de execução do processo, as máquinas, ferramentas e recursos necessários para transformar um conjunto de matéria-prima em um produto específico da maneira mais eficiente e econômica possível.

Conforme AMEER e DAHANE (2022), elas são criadas através da experiência de engenheiros que interpretam as informações obtidas no projeto do produto e, com o conhecimento dos processos de manufatura existentes e disponíveis na empresa, definem uma sequência lógica de fabricação e montagem que visam atingir os dois principais objetivos do sistema de manufatura: produtividade e qualidade.

Para SERVAN et al. (2012), que analisou as instruções de trabalho no setor aeroespacial, tema semelhante ao deste trabalho, as instruções de trabalho passam por três fases ao longo do seu ciclo de vida: criação, uso e manutenção. Na fase de criação, o engenheiro necessita de três conjuntos de informações para que se possa criar uma instrução de trabalho: 1. relacionadas ao produto (modelos 3D, desenhos 2D, relatórios técnicos etc.), 2. relacionadas aos recursos (ferramentas manuais, ferramental, equipamentos, entre outros) e 3. relacionadas ao processo (normas, documentos de processo padronizado, layout etc.).

Durante o uso da instrução de trabalho, o mecânico interpreta as informações descritas na instrução e relaciona com as informações referentes ao produto, processo e recursos, mencionados na fase de criação da instrução de trabalho.

Quanto a fase de manutenção da instrução de trabalho, SERVAN et al. (2012) menciona que a causa da manutenção pode ter diferentes origens, como uma nova configuração de

produto, correção de erros, novos requisitos de cliente ou autoridades, entre outras razões. A revisão das instruções de trabalho requer um alto custo, pois envolve uma quantidade grande de documentos a serem analisados e modificados.

NEUMANN e MAJOROS (1998) afirmam que as instruções de trabalho são fisicamente separadas do ambiente onde a atividade acontece. Esta separação faz com que o trabalho aconteça em dois ambientes distintos, o da informação e o físico.

Segundo Braly et al. (2019), o ambiente da informação, predominantemente cognitivo, exige que o operador pesquise, leia, interprete e visualize mentalmente a sequência de operações necessárias para a execução da tarefa. Já o ambiente físico, caracterizado por atividades cinestésicas, requer que o operador recorde as informações processadas para realizar ações práticas, como alinhar, ajustar, medir, fixar ou inspecionar o material em transformação. A separação entre esses dois ambientes, chamada de "distância cognitiva", impõe um desafio adicional ao operador, que precisa integrar as informações obtidas no ambiente informacional com as demandas do ambiente físico para executar o processo de forma eficaz.

ARRINGTON e LOGAN (2004) mencionam que para integrar estas informações, o mecânico que executa o processo necessita alternar o foco de sua atenção entre os dois ambientes. Esta mudança de foco provoca um movimento da cabeça para visualizar os diferentes ambientes.

Pesquisas recentes reforçam que o uso de elementos visuais pode reduzir a carga cognitiva em tarefas que exigem processamento mental complexo. SWELLER e CHANDLER (2023) destacam que modelos mentais baseados em imagens demandam menor esforço cognitivo em comparação com aqueles baseados exclusivamente em texto. Além disso, intervenções ergonômicas, como as discutidas por LEKA et al. (2019), demonstram que o uso de representações visuais pode aumentar a eficiência e o bem-estar dos operadores ao facilitar a integração de informações e ações no ambiente de trabalho. Esses achados enfatizam a relevância de incluir representações visuais em projetos que exigem alto processamento cognitivo.

2.2 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO NAS INDÚSTRIAS

2.2.1 Um breve histórico das revoluções industriais

Segundo OLIVEIRA (2017), desde o século XVIII, quando as primeiras indústrias começaram a surgir, com o advento da primeira revolução industrial, busca-se aprimorar a

tecnologia para cada vez mais substituir o trabalho manual pelo trabalho de máquinas, aumentando a produtividade e, conseqüentemente, os lucros.

De acordo com ROCHA et al. (2020), esta revolução começou na indústria têxtil, que para suprir uma crescente demanda, incorporou em sua produção a invenção (“lançadeira volante”) de John Kay que dobrava a produtividade.

Ainda de acordo com HOBBSAWM (2015), o início da era da Revolução industrial teve início com invenções relativamente simples, como a máquina de fiar, o tear, a fiadeira automática. Posteriormente, houve a invenção da máquina a vapor por meio de James Watt, em 1784.

A grande motivação das revoluções industriais é a busca incessante pelo aumento de produtividade, ou lucro. Conforme SANTOS E ARAUJO (2021), os proprietários capitalistas da primeira revolução industrial, procuraram criar condições para produzir com menor custo e maior qualidade, o que permitiu enfrentar a concorrência no mercado em vantagem. A possibilidade de aumentar os lucros impulsionou (e ainda impulsiona) a mente humana a exercitar a criatividade, que fica marcada pelas invenções de técnicas e maquinários que resolvem os problemas enfrentados na busca pelo aumento de produtividade.

De acordo com ROCHA et al. (2020), no final do século XIX, com o avanço de tecnologias que permitiu o domínio sobre a energia elétrica, a química e o petróleo, houve um grande desenvolvimento metalúrgico, invenção de novos meios de transporte e desenvolvimento das comunicações. Estes desenvolvimentos fizeram surgir uma nova onda que revolucionou as indústrias e ficou conhecida como a segunda revolução industrial. Todo esse rol de novas tecnologias, combinado com uma revolução na divisão do trabalho dentro das fábricas e uma produção voltada mais a serialização de produtos, fizeram os custos diminuírem cada vez mais e os lucros aumentarem.

No século XX, observou-se um novo fenômeno que provocou um súbito aumento da produtividade industrial pelo desenvolvimento de novas tecnologias. Este fenômeno ficou conhecido entre alguns autores como terceira revolução industrial. Se na segunda revolução industrial, de acordo com SILVA E GASPARIN (2006), o domínio da geração e distribuição de energia elétrica foi fator preponderante para o desenvolvimento da indústria. Na terceira revolução industrial, o desenvolvimento da microeletrônica foi um dos fatores que possibilitou um novo surto de aumento da produtividade industrial.

Conforme CARDOSO (2016), a terceira revolução industrial também ficou conhecida como revolução técnico-científica, pois fator preponderante da terceira revolução industrial foi a intensificação do uso da microeletrônica e automação de processos. Através delas permitiu-

se alavancar o nível de produção, baratear os custos com a diminuição da mão-de-obra humana e melhora no gerenciamento dos sistemas de produção, especialmente com a introdução dos conceitos da manufatura enxuta.

Assim como ocorreu na segunda revolução industrial, na terceira revolução industrial também houve quebra de paradigmas na organização da produção que levaram a um salto na redução de custos e aumento de produtividade. FARAH JÚNIOR (2000) cita a intensificação da terceirização do processo produtivo, maior cooperação dentro da própria empresa, ou até mesmo entre empresas diferentes, surgimento de empresas concentradas, multi industriais, com um grande agente financeiro auxiliando na operação industrial (exemplo: GE).

Ao longo da Terceira Revolução Industrial, observou-se um grande avanço na maneira como a informação era trocada. Através dos microchips, enormes painéis elétricos e válvulas eletromecânicas foram substituídas por peças com capacidade de processamento centenas de vezes superior e, cujo tamanho ocupava uma pequena fração daquelas peças de tecnologia mais antiga. O estudo de HU E QUAN (2005) avaliou os investimentos em tecnologia da informação de indústrias, dos mais variados setores, de 1970 a 1999 e confirmou uma correlação entre estes investimentos e aumento de produtividade.

SIGOV et al. (2022) ainda afirma que uma das características da Terceira Revolução Industrial é o desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação, automação, robótica entre outros.

2.2.2 Indústria 4.0

É possível notar nesta breve explanação sobre a primeira, segunda e terceira revolução industrial, que o fator desenvolvimento tecnológico e inovação sempre teve um papel central para que houvesse uma nova quebra de paradigma e, conseqüentemente, uma nova revolução, especialmente quando estas inovações conseguem ganhar dimensão no processo produtivo, conforme CARDOSO (2019).

De acordo com ILCHENKO et al. (2019), apesar dos diversos avanços tecnológicos, o mundo ainda vive a Terceira Revolução Industrial, que se iniciou no meio do século XX e vem se estendendo até nos dias de hoje.

O termo indústria 4.0, de acordo com CARDOSO (2016), tem origem em 2011 por meio de um plano estratégico do governo alemão de alavancar a produtividade de suas indústrias através do uso das mais avançadas tecnologias disponíveis. Em 2013, um relatório deste plano

é divulgado na feira de Hannover quando então o termo se torna público e chama a atenção de todo o mundo.

BERTOLINI et al. (2019) também comenta que o processo de digitalização através da eletrônica e o desenvolvimento do setor de tecnologia da informação, ocorrida na terceira revolução industrial, continua em andamento e agora, na quarta revolução industrial, evoluiu e transforma-se no desenvolvimento e implantação de sistemas cyber físicos, internet das coisas e internet de serviços.

Assim como todos os setores da sociedade, as indústrias também estão evoluindo conforme novas descobertas tecnológicas são reveladas. De acordo com SOUZA JUNIOR E RIBEIRO (2023) as tecnologias trazidas pela indústria 4.0 tem tornado os processos mais eficientes, aumentando produtividade, criando produtos e serviços inovadores, dando oportunidade a novos negócios e gerando vantagens competitivas que são imprescindíveis para a perpetuidade das empresas.

Ainda de acordo com ESWARAN et al. (2023), de 30 a 40% do ciclo de produção, e, de 20 a 40% dos custos de produção estão relacionados com decisões tomadas nas fases de desenvolvimento do produto. A adoção de tecnologias pode remover obstáculos ao permitir a troca de informações em tempo real, requisito este que acelera a coordenação entre as diversas etapas do ciclo de desenvolvimento do produto, como projeto, setup de máquinas, planejamento, usinagem, montagem entre outros. A tecnologia está se expandindo em direção a um sistema de manufatura global.

Conforme SIGOV et al. (2022), o conceito original de Indústria 4.0 inclui um conjunto de tecnologias ‘capacitadoras’ que prometem aumentar a produtividade das empresas. São elas: Sistemas cyber-físicos, Internet das Coisas (IoT), Computação em nuvem, dentre outras que promovem a automação na indústria. O autor também comenta que as empresas estão sob constante pressão para a adoção destas tecnologias para que se mantenham competitivas no mercado global.

SIGOV et al. (2022) ainda comenta que, desde que o conceito de Indústria 4.0 foi divulgado, muitas outras tecnologias desenvolveram-se, a ponto de que hoje fala-se em uma nova revolução alcunhada de Indústria 5.0. Tecnologias como Inteligência Artificial (AI), 5G/6G e Computação Quântica tiveram grandes avanços nos últimos 10 anos. Tais tecnologias certamente afetarão a maneira como as tecnologias ‘capacitadoras’ do conceito original de Indústria 4.0 estão sendo aplicadas. Esta nova geração da Indústria 4.0 promete trazer um novo salto na competitividade das empresas que aplicarem, eficientemente, estas novas tecnologias.

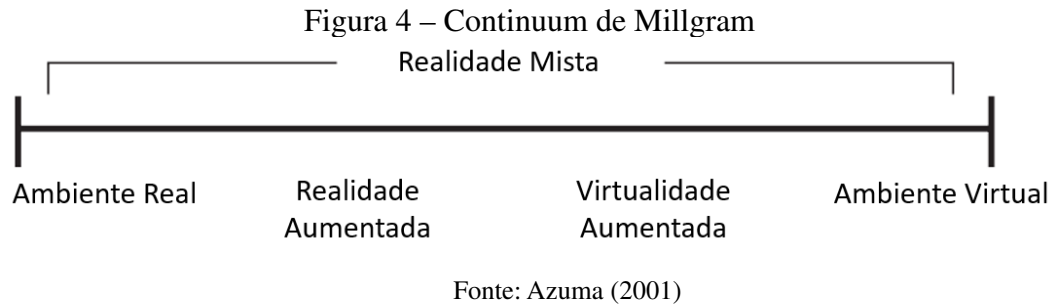
Recentemente, observou-se um avanço ainda maior com a disponibilização da tecnologia 5G, que promete acelerar, melhorar a qualidade e a capacidade de transmissão de dados ou informações. Na esteira do 5G está sendo desenvolvido um conceito, nomeado por ERICSON (2024), de ‘smart manufacturing’. Dentre as tecnologias, trazidas pelo ‘smart manufacturing’, está a Realidade Aumentada ou Realidade Mista. Através desta, a produtividade e qualidade do trabalho realizado pelo operador irá aumentar pelo fato dele possuir instruções virtuais e sobrepostas bem no seu campo de visão, eliminando a necessidade do vem e vai de estudo do roteiro de operações e a execução da atividade.

MUÑOZ-SAAVEDRA et al. (2020) menciona que as tecnologias de Realidade Aumentada e Realidade Virtual antes eram vistas como uma tentativa frustrada na indústria, entretanto, com o avanço tecnológico, especialmente no âmbito do desenvolvimento de novos dispositivos e melhora nos hardwares de processamento, fez ressurgir o interesse pela aplicação deste tipo de tecnologia. Os autores também afirmam que o desenvolvimento de novas tecnologias no âmbito da computação em nuvem, inteligência artificial, sensores biométricos e comunicação 5G podem trazer um novo incentivo para as pesquisas com Realidade Aumentada e Virtual.

Dentre as tecnologias desenvolvidas para a nova geração da Indústria 4.0, GONG et al. (2021) cita a realidade mista. O autor menciona que o sucesso da integração dos sistemas de realidade mista é essencial para a etapa de transformação digital da manufatura. O termo realidade mista, como veremos nas próximas seções, engloba o conceito de realidade aumentada e virtual. É sobre esta tecnologia que pertence ao portfólio da nova geração da indústria 4.0 que este trabalho irá focar.

2.3 REALIDADE MISTA

De acordo com AZUMA (2001), há um conceito conhecido como Continuum de Millgram para definição do ambiente real-virtual. Neste contínuo é apresentado o conceito de realidade mista. Na realidade mista, existem dois extremos, o ambiente 100% real (ambiente real) e o ambiente 100% virtual (ambiente virtual). Entre estes dois extremos estão outros dois níveis. O primeiro é o ambiente real com a adição de alguns objetos virtuais, este nível é denominado realidade aumentada. Já no segundo nível, a predominância do ambiente é virtual com a adição de alguns objetos reais, para este nível denomina-se virtualidade aumentada. Na Figura 4 é possível visualizar, de forma esquemática, o continuum de Millgram.



2.4 REALIDADE VIRTUAL

Conforme ESWARAN et al. (2023), a realidade virtual é uma tecnologia que traz uma experiência de imersão total para o usuário, ou seja, o usuário alterna do mundo 100% real para um mundo 100% digital. Esta alternância permite que o usuário adentre um cenário virtual experimentando, com os sentidos humanos, como é estar naquele cenário totalmente virtual, visualizando, manipulando e interagindo com os objetos virtuais em um ambiente totalmente imersivo.

Segundo PARK et al. (2021), a tecnologia de realidade virtual é a mais predominante das tecnologias imersivas. Ela permite que o usuário se sinta totalmente imerso em uma realidade alternativa. Ao utilizar o dispositivo, é possível a manipulação de objetos enquanto é experimentado os efeitos visuais e sonoros gerados pelo software.

O simulador Sensorama é reconhecido como um dos primeiros simuladores de realidade virtual. Conforme JONES e DAWKINS (2018) o equipamento foi construído na década de 1950 por Morton Heiling. Ele permite que o usuário explore um cenário realístico, interativo e imersivo. A Figura 5 apresenta uma imagem do equipamento Sensorama em uso.

Figura 5 – Sensorama: simulador de realidade virtual



Fonte: MASA (2009)

Desde então, diversos outros equipamentos foram desenvolvidos aperfeiçoando a ideia de Morton Heilig. Conforme MUÑOZ-SAAVEDRA (2020), recentemente, houve grandes avanços tecnológicos nos dispositivos e hardwares de processamento. Isto possibilitou o investimento de grandes empresas no desenvolvimento de novos dispositivos de realidade virtual.

Como pode ser observado no Quadro 1, estes equipamentos têm uma grande variação de funcionalidades e custos, desde equipamentos simples e baratos que utilizam os recursos de processamento, tela, alto-falantes e sensores de um smartphone para executar uma aplicação em realidade virtual, até mesmo dispositivos complexos, com recursos alta capacidade de processamento e sensores de última geração que permitem uma completa imersão no mundo virtual.

No Quadro 1 são apresentados alguns destes equipamentos VR de última geração, comparando suas principais características como quantidade de pixels, tipo de display, taxa de atualização da tela, rastreamento dos olhos, campos de visão e controladores.

Quadro 1 - Comparativo entre dispositivos de Realidade Virtual



DISPOSITIVO REALIDADE VIRTUAL	PSVR2	PSVR	OCULUS QUEST 2	VALVE INDEX
PIXELS POR OLHO	2000 X 2040	960 X 1080	1832 X 920	1600 X 1440
DISPLAY	OLED	OLED	LCD	LCD
FREQUÊNCIA (TAXA DE ATUALIZAÇÃO DA TELA)	120 Hz	120 Hz	120 Hz	144 Hz
RASTREAMENTO DOS OLHOS	SIM	NÃO	NÃO	NÃO
CAMPO DE VISÃO	110°	100°	90°	130°
CONTROLADORES	2 CONTROLES SENSITIVOS	2 CONTROLES PS MOVE	2 CONTROLES OCULUS TOUCH	2 CONTROLES VALVE INDEX

Fonte: LYLES (2022)

2.5 REALIDADE AUMENTADA

DARGAN et al. (2023) define realidade aumentada como um sistema que adiciona ao mundo real objetos digitais, gerados em computador, de forma que eles apareçam e coexistam no mesmo ambiente, no mundo real. Um sistema de realidade aumentada precisa ter 3 propriedades, são elas:

- Combinar objetos reais e virtuais em um ambiente real;
- Permitir interatividade em tempo real;
- Alinhamento dos objetos real e virtual;

PARK et al. (2021) afirma que a sobreposição de informações digitais em objetos reais, feito pela tecnologia de realidade aumentada, cria uma nova camada de percepção da realidade, complementando a realidade do ambiente. Também, a tecnologia não se limita apenas a estimular o sentido da visão, suas possibilidades são muitas. Os dispositivos de realidade aumentada podem estimular todos os sentidos, incluindo audição, tato e olfato.

Já NAKAMURA et al. (2012) afirma que a realidade aumentada acrescenta elementos virtuais ao mundo real, em um processo que geralmente envolve a mistura de objetos gerados por computador com um vídeo em tempo real produzido por uma câmera. Uma superfície alvo

é detectada e rastreada de forma a mostrar corretamente posicionado um objeto virtual sobreposto a superfície alvo.

2.5.1 Dispositivos de realidade aumentada

Apesar da tecnologia de realidade aumentada não ser algo novo, pois já existem estudos desde meados dos anos 60 (VORRABER et al. 2020), somente nos últimos anos é que foi possível transformar os conceitos idealizados pelos pesquisadores em realidade.

AZUMA (2001) afirma que a tecnologia de RA se baseia no desenvolvimento de outras tecnologias básicas que a tornaram possível. Exemplos destas tecnologias básicas são: displays, rastreamento, registro e calibração. Ainda de acordo com o autor, existem três tipos de equipamentos que são utilizados para o desenvolvimento de aplicações em realidade aumentada. São eles: projetores, dispositivos de visualização portátil e dispositivos de visualização acoplados na cabeça, mais conhecido pelo termo em inglês HMD (*'Head Mounted Display'*).

Como mencionado anteriormente, os dispositivos de realidade aumentada são capazes de sobrepor modelos digitais em objetos do mundo real através dos equipamentos mencionados anteriormente.

Projetores – De acordo com NAKAMURA et al. (2012), são equipamentos que projetam diretamente nos objetos reais um objeto digital, o autor nomeia a tecnologia como SAR – *'Spatial Augmented Reality'* e aponta como principal vantagem o fato de não ser necessário o uso de nenhum dispositivo para conseguir visualizar as projeções dos objetos virtuais, permitindo ao operador focar exclusivamente na atividade e ter as mãos livres para o trabalho. Neste método, não há necessidade de câmeras ou dispositivos especiais que auxiliem na visualização dos objetos virtuais.

A maior desvantagem deste tipo de dispositivo é a modificação que precisa ser feita no objeto virtual para ajustá-lo ao objeto real. Para superar esta dificuldade, em geral, há a necessidade de calibrar o sistema de projeção. O sistema de projeção é estático. De acordo com NISHIHARA et al. (2015), este sistema requer um ambiente controlado em termos de iluminação e preparação do ambiente para que os objetos virtuais possam ser corretamente projetados.

Na Figura 6 é possível observar um exemplo de aplicação de realidade aumentada utilizando projetores na montagem estrutural de um segmento da fuselagem de uma aeronave.

Figura 6 - Exemplo de aplicação de realidade aumentada utilizando projetores.



Fonte: DALLE MURA e DINI (2021).

Portáteis – os dispositivos portáteis caracterizam-se por serem leves, com tela de boa resolução e que possuem uma câmera, através da qual o ambiente real é capturado. Na tela do dispositivo um software adiciona elementos virtuais a imagem do mundo real capturada pela câmera. EVANS et al. (2017) menciona que esta tablets e smartphones foram muito utilizados para a popularização da tecnologia de realidade aumentada, porém não se mostravam adequados para um uso industrial, visto que eles não permitem que o operador trabalhe com mãos livres, restringindo seu movimento e a capacidade de interagir com o mundo real.

Conforme NIJHOLT (2021), os dispositivos portáteis como *tablets* e *smartphones* podem ser classificados como ‘video see-through’. Na Figura 7 podemos observar uma aplicação que se utiliza de dispositivo de realidade aumentada portátil (tablet) projetando um objeto virtual no vídeo do mundo real. Os objetos virtuais são mostrados tomando como referência um elemento rastreável, o mais comum a ser aplicado são códigos QR.

Figura 7 - Aplicação de realidade aumentada utilizando dispositivo portátil



Fonte: ANDRADE (2020).

HMD - Os displays vestíveis, conforme NISHIHARA et al. (2015) podem ser ‘optical see-through’ quando se utiliza uma lente semitransparente para projetar os objetos virtuais no mundo real, ou ‘video see-through’ quando se utiliza uma lente opaca onde são projetadas imagens do mundo real feitas por uma câmera acoplada, misturado com objetos virtuais que compõe a aplicação de RA. Uma das grandes vantagens do ‘optical see-through’ é que não há efeito de paralaxe na imagem que está sendo projetada, permitindo realizar as atividades com maior segurança.

Na Figura 8 é apresentado um esquemático que ilustra a diferença entre estes dois conceitos, na imagem do lado esquerdo é apresentado o conceito ‘optical see-through’, enquanto do lado direito é apresentado o conceito ‘video see-through’.

Figura 8 - Comparativo entre 'optical see-through' e 'video see-through'



Fonte: AZUMA (2021).

Os dispositivos de realidade aumentada tiveram um grande avanço nos últimos anos e tecnologias de sobreposição de objetos 3D no mundo real passaram a estar disponíveis em aparelhos pequenos, como um par de óculos conhecido como *head-mounted display*. EVANS et al. (2017) afirma que embora as aplicações de realidade aumentada mostrassem grande potencial para as aplicações de manufatura, a tecnologia não conseguia atingir seu pleno potencial porque os dispositivos tinham sido desenvolvidos com o foco no atendimento da pesquisa que estudava a tecnologia, não com o foco no uso comercial ou industrial, ou seja, não eram robustos o suficiente para serem comercializados.

O que antes dependia de um complexo sistema de projeção agora consegue ser visualizado por meio de um pequeno aparelho que permite ao operador mãos livres para a execução da atividade enquanto consulta as instruções. Conforme SAFI, CHUNG e PRADHAN (2019), um rápido desenvolvimento nas últimas décadas em termos de hardware e software tornaram a tecnologia de realidade aumentada possível de ser aplicada em muitas áreas.

A Figura 9 mostra um comparativo de dispositivos HMD. A imagem do lado esquerdo refere-se a um dispositivo experimental, do final da década de 90, trazida por AZUMA (2001) e no lado direito um dispositivo Microsoft Hololens 2, disponível no mercado desde 2019, conforme BROWN (2024). Na imagem apresentada, ele está sendo vestido por um homem que interage com um objeto virtual (imagem obtida da Internet).

Figura 9 - Evolução dos dispositivos HMD ao longo dos anos



Fonte: AZUMA (2001), imagem do lado esquerdo. XMREALITY (2021), imagem do lado direito.

Nos últimos anos, diversas empresas de tecnologia como Microsoft, Google, Meta, Amazon e Apple têm feito investimento na aplicação das tecnologias de realidade aumentada e virtual, muito em função dos recentes aprimoramentos feitos nos algoritmos dos softwares. Nos últimos 50 anos este tipo de tecnologia vem constantemente evoluindo, sendo que a integração deste tipo de tecnologia no ambiente industrial teve um crescimento acelerado nos últimos anos devido ao contexto da indústria 4.0, conforme BLAGA et al. (2021).

2.5.2 Aplicações de realidade aumentada

RUSTICI (2020) afirma que os primeiros desenvolvimentos em realidade aumentada começaram com Sutherland, na década de 1960, que criou um dispositivo HMD para apresentar gráficos em 3D. Após isso, levaram-se algumas décadas até que houvesse trabalhos desenvolvidos em suficiente número para considerar RA como um campo de pesquisa. Em 1992, Tom Caudell e David Mizell alcunharam o termo RA em um artigo para referir-se a projeção de imagens no mundo real. Durante a década de 90, foi observado um salto no desenvolvimento da tecnologia, diversos fóruns, feiras e eventos foram lançados para impulsionar o desenvolvimento da RA.

BLAGA e TAMAS (2018) afirma que, nos últimos anos, indústrias de vários setores começaram a utilizar tecnologias imersivas, como realidade aumentada e virtual devido a uma significativa melhora nos algoritmos dos softwares e redução nos custos dos equipamentos de RA e RV.

RELJIC et al. (2021) afirma, baseado em análise de publicações relevantes, que as indústrias têm aplicado realidade aumentada em várias atividades como: manutenção, tarefas de montagem, colaboração homem robô, manufatura, treinamento e logística. Dentre estas, as

aplicações para tarefa de montagem representavam 24% do total das aplicações na indústria, com o objetivo de reduzir o tempo e melhorar a qualidade no processo de montagem.

Uma das grandes dificuldades que as empresas possuem, independente do seu ramo, é no treinamento de novos funcionários. Quanto maior a curva de aprendizado, menos eficiência a empresa possui, pois será necessário o acompanhamento de um profissional mais experiente para orientar o recém-contratado. De acordo com VORRABER et al. (2020), as aplicações em realidade aumentada são capazes de reduzir a curva de aprendizado e diminuir a taxa de erro de novos funcionários. Também, o autor afirma que a adoção de tecnologia RA para novos funcionários permite uma assistência remota, online, com profissionais mais experientes que podem fornecer orientação em caso de dúvidas.

Trabalhos como o de WEBEL et al. (2013) indicam também que a realidade aumentada também pode ser utilizada para melhorar os indicadores de custo de não-qualidade na produção, pois menciona que os recursos visuais trazidos pelas instruções em realidade aumentada, permitem aos trabalhadores, em especial novos empregados, a aprender mais rápido, cometendo menos erros, consequentemente, reduzindo os custos de produção.

DARGAN et al. (2023) também fez um estudo amplo das oportunidades de aplicação de RA. Neste estudo os autores citam os seguintes setores: Varejo, Imobiliário, Design de Interiores, Turismo, Mapas e Navegação, Educação e Treinamento, Saúde, Militar, Industrial ou Manufatura, Games e Entretenimento, Robótica, Interação Social. Para o setor industrial, o autor menciona o uso de RA para criar instruções de trabalho e animações que melhoram a percepção dos montadores e reduz o tempo de montagem, assim como pode ser reduzida a necessidade de treinamento para os operadores de produção.

RELJIC et al. (2021) constatou em seu experimento que a aplicação de RA para instruções de trabalho pode reduzir o tempo para localização de objetos e reduzir a movimentação de pescoço e cabeça durante a execução da montagem. Também afirma, que a redução do ciclo de montagem vai depender da complexidade da montagem e qualidade da aplicação de RA desenvolvida. Em alguns casos, pode ser observada uma redução no ciclo de montagem de até 30%.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para se tornar, ou manter-se, competitiva, as indústrias estão a cada dia buscando meios de realizar seus processos de maneira mais eficiente, cortando custos dos insumos de produção, reprojetoando seus produtos para torná-los melhores e mais simples de serem produzidos, treinando seus profissionais para obter uma qualidade cada vez maior naquilo que entregam aos seus clientes, e melhorando seus processos de forma a encontrar desperdícios e eliminá-los.

Neste contexto, esta pesquisa se propôs a realizar um experimento onde pudemos verificar a importância das instruções de trabalho para realizar uma montagem de um conjunto de peças, simulando uma montagem mecânica de baixo ciclo.

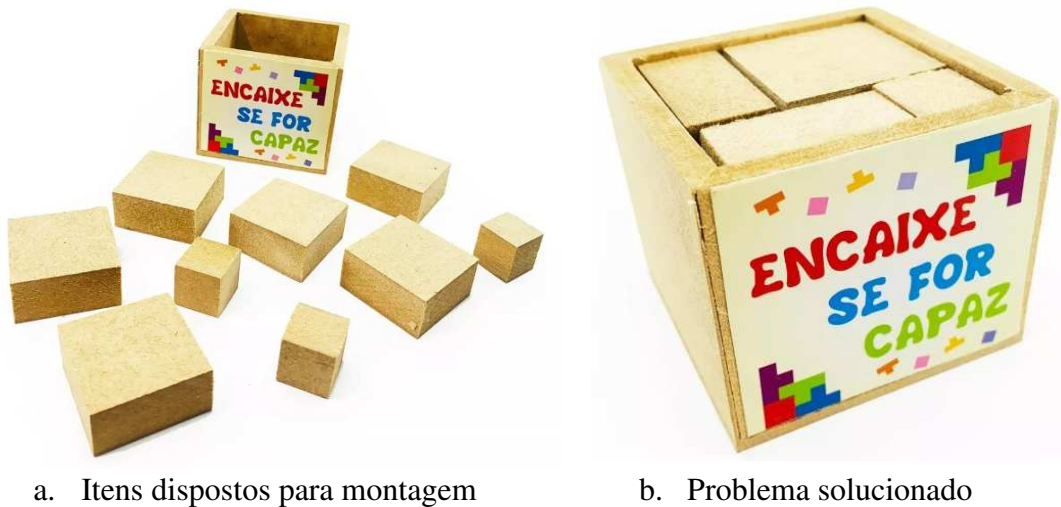
Além de verificar a importância das instruções de trabalho como um meio eficiente de reduzir desperdícios, diminuir o tempo de montagem e, conseqüentemente, os custos de um produto. Esta pesquisa também visou aferir qual o impacto da tecnologia de realidade aumentada quando aplicada na elaboração das instruções de trabalho para a indústria, comparando-a com um meio tradicional de elaboração de instrução de trabalho, que é o desenho técnico em 2 dimensões.

3.1 DESENVOLVIMENTO

3.1.1 Conjunto de blocos

O objeto que foi utilizado para realizar o experimento é um conjunto de 9 blocos que devem ser encaixados em uma determinada sequência de forma que montem um cubo dentro de uma caixa. Após encaixar as 9 peças, nenhuma parte dos blocos deve exceder os limites do cubo formado pela caixa onde as peças serão encaixadas. Na Figura 10 é possível observar fotos do conjunto utilizado no experimento (a.) e de como deve ser a condição final da montagem após concluída (b.).

Figura 10 - Problema utilizado no experimento



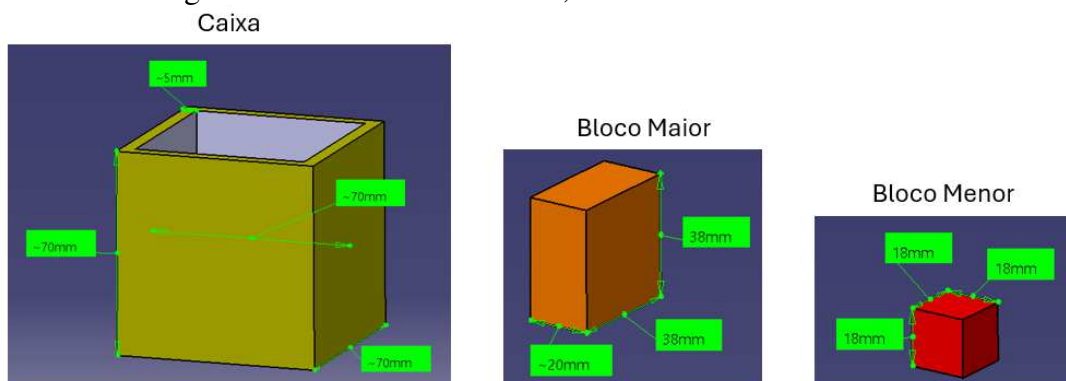
a. Itens dispostos para montagem

b. Problema solucionado

Fonte: ELO7 (2024).

O conjunto, feito em madeira, consiste em 1 caixa com dimensões de 70 mm x 70 mm x 70 mm e espessura de 5mm. Existem 6 blocos nas dimensões 38 mm x 38 mm x 20 mm e 3 blocos nas dimensões 18 mm x 18 mm x 18 mm. As dimensões são apresentadas na Figura 11.

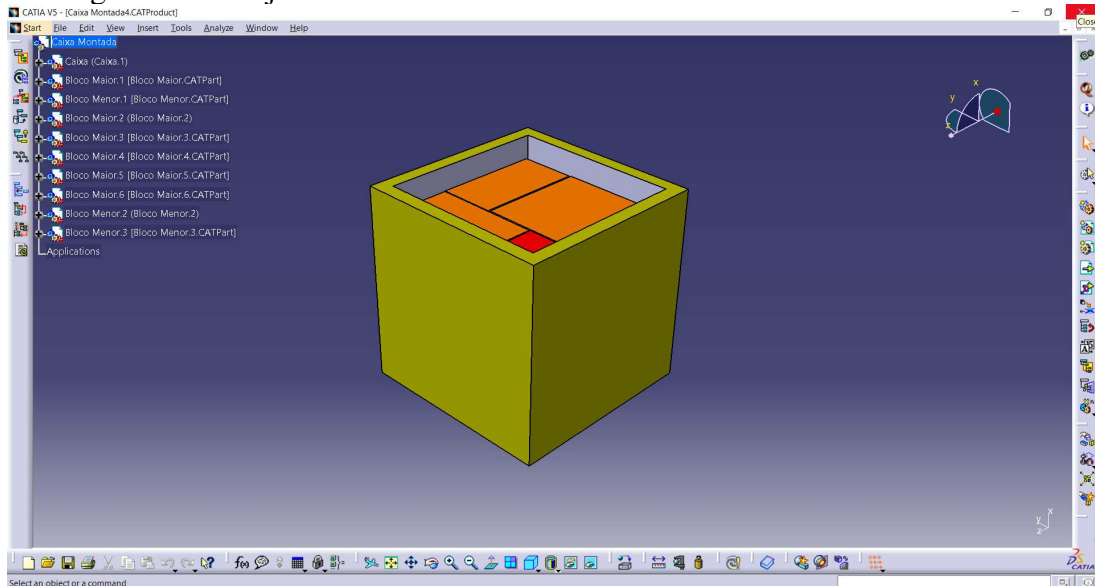
Figura 11 - Dimensões da caixa, bloco maior e bloco menor



Fonte: Produção do próprio autor

Uma das etapas necessárias para a construção das instruções baseadas em realidade aumentada foi o modelamento em 3 dimensões das peças utilizadas. Para este experimento, foi utilizado o software DELMIA CATIA V5 para a construção dos modelos 3D. Os modelos foram desenhados separadamente (arquivos CATPART) e depois unidos em um conjunto (arquivo CATPRODUCT). A Figura 12 apresenta uma ilustração do software DELMIA CATIA V5 com o conjunto montado.

Figura 12 - Conjunto da caixa mais blocos montados no software CATIA V5



Fonte: Produção do próprio autor

3.1.2 Modelamento 3D

Como mencionado no tópico anterior, os modelos 3D deste experimento foram construídos com o auxílio do software DELMIA CATIA V5. Os modelos 3D são parte fundamental para o desenvolvimento da instrução de trabalho em realidade aumentada, sem estes modelos não é possível projetar os hologramas que serão exibidos pelos óculos Microsoft Hololens.

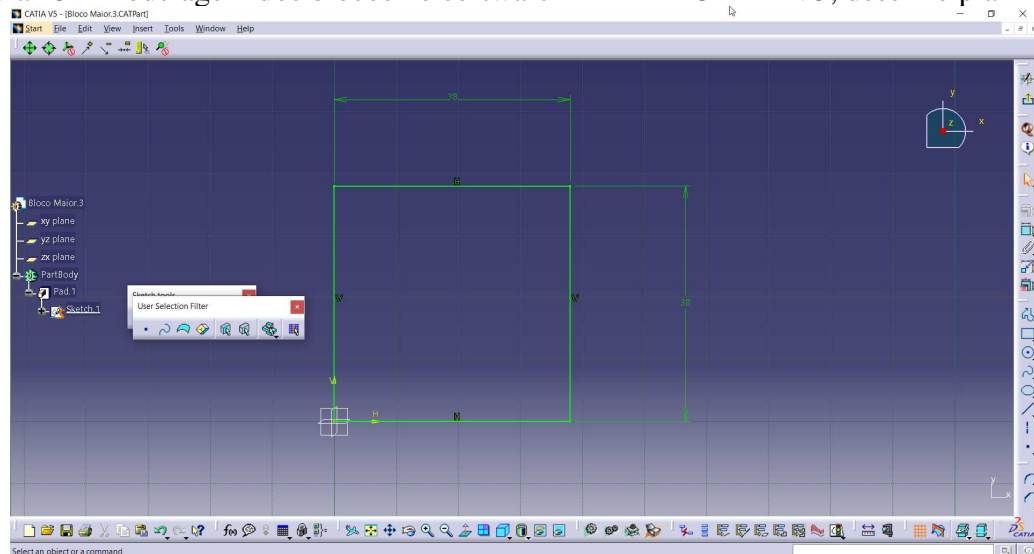
Também, através deste modelamento foi construído o desenho em duas dimensões que servirá como base de comparação para avaliarmos a eficácia das instruções em realidade aumentada.

Para a construção destes modelos, foram tomadas as dimensões das peças reais, e gerado um *sketch*, desenho planificado em duas dimensões, de uma das faces, para cada um dos modelos de peça que seriam utilizados no experimento. Na Figura 13 é apresentado um exemplo de construção do desenho planificado.

Após realizado o dimensionamento e aplicado o conjunto de restrições do *sketch*, foi gerado um modelo a partir da extrusão da peça na terceira dimensão, cujo valor era representado pela profundidade. A partir de então, foi gerado um arquivo conhecido como CATPART.

Para cada peça utilizada neste experimento foi gerado um CATPART singular, por exemplo, o bloco menor que possui quantidade 3 teve gerado o “Bloco menor 1.CATPART”, “Bloco menor 2.CATPART”, e assim sucessivamente.

Figura 13 - Modelagem dos blocos no software DELMIA CATIA V5, desenho planificado



Fonte: Produção do próprio autor

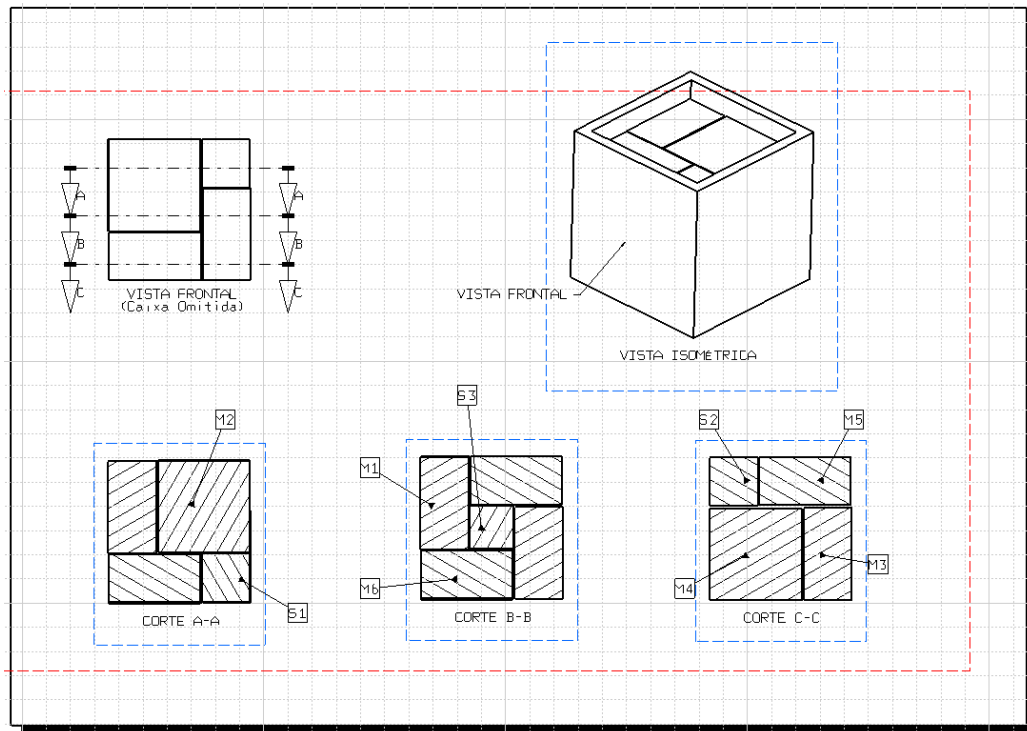
A próxima etapa do modelamento em três dimensões se consiste na montagem dos blocos na caixa onde eles seriam encaixados. Nesta etapa foi gerado um arquivo conhecido como CATPRODUCT. Neste arquivo foram posicionadas as peças conforme a ordem de instalação.

Após termos as peças modeladas (CATPART) e o conjunto montado (CATPRODUCT) foi feita a geração do desenho em duas dimensões que foi utilizado no experimento como base de comparação a instrução de trabalho em realidade aumentada.

O desenho em duas dimensões foi planejado para possuir uma vista isométrica que mostra o conjunto todo montado e três cortes, corte AA, corte BB e corte CC, representando cada uma das 3 camadas de montagem que definimos como método de processo de montagem desta peça.

Na Figura 14 encontra-se o desenho em duas dimensões gerado a partir da montagem dos blocos no DELMIA CATIA V5 e que será utilizado para realizar uma das etapas do experimento.

Figura 14 - Desenho em duas dimensões da caixa montada, gerado a partir do software DELMIA CATIA V5



Fonte: Produção do próprio autor

3.1.3 Instrução em realidade aumentada

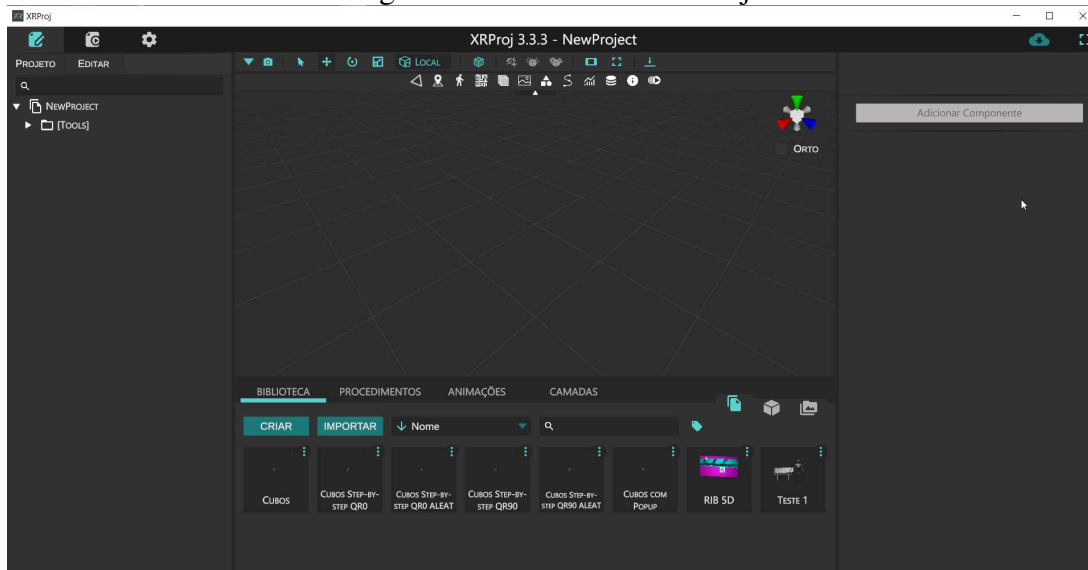
Com os modelos 3D das peças prontos, a próxima etapa do desenvolvimento deste projeto foi a construção da instrução em realidade aumentada. Para esta finalidade, existiam inúmeros softwares disponíveis que possibilitavam a construção de hologramas, projeções, animações, etc.

Dentre estes, destaca-se o Unity, software desenvolvido pela empresa Unity Technologies e que se tornou referência no mercado para o desenvolvimento de jogos de vídeo game e de projeções em realidade aumentada. Apesar do Unity ser considerado acessível e fácil de manipular pelos usuários, ele exige um conhecimento mínimo em linguagens de programação para que possa ser utilizado.

Como alternativa ao Unity, o software XRProj, foi desenvolvido pela empresa Formula XR, uma startup de tecnologia localizada em São José dos Campos/SP. A proposta deste software é gerar conteúdo digital de forma mais simples, acessível e rápida comparado ao Unity, permitindo que mais pessoas consigam criar suas próprias animações e hologramas em realidade virtual ou aumentada, mesmo sem ter um conhecimento aprofundado em linguagens de programação. O XRProj, versão 3.3.3, foi o software selecionado para o desenvolvimento deste trabalho.

A Figura 15 mostra a tela inicial do software XRProj ao acessá-lo pela primeira vez.

Figura 15 - Tela inicial XRProj



Fonte: Produção do próprio autor

O primeiro passo para a construção da instrução de trabalho em realidade aumentada é a importação dos modelos 3D construídos na etapa anterior (blocos maiores, menores e caixa). Como o XRProj consegue ler apenas algumas extensões de modelos 3D, foi preciso transformar os arquivos criados em CATPART em STEP. Após esta etapa, foi possível a importação dos modelos para dentro do XRProj.

Uma vez que os modelos foram carregados e devidamente posicionados no software, simulando a posição inicial das peças que seriam montadas, foi feito o posicionamento da câmera (ponto de vista do operador) na cena que está sendo construída, para isso foi utilizado o recurso Hotspot, como mostrado na Figura 16.

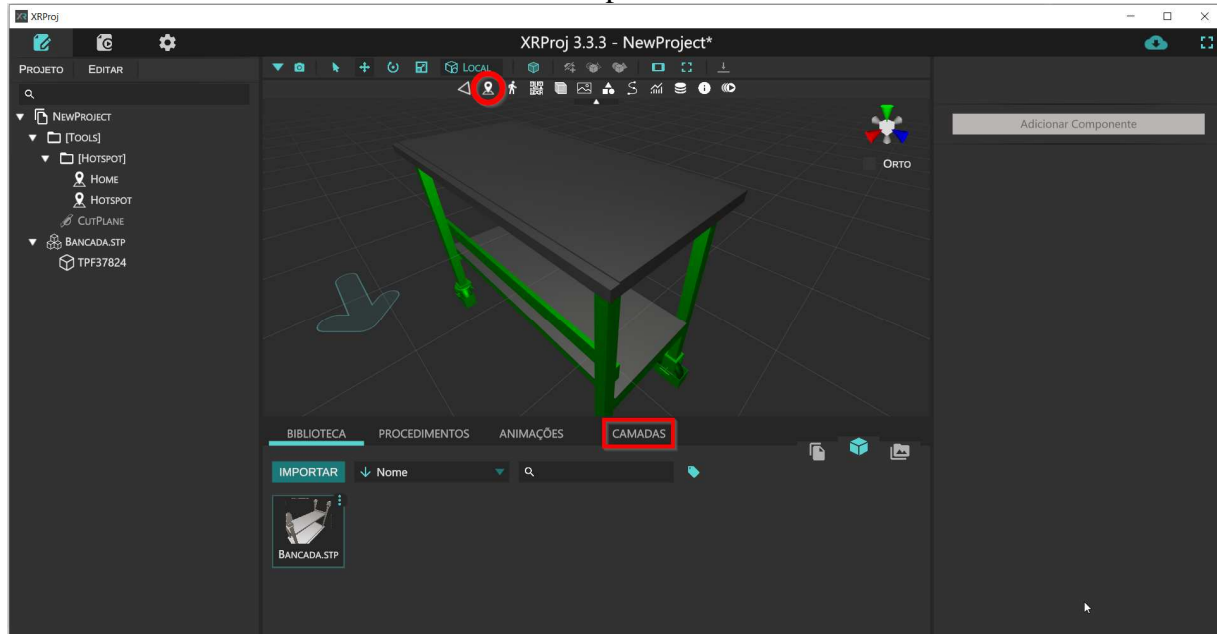
Também, foi incluído nos modelos um QR code que serviu de referência para o posicionamento das projeções. Ao carregar o arquivo da instrução de trabalho nos óculos de realidade aumentada, o equipamento escaneia a região de trabalho à procura do elemento QR Code, que foi impresso e posicionado no local de referência. Neste procedimento, o QR Code é apoiado sobre a bancada de trabalho.

Definidos os posicionamentos da câmera e do QR code, os modelos foram agrupados em camadas, de acordo com a ordem de montagem que foi proposta. Nesta etapa, foi fundamental ter em mente o processo, método de montagem para que fosse facilitada a construção da instrução de trabalho e o entendimento por parte dos voluntários que iriam montar.

Para a instrução de trabalho desenvolvida, criaram-se 4 camadas: Caixa, Camada Inferior, Camada Central e Camada Superior. Além de organizar o processo de montagem a ser

construído, as camadas também ajudaram quando foi necessário aplicar algum efeito como transparência, ocultar, corte ou explosão.

Figura 16 - Modelos carregados e posicionados no software XRProj. Em destaque, os recursos Hotspot e Camadas



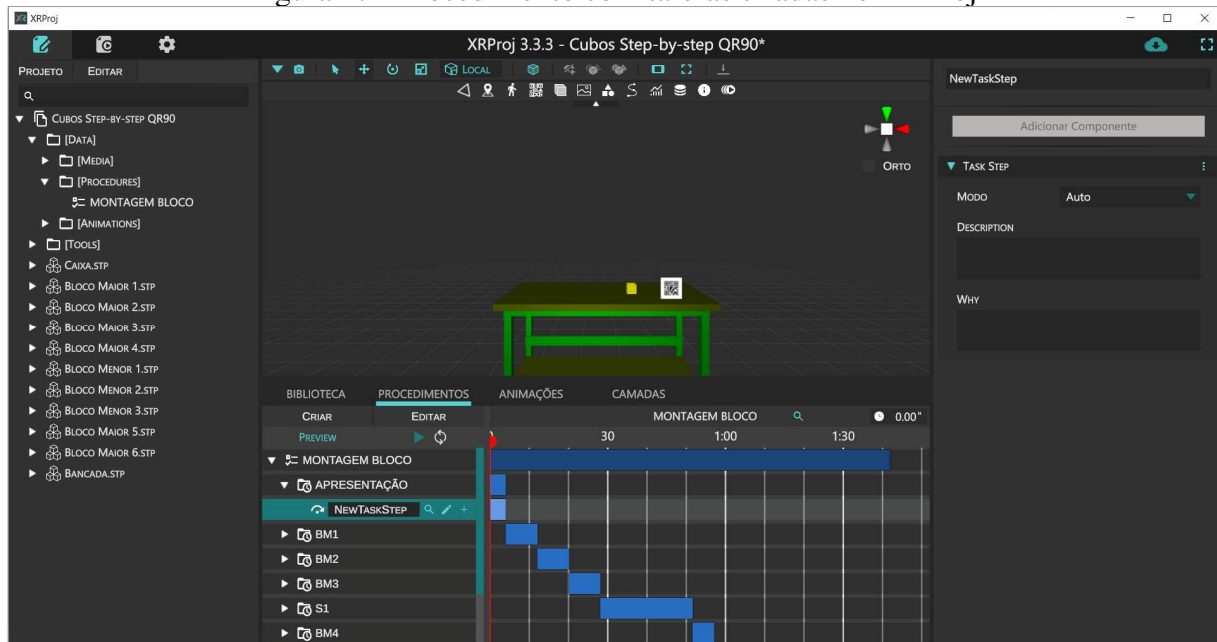
Fonte: Produção do próprio autor

A etapa seguinte consistiu na construção do procedimento dentro do software. Para isso, foi necessário acessar a aba “Procedimento”, clicar no botão “Criar” e selecionar a opção “Novo procedimento”. Após a criação, o procedimento foi renomeado com um título condizente com a instrução de trabalho em desenvolvimento; neste caso, o nome escolhido foi “Montagem Bloco”.

Em seguida, foram criadas as tarefas que compõem o procedimento. O processo para adicionar cada tarefa envolveu clicar com o botão direito sobre o procedimento, selecionar “Criar” e, em seguida, escolher a opção “Tarefa” na lista. Para este trabalho, como ilustrado na Figura 17, foram criadas 10 tarefas: uma destinada à “Apresentação” da caixa (sem os blocos montados) e outras específicas para cada bloco a ser montado. Os blocos maiores foram identificados como “BM” e os menores como “S”.

Cada tarefa também incluiu um “passo”, que foi adicionado para definir as animações relacionadas àquela etapa do procedimento. Essas animações foram criadas dentro dos passos, garantindo que cada estágio do processo fosse devidamente representado e compreendido pelos usuários. A organização dessas etapas pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Procedimento com tarefas criadas no XRProj



Fonte: Produção do próprio autor

Com o procedimento, tarefas e passos criados no software, foi necessário entrar em cada um dos passos das tarefas criadas e modelar a animação que seria apresentada no holograma projetado ao usuário.

O software XRProj permite a criação de diversos tipos de animação, como Câmera, Transformação, Giro, Visibilidade, Piscar, Layer, Hotspot, Popup, UV, Cor, Spline, Áudio e Animação Externa. A Figura 18 mostra a relação de como as opções de animação são apresentadas no software. Neste trabalho, foram utilizadas praticamente todas as opções, de acordo com a necessidade de aplicação no passo que estava sendo desenvolvido.

Figura 18 - Diversos tipos de animação no XRProj



Fonte: Produção do próprio autor

À medida que as animações foram sendo inseridas nos passos, foi definido um tempo de duração para cada uma delas. As animações podiam ser aplicadas na sequência (em série), ou

simultaneamente (em paralelo), a depender do objetivo que se tinha para cada uma delas. O somatório dos tempos de duração das animações definiu o tempo total do passo ou tarefa, como pode ser observado nas barras do lado direito da Figura 18. O somatório dos tempos das tarefas definiu o tempo total do procedimento de montagem, como pode ser observado nas barras da Figura 17.

Após finalizada, a instrução de trabalho contou com 9 tarefas ou passos, sendo reproduzida em cerca de 27s. O passo final dentro do software de desenvolvimento, no desktop, foi exportar o procedimento criado para a extensão ‘xrf’ para que a aplicação visualizadora do XRProj, desenvolvida para o Hololens, pudesse ler e reproduzir o procedimento.

Para avançar cada um dos passos foi necessário que o usuário utilizasse o comando de voz pronunciando algumas palavras. A palavra ‘Next’ comanda o avanço de um passo para outro, outra opção seria o usuário apertar o botão ‘Next’ projetado, entretanto, esta segunda opção toma mais tempo do usuário, sendo mais fácil o comando por voz.

Outras palavras utilizadas no comando de voz da aplicação é ‘Back’ para retornar ao passo anterior, ‘Center’ para reposicionar o painel de instruções, ‘Start’ para reproduzir a cena e ‘Close’ para encerrar a aplicação.

4 PROPOSTA DE EXPERIMENTO

Para o experimento deste estudo, o plano foi realizá-lo em três etapas: familiarização, auxílio de desenho em duas dimensões e auxílio de realidade aumentada.

A primeira etapa, familiarização, refere-se a um desafio para as pessoas que realizaram o experimento. Neste momento, as pessoas eram desafiadas a realizar a montagem do cubo em um tempo máximo de 5 minutos, sem qualquer auxílio. Os objetivos desta etapa foram: criar uma referência de comparação para as etapas com auxílio e familiarizar as pessoas com a montagem que seria proposta no experimento.

A segunda etapa contou com o auxílio do desenho em duas dimensões. O desenho utilizado nesta etapa foi aquele apresentado na Figura 14. O processo de construção deste desenho utilizou como base uma vista isométrica que mostra como o cubo deve estar montado ao final do processo.

A partir da vista isométrica, definiu-se uma vista frontal, com a caixa omitida, de forma que o usuário pudesse enxergar os blocos montados dentro da caixa. Por fim, foram realizados, a partir da vista frontal, três cortes: corte A-A, corte B-B e corte C-C. Cada um dos cortes representou uma camada de montagem.

Foram definidas três camadas de montagem:

- inferior, representada pelo corte C-C, por onde o usuário sempre começa a realizar a montagem;
- central, representada pelo corte B-B;
- superior, representada pelo corte A-A;

Os blocos foram identificados neste desenho com siglas para auxiliar na identificação dos blocos a serem montados em cada posição. Para os blocos menores foi utilizada a identificação S, variando de S1 até S3. Já para os blocos maiores foi utilizada a sigla M, variando de M1 até M6.

Com os usuários já familiarizados com a montagem, etapa anterior, eles foram desafiados a realizar novamente a montagem com o auxílio do desenho em duas dimensões. Esperava-se que a maior parte dos usuários conseguisse realizar a montagem em menos de 5 minutos. Na Figura 19 está sendo mostrada a imagem de um dos experimentos realizados durante as Etapas 1 e 2.

Figura 19 - Montagem dos blocos Etapas 1 e 2



Fonte: Produção do próprio autor

Por último, a terceira etapa consistiu na apresentação do processo de montagem em realidade aumentada. Para esta etapa foram utilizados os óculos de realidade aumentada Microsoft HoloLens 2, equipados com o software visualizador XRProj que executou o script desenvolvido no software de desenvolvimento de projeções em realidade aumentada, também chamado de XRProj.

Uma característica dos óculos Microsoft HoloLens é que eles permitem que usuários tenham as mãos livres para execução do trabalho e possam desfrutar de um amplo campo visual com a peça posicionada a partir de um objeto de referência, que no caso é o QR Code, que foi escaneado como primeiro passo no uso da aplicação.

Após definido o ponto de referência para o software projetar as imagens, o usuário foi instruído a colocar a caixa vazia ao lado da projeção para que ele possa observar os passos do processo criado em realidade aumentada e copiar para a montagem real.

Também, nesta etapa, o usuário foi instruído sobre como avançar ou retroceder um passo do processo de montagem utilizando o comando de voz, recurso disponível da aplicação, descrito na seção 3.1.3.

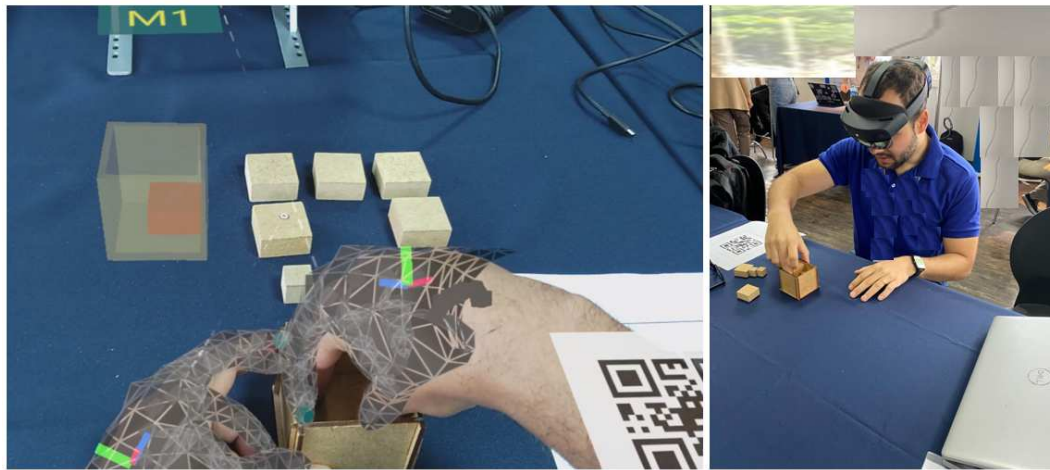
A aplicação foi iniciada com a projeção da caixa e o primeiro cubo a ser montado, identificado da mesma forma como foi feito para o desenho em duas dimensões, ou seja, de M1 até M6 para os blocos maiores e S1 até S3 para os blocos menores, Além desta identificação, os blocos também se distinguem pela cor, sendo vermelha para os blocos maiores e verde para os blocos menores.

A medida que o usuário montava o bloco na caixa, ele acionava o comando de voz para avançar um passo, na sequência, era apresentado para ele o próximo bloco a ser montado, posicionado na caixa, com sua respectiva indicação.

O bloco que foi montado no passo anterior tinha a cor alterada, para cor cinza, independente se o bloco era do tipo maior ou menor. Isto foi feito para facilitar o entendimento de qual bloco e em qual posição deveria ser montado, com a caixa já possuindo alguns blocos montados na projeção.

Este processo era repetido até que todos os 9 blocos fossem montados na caixa, encerrando o procedimento de montagem.

Figura 20 - Montagem dos blocos Etapa 3



Fonte: Produção do próprio autor

Para o experimento, como poucas pessoas têm acesso aos óculos de realidade aumentada, foi decidido que seria realizada algumas (duas ou três) etapas do processo de montagem, sem contabilizar o tempo, na primeira tentativa, de forma que os usuários se adaptem com o peso do equipamento, ajuste de brilho, instruções de comandos de voz e demais recursos que poderiam interferir nos resultados obtidos. Somente na segunda vez que a montagem fosse realizada é que os tempos serão considerados para o resultado do experimento.

Como a montagem em realidade aumentada é direta e exigia pouca margem para interpretação, esperava-se que todos os usuários conseguissem realizar a montagem dentro do tempo máximo de 5 minutos, apresentando resultado melhores, na média do que as outras duas etapas, familiarização e montagem com auxílio de desenho em duas dimensões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização do experimento, serão apresentados os resultados de forma individual para cada uma das etapas realizadas.

5.1 ETAPA 1 – FAMILIARIZAÇÃO

Na 1ª etapa, chamada de familiarização, o objetivo foi obter dados para criar um comparativo com as demais etapas que iriam possuir algum nível de auxílio, podendo assim verificar quantitativa e qualitativamente as vantagens de se utilizar um método para a montagem dos blocos.

Ao longo da realização do experimento, nesta primeira etapa, foi observado que poucos participantes conseguiram realizar a montagem dos blocos. Como mostra os resultados descritos na Tabela 2, apenas 26 dos 84 participantes, que realizaram a primeira etapa, conseguiram montar o cubo sem nenhum tipo de auxílio.

Tabela 2 - Resultados Etapa 1 – Montou vs Não montou			
	MONTOU	NÃO MONTOU	TOTAL
Quantidade Usuários	26	58	84
%	31%	69%	100%

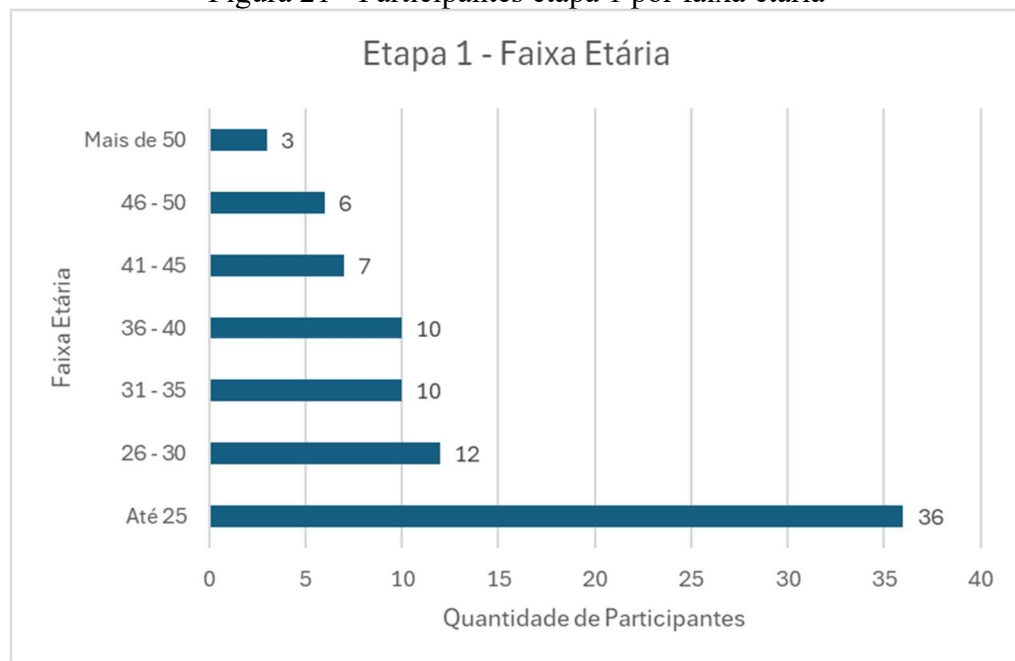
Fonte: Produção do próprio autor

A Tabela 3 e Figura 21 mostram um extrato por sexo e faixa etária, respectivamente, dos participantes que realizaram a etapa 1. Dos 84 participantes, 20 eram do sexo feminino, enquanto 64 eram do sexo masculino. A faixa etária variou entre 17 e 62 anos de idade, tendo uma predominância na faixa etária de até 25 anos. A média de idade dos participantes foi de 30 anos e 11 meses.

Tabela 3 - Participantes Etapa 1 por sexo			
	MASCULINO	FEMININO	TOTAL
Quantidade Usuários	64	20	84
%	76%	24%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

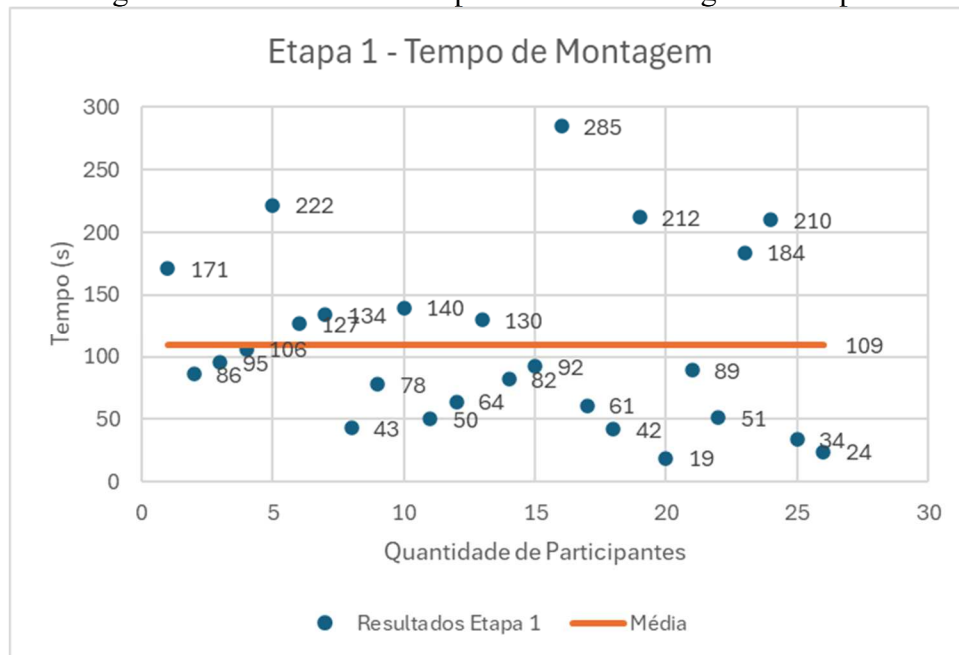
Figura 21 - Participantes etapa 1 por faixa etária



Fonte: Produção do próprio autor

Utilizando os tempos obtidos da montagem na etapa 1, para aqueles que conseguiram realizá-la, podemos ter uma base de comparação e definir um tempo médio de montagem sem auxílio. Os resultados, conforme mostrado no gráfico da Figura 22, indicam que o tempo médio de montagem é de 109 segundos. O mais rápido levou 19 segundos para montar, o mais lento 285 segundos. 23 das 26 pessoas que conseguiram realizar a montagem eram do sexo masculino e possuíam idade entre 17 e 48 anos. Isto resulta em uma taxa de sucesso na população masculina de 36%, 23 entre 64 realizaram a montagem da etapa 1. Já na população feminina, a taxa de sucesso foi de 3 em 20, o que resulta em 15%.

Figura 22 - Resultados e tempo médio de montagem da etapa 1



Fonte: Produção do próprio autor

5.2 ETAPA 2 – AUXÍLIO COM DESENHO EM DUAS DIMENSÕES

Na segunda etapa, conforme discutido na seção ‘Procedimentos’, foi introduzido para os usuários um desenho em duas dimensões. Esperava-se que com o auxílio do desenho em duas dimensões a montagem se tornasse possível para os 69% dos usuários que passaram pela etapa 1 e não obtiveram êxito e que se tornasse mais rápido para os 31% que também passaram pela etapa 1, montaram, mas sem possuir um processo ou estratégia pré-definida.

Um ponto importante desta etapa é que para o experimento ser bem-sucedido, foi necessário selecionar as pessoas por conhecimento, ou não, em desenho técnico. Pessoas que não possuíam conhecimento em desenho técnico tiveram seus resultados descartados, pois não conseguiam entender o sistema de criação de desenho em 3 vistas e cortes.

Entretanto, mesmo selecionando as pessoas por experiência em montagem e conhecimento em desenho técnico, houve alguns casos em que o participante não conseguiu montar, mesmo com o desenho 2D em mãos por não serem capazes de entender os conceitos de desenho técnico, como vistas e cortes. Desta forma, conforme a Tabela 4, houve uma taxa de sucesso na montagem de 88% na etapa 2, melhorando significativamente em relação a etapa 1.

Tabela 4 - Resultados Etapa 2 – Montou vs Não montou

	MONTOU	NÃO MONTOU	TOTAL
--	--------	------------	-------

Quantidade Usuários	61	8	69
%	88%	12%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

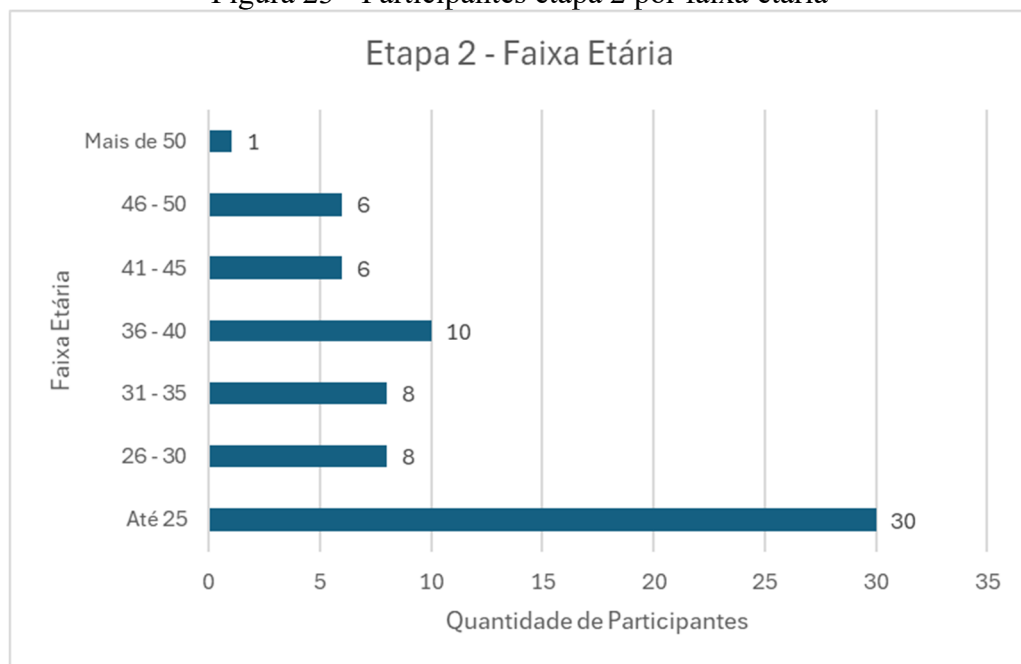
Na Tabela 5 e na Figura 23 podemos ver um extrato da população que participou da etapa 2 do experimento. Ao total foram 69 participantes, sendo 19 do sexo feminino e 50 do sexo masculino. A faixa etária variou entre 17 e 54 anos de idade, tendo uma predominância na faixa etária de até 25 anos, 30 participantes. A média de idade dos participantes foi de 30 anos e 9 meses.

Tabela 5 - Participantes Etapa 2 por sexo

	MASCULINO	FEMININO	TOTAL
Quantidade Usuários	50	19	69
%	71%	29%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 23 - Participantes etapa 2 por faixa etária



Fonte: Produção do próprio autor

O resultado da 2ª etapa nos mostra através do gráfico da Figura 24 que o tempo médio obtido de montagem é de 68 segundos. O usuário mais rápido levou 24 segundos, enquanto o mais lento 270 segundos. Foram realizados 61 experimentos cujos participantes conseguiram montar, a partir destes experimentos é que os tempos foram considerados.

Na última etapa do experimento, foi utilizado como suporte o equipamento de realidade aumentada Microsoft Hololens 2, através deste equipamento, os usuários puderam receber instruções de montagem por meio de uma projeção em realidade aumentada. A expectativa, antes do início do experimento, era que houvesse algum ganho de eficiência ao ser disponibilizado o recurso de realidade aumentada, porém não havia certeza de que seria um fato, além de dúvidas com relação a fatores de influência, como experiência em montagem, conhecimento em desenho técnico, faixa etária e inexperiência com o uso do Hololens.

Como primeiro resultado nesta etapa, podemos destacar a eficiência na execução das montagens. Conforme demonstrado na Tabela 6, houve 100% de aproveitamento, todos os participantes conseguiram realizar a montagem com sucesso, sem nenhum tipo de auxílio, a não ser o que estava sendo projetado. Comparando com a etapa inicial que teve apenas 31% de sucesso e a etapa 2 que teve 88% de sucesso, pode-se concluir que houve uma melhora significativa com o uso da realidade aumentada.

Tabela 6 - Resultados Etapa 3 – Montou vs Não montou			
	MONTOU	NÃO MONTOU	TOTAL
Quantidade Usuários	61	0	61
%	100%	0%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

Um detalhe importante referente a Etapa 3 e como o sucesso de 100% das tentativas de montagem é relevante, refere-se a população que compõe o experimento. Enquanto na Etapa 2 havia apenas pessoas que tinham conhecimento em desenho técnico, para a realização da Etapa 3 não houve pré-requisitos, inclusive, havia dois participantes com mais de 60 anos e muitos que não possuem nenhuma experiência profissional na indústria, ou com montagem de peças. Espera-se que pessoas idosas e sem experiência em montagem tenham menos aptidão para lidar com tecnologias modernas, mas neste caso, não houve interferência e a montagem foi possível de ser feita seguindo as instruções disponíveis.

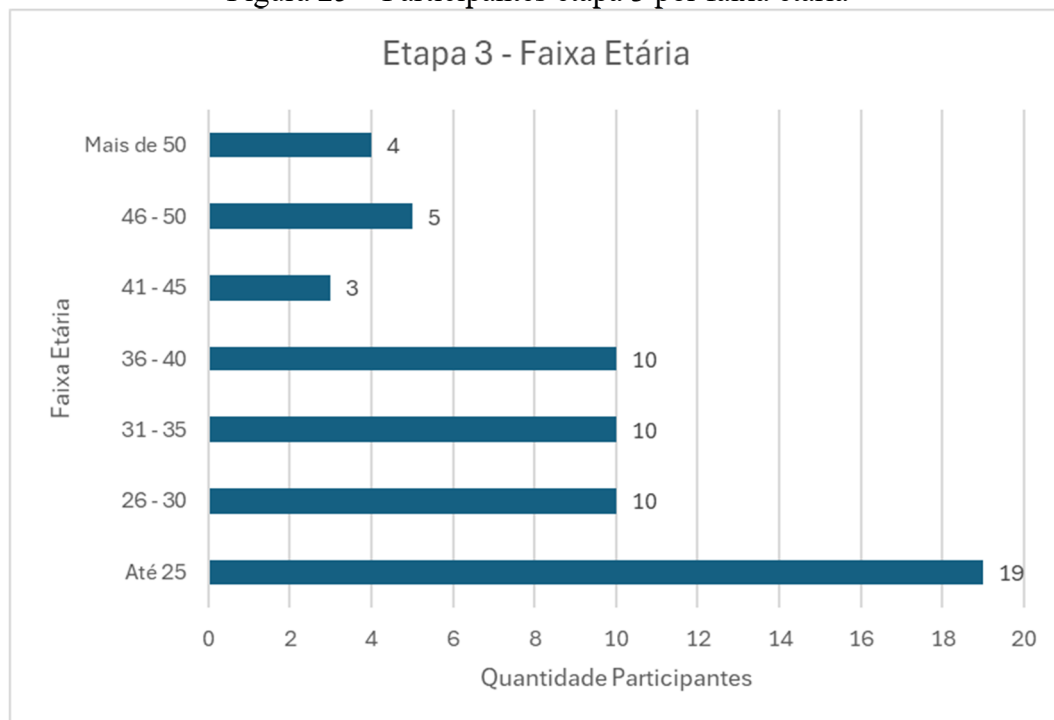
Na Tabela 7 e na Figura 25 temos um extrato da população que participou da etapa 3 do experimento. Ao total foram 61 participantes, sendo 15 do sexo feminino e 46 do sexo masculino. A faixa etária variou entre 17 e 62 anos de idade, tendo uma predominância na faixa etária de até 25 anos, 19 participantes. A média de idade dos participantes foi de 32 anos e 7 meses.

Tabela 7 - Participantes Etapa 3 por sexo			
	MASCULINO	FEMININO	TOTAL

Quantidade Usuários	46	15	61
%	75%	25%	100%

Fonte: Produção do próprio autor

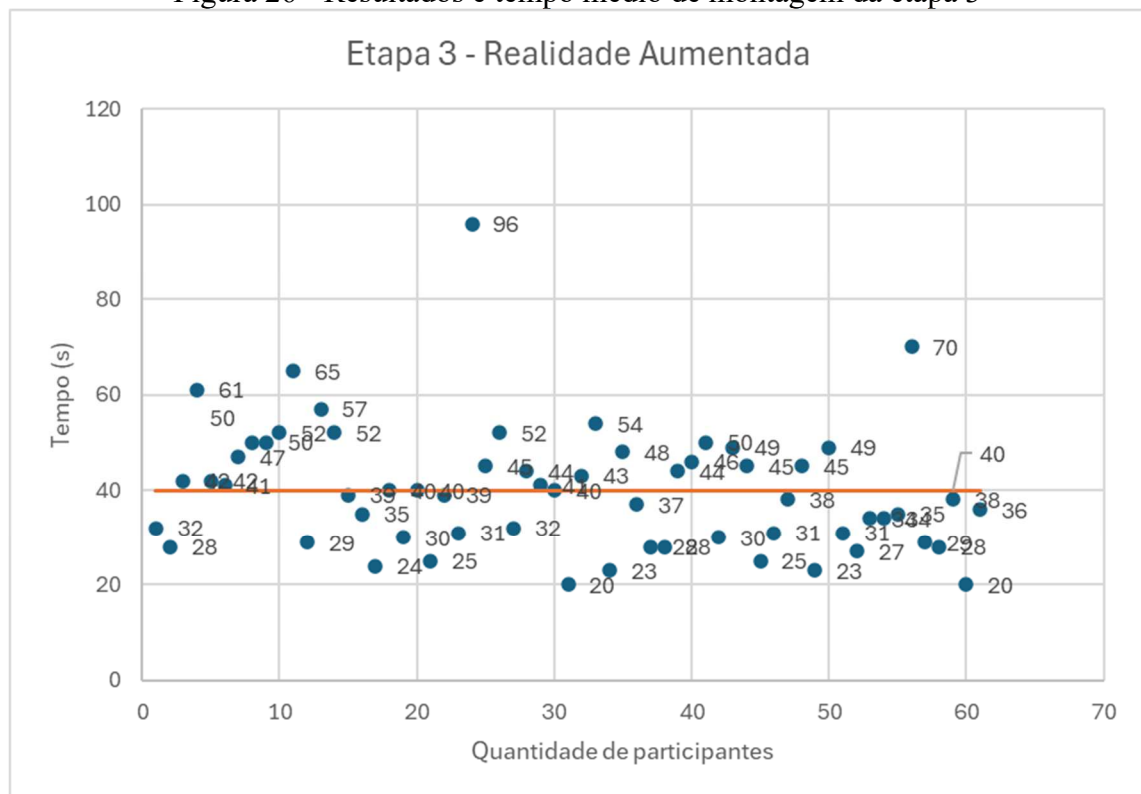
Figura 25 – Participantes etapa 3 por faixa etária



Fonte: Produção do próprio autor

O resultado da 3ª etapa mostra no gráfico da Figura 26 que o tempo médio obtido de montagem é de 40 segundos. O usuário mais rápido levou 20 segundos, enquanto o mais lento 96 segundos. Foram realizados 61 experimentos em que os usuários conseguiram montar, a partir destes, é que os tempos foram considerados.

Figura 26 - Resultados e tempo médio de montagem da etapa 3



Fonte: Produção do próprio autor

Um ponto a ressaltar observado durante os experimentos da Etapa 3 é com relação a dificuldade no comando de voz que era utilizado para passar para o próximo passo. Como relatado na seção 4, os participantes foram orientados a praticar, na primeira tentativa a pronúncia da palavra “Next” e “Back”, que eram utilizadas para avançar ou retroceder o passo que se estava montando. Entretanto, nem todos os participantes conseguiam pronunciar as palavras corretamente, ou, por vezes, o software não conseguia reconhecer mesmo a pessoa pronunciando de forma correta.

Portanto, quando os participantes apresentavam dificuldades no comando de voz, os tempos obtidos eram maiores do que aqueles em que os comandos eram obedecidos na primeira pronúncia.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, foi colocado como objetivo geral o seguinte ponto:

- Desenvolver uma instrução em realidade aumentada;

Também, determinou-se objetivos específicos, são eles:

- Demonstrar a eficácia das instruções de trabalho para obtermos maior qualidade, eficiência e menor ciclo.

- Entender as vantagens e desvantagens de se utilizar a tecnologia de realidade aumentada para escrever instruções de trabalho.

Como pode ser observado ao longo do trabalho, houve êxito no desenvolvimento da instrução em realidade aumentada, portanto, atingindo o objetivo geral proposto.

Através do uso de recursos de hardware (Microsoft Hololens 2) e software (XRProj), foi possível desenvolver a proposta do experimento e obter sucesso na execução do programa, sem grandes intercorrências, com exceção do comando de voz que algumas vezes falhava e prejudicava o desempenho dos participantes, como relatado na seção 5.3.

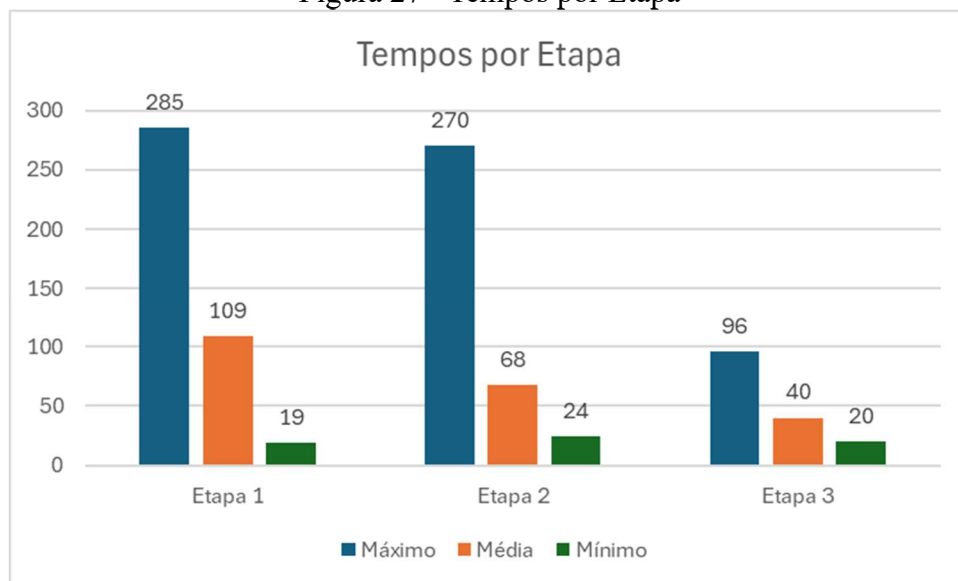
Entretanto, vale ressaltar que o tempo investido na elaboração da instrução em realidade aumentada foi muito superior em relação ao desenho utilizado na Etapa 2.

Com relação a demonstração de eficácia em termos de redução de ciclo, fica mais visual se forem comparados os tempos médios, máximo e mínimos de cada etapa, lado a lado.

Pode-se notar na Figura 27, uma clara redução dos tempos à medida que é introduzido o auxílio da instrução de trabalho. Ao comparar os tempos de montagem obtidos no cenário da Etapa 1, sem nenhuma instrução de trabalho, com o cenário da Etapa 3, instrução em realidade aumentada, nota-se uma redução de mais de 60% (comparando as médias). Quando se compara o tempo médio da Etapa 3 com a Etapa 2, nota-se que o procedimento em realidade aumentada se mostra mais eficiente, reduzindo o tempo médio em 41%.

Os resultados, sob o aspecto de tempo médio, estão coerentes com o obtido por RELJIC et al. (2021) que observou uma melhora de cerca de 30% quando comparando a tecnologia de realidade aumentada com meios tradicionais de instrução de trabalho.

Figura 27 - Tempos por Etapa



Fonte: Produção do próprio autor

Ao avaliar as montagens sobre o prisma da Qualidade, observa-se que as instruções de trabalho trazem dois elementos importantes: padrão de montagem e eliminação do método tentativa e erro. Durante a realização do experimento, na Etapa 1, os participantes não tinham ideia por onde começar e ficavam realizando várias tentativas de montagem, sem nenhum critério, buscando adivinhar o encaixe ideal para obter êxito.

Na Etapa 2, com o primeiro nível de auxílio, a situação melhorou, mas ainda assim houve falhas de interpretação do desenho, o que resultou no tempo maior para realizar as montagens. Além disso, oito participantes não conseguiram realizar a montagem, pois não conseguiram compreender o desenho de vistas e cortes.

A Etapa 3, com a realidade aumentada, demonstrou ser a melhor também neste quesito, pois o operador não precisa abstrair, interpretar nenhuma vista ou desenho, basta simplesmente repetir a projeção 3D, fiel àquilo que está sendo montado. Observou-se durante o experimento que durante a Etapa 3 houve muito menos retrabalhos (reposicionamento de peças) do que na Etapa 2.

Este resultado está alinhado com o que diz SERVAN (2012). O autor comenta em seu trabalho que a representação visual de um componente ou sistema complexo em elementos gráficos, melhora o processo de montagem em termos de eficiência e acurácia. Pois melhora as condições de trabalho e minimiza a possibilidade de erros durante a execução do processo. Foi exatamente o que observamos neste aspecto de qualidade.

Outro ponto a ser observado nos resultados da terceira etapa refere-se à qualificação necessária para realizar as montagens. Dentro da população que realizou a Etapa 3, 10 dos 61 participantes, cerca de 16%, não conhecem desenho técnico e nem possuem experiência prévia com montagens ou trabalho em indústria, mesmo assim, foram capazes de montar com eficiência.

O que reforça a ideia de que a clareza trazida pelos hologramas da realidade aumentada contribui em muito com a redução de necessidade de treinamento e qualificação dos operadores que realizam as tarefas que estão sendo projetadas.

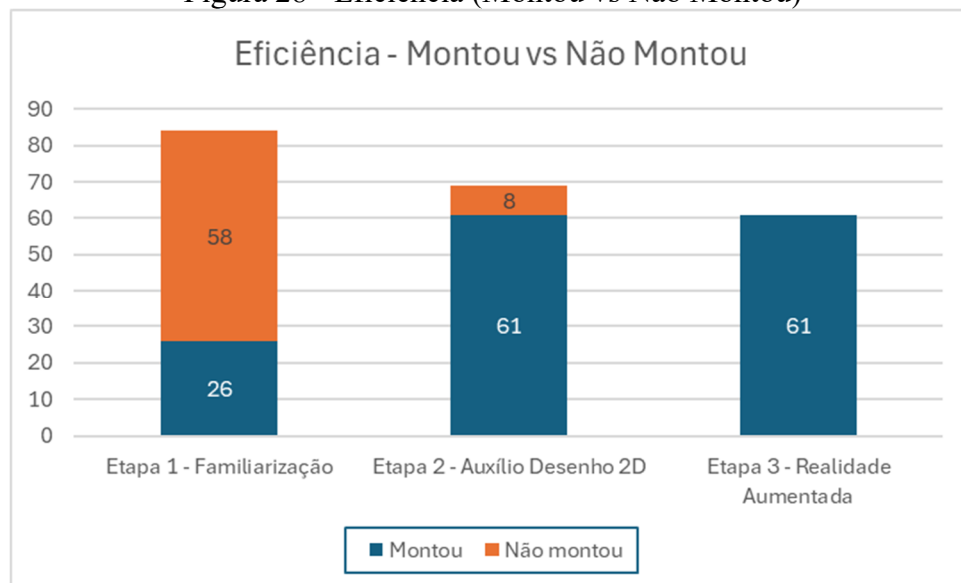
Este resultado está especialmente alinhado com o que VORRABER et al. (2020) afirma. As aplicações em realidade aumentada são capazes de reduzir a curva de aprendizado e diminuir a taxa de erro de novos funcionários.

WEBEL et al. (2013) também confirma o resultado encontrado neste trabalho quando afirma que a realidade aumentada também pode ser utilizada para melhorar os indicadores de custo de não-qualidade na produção, pois os recursos visuais trazidos pelas instruções em

realidade aumentada, permitem aos trabalhadores, em especial novos empregados, a aprender mais rápido, cometendo menos erros, consequentemente, reduzindo os custos de produção.

Na Figura 28 é apresentado os resultados comparativos entre as etapas 1, 2 e 3 no que se refere ao critério de eficiência, ou seja, se quem realizou o experimento conseguiu, ou não montar os blocos.

Figura 28 - Eficiência (Montou vs Não Montou)



Fonte: Produção do próprio autor

Por fim, vale ressaltar que as instruções de trabalho trazem benefícios como foi demonstrado nas análises deste segundo critério. Da Etapa 1 para a Etapa 2 houve uma melhora na taxa de sucesso de montagem, saltando de 31% (26) para 88% (61). A evolução também foi observada da Etapa 2 para a Etapa 3, apontando um crescimento de 88% para 100% (61) da taxa de sucesso na Etapa 3.

A melhora, de 31% (etapa 1) para 88% (etapa 2) e 100% (etapa 3), nos mostra mais uma vez que GUO et al. (2024) estava correto ao afirmar que através das instruções de trabalho é possível obter um sistema de manufatura que maximiza a produtividade e eficiência, enquanto reduz custos e minimiza os erros.

Também podemos constatar que o resultado está dentro do que era esperado, as instruções de trabalho são sim necessárias para um sistema de produção eficiente. Especialmente alinhado com o que diz BESHARAT-FOUMANI (2019). O autor afirma que as instruções de trabalho são um meio necessário entre as etapas de projeto e produção. Através delas podemos especificar a sequência ótima de execução do processo, permitindo então a montagem da maneira mais eficiente e econômica possível.

O último objetivo que este trabalho se propôs a alcançar está expresso no Quadro 2, foi traçar um comparativo das vantagens e desvantagens de se utilizar realidade aumentada para a construção de instruções de trabalho.

Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens ao utilizar Realidade Aumentada

CRITÉRIO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
INVESTIMENTO (RECORRENTE)		X
TEMPO DE MONTAGEM	X	
MÃO DE OBRA QUALIFICADA	X	
RISCO DE OBSOLESCÊNCIA		X
TEMPO PARA ELABORAÇÃO DA INSTRUÇÃO		X
RISCO DE NÃO CONFORMIDADE GERADA	X	
QUALIDADE DA INFORMAÇÃO	X	
EFICIÊNCIA NA MONTAGEM	X	

Fonte: Produção do próprio autor.

Como desvantagens, se observa o investimento (recorrente) para se construir as instruções em RA. Pois pode ser necessário obter licenças de softwares específicos para criar as projeções em RA. Além de que será necessário manter as licenças de softwares de elaboração do modelo 3D, pois os modelos são matéria-prima para a construção das instruções em RA.

Além disso, como a tecnologia está evoluindo muito rapidamente nos últimos anos, se pode colocar como desvantagem o risco de obsolescência. O que hoje seria o melhor hardware ou software para o design ou execução das projeções em RA, em um futuro próximo, muito provavelmente, não serão mais as referências de mercado.

Apesar destas desvantagens, BLAGA e TAMAS (2018) afirma que as indústrias de vários setores vêm adotando tecnologias imersivas, como realidade aumentada e virtual devido a uma significativa melhora nos algoritmos dos softwares e redução nos custos dos equipamentos de RA e RV.

Também, pontua-se como desvantagem o tempo para elaboração da instrução em RA. Pela experiência deste trabalho, enquanto para gerar a instrução no desenho 2D consumiu cerca de 1 hora, para gerar a instrução em RA são necessárias cerca de 10 horas.

Por fim, como vantagem, é possível citar alguns dos critérios já analisados nesta seção, como o tempo de montagem, a possibilidade de realizar a atividade com operadores menos qualificados, o menor risco de não conformidade, a qualidade nos detalhes da informação daquilo que está sendo montado e a eficiência na montagem.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, pode-se afirmar que para as condições deste trabalho, montagem em bancada de baixo ciclo, as instruções de trabalho em realidade aumentada são capazes de entregar um menor ciclo de montagem, maior qualidade, maior eficiência de montagem e exige menor qualificação dos operadores para realizar as atividades. Grande parte deste resultado tem relação com a clareza de informação que os elementos gráficos projetados trazem para o processo.

Conclui-se que os procedimentos escritos em realidade aumentada trazem mais vantagens do que desvantagens, porém as desvantagens que se apresentam ainda representam uma dificuldade para que esta tecnologia possa ser popularizada e utilizada em maior escala nas indústrias. Espera-se que com a evolução da tecnologia essas barreiras sejam removidas e a realidade aumentada possa ser propagada, contribuindo para a melhoria da produtividade nas indústrias.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. A. O. **Realidade aumentada**: o que é, qual a importância e o que vem por aí? []: UX Collective, [2020]. Disponível em: <https://brasil.uxdesign.cc/realidade-aumentada-o-que-%C3%A9-qual-a-import%C3%A2ncia-e-o-que-vem-por-a%C3%AD-92ac0a1ba93c>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- ARRINGTON, C. M.; LOGAN, G. D. The cost of a voluntary task switch. **Psychological Science**, Thousand Oaks, v. 15, n. 9, p. 610-615, 2004. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1111/j.0956-7976.2004.00728.x>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- AMEER, M.; DAHANE, M. From automation toward integration of process planning: a state-of-the-art review. **IFAC-PapersOnLine**, Laxenburg, v. 55, n. 10, p. 3220-3225, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322021590>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- AZUMA, R. *et al.* Recent advances in augmented reality. **IEEE Computer Graphics and Applications**, Los Alamitos, v. 21, n. 6, p. 34-47, 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/963459>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BERTOLINI, M. *et al.* Maturity models in industrial internet: a review. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 39, p. 1854-1863, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920303176?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BLAGA, A. *et al.* Augmented reality integration into MES for connected workers. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 68, p. 102057, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584520302684?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BLAGA, A.; TAMAS, L. Augmented reality for digital manufacturing. *In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION*, 26., 2018, Zadar. **Proceedings [...]**. Nova York: IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443028>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BRALY, A. M. *et al.* Augmented reality improves procedural work on an international space station science instrument. **Human Factors**, Thousand Oaks, v. 61, n. 6, p. 866-878, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720818824464>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- BROWN, R. **Microsoft Hololens 2**. [S.I.]: VRCOMPARE, [2024]. Disponível em: <https://vrcompare.com/headset/microsofthololens2>. Acesso em: 10 out. 2024.
- CARDOSO, M. O. **Indústria 4.0**: a quarta revolução industrial. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17086/1/CT_CE-AUT_2015_08.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

CARDOSO, M. T. **Revolução Industrial: o debate histórico e a teoria clássica da acumulação**. Monografia (Bacharelado em Economia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/8978/1/MTCardoso.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CERVO, A. L. *et al.* **Metodologia científica**. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall. 6. ed. 2006.

DALLE MURA, M.; DINI, G. Augmented reality in assembly systems: state of the art and future perspectives. *In: SMART TECHNOLOGIES FOR PRECISION ASSEMBLY: IFIP WG 5.5 INTERNATIONAL PRECISION ASSEMBLY SEMINAR, 9., 2020, Virtual Event, Proceedings [...]*. Heidelberg: Springer International Publishing, 2021. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72632-4_1. Acesso em: 20 nov. 2024.

DARGAN, S. *et al.* Augmented reality: a comprehensive review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, Barcelona, v. 30, n. 2, p. 1057-1080, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-022-09831-7>. Acesso em: 20 nov. 2024.

EADICICCO, L. **Microsoft's most insane invention in years is coming out in march**. New York City: Time Magazine, [2016]. Disponível em: <https://time.com/4240446/microsoft-hololens-release-date-2016/>. Acesso em: 28 set. 2024.

ELO7. **Encaixe se for capaz em madeira desafio brinquedo educativo**. São Paulo: Elo7 Serviços de Informática Ltda, [2024]. Disponível em: https://www.elo7.com.br/encaixe-se-for-capaz-em-madeira-desafio-brinquedo-educativo/dp/178B338?nav=vip_pd_vpg_1_1. Acesso em: 20 nov. 2024.

ERICSSON. **The 5 most impactful use cases for Industry 4.0**. Kista: Telefonaktiebolaget LM Ericsson, [2024]. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/industries/manufacturing/five-use-cases>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ESWARAN, M. *et al.* Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair perspective: a state of the art review on challenges and opportunities. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 213, p. 118983, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422020012?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.

EVANS, G. *et al.* Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. *In: DEGRADED ENVIRONMENTS: SENSING, PROCESSING, AND DISPLAY, 2017, Anaheim. Proceedings [...]*. Bellingham: SPIE, 2017. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10197/1/Evaluating-the-Microsoft-HoloLens-through-an-augmented-reality-assembly-application/10.1117/12.2262626.short>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FANG, W. *et al.* Head-mounted display augmented reality in manufacturing: a systematic review. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Oxford, v. 83, p. 102567, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584523000431?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FARAH JÚNIOR, M. F. A terceira revolução industrial e o novo paradigma produtivo: algumas considerações sobre o desenvolvimento industrial brasileiro nos anos 90. **Revista da FAE**, Curitiba, v. 3, n. 2, 2000. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/501>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FIORENTINO, M. *et al.* Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 270-278, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361513002340>. Acesso em: 20 nov. 2024.

FUJIMOTO, T. **The evolution of a manufacturing system at Toyota**. Oxford university press, 1999.

GONG, L. *et al.* A framework for extended reality system development in manufacturing. **IEEE Access**, Piscataway, v. 9, p. 24796-24813, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9345690>. Acesso em: 20 nov. 2024.

GUO, K. *et al.* A Deep reinforcement learning method with multiple starting nodes for dynamic process planning decision making. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 194, p. 110359, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835224004807?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HARTMAN, N. W.; ROPP, T. D. Examining the use of model-based work instructions in the aviation maintenance environment. *In: PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT FOR SOCIETY: IFIP WG 5.1 INTERNATIONAL CONFERENCE*, 10., 2013, Nantes, **Proceedings [...]**. Heidelberg: Springer International Publishing, 2013. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-41501-2_9. Acesso em: 20 nov. 2024.

HOBBSAWM, E. **A era das revoluções: 1789-1848**. 24. ed. São Paulo, SP: Editora Paz e Terra, 2009. 464 p.

HOU, L. *et al.* Using animated augmented reality to cognitively guide assembly. **Journal of Computing in Civil Engineering**, New York, v. 27, n. 5, p. 439-451, 2013. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CP.1943-5487.0000184>. Acesso em: 20 nov. 2024.

HU, Q. *et al.* Evaluating the impact of IT investments on productivity: a causal analysis at industry level. **International journal of information management**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 39-53, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401204001082?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ILCHENKO, M. *et al.* World trends of modern information and telecommunication technologies development. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES AND RADIO ELECTRONICS*, 2019,

Odessa. **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9165461>. Acesso em: 20 nov. 2024.

JONES, S.; DAWKINS, S. The Sensorama revisited: evaluating the application of multi-sensory input on the sense of presence in 360-degree immersive film in virtual reality. *In: AUGMENTED REALITY AND VIRTUAL REALITY: EMPOWERING HUMAN, PLACE AND BUSINESS*, 2017, Manchester. **Proceedings [...]**. Heidelberg: Springer International Publishing, 2018. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-64027-3_13. Acesso em: 20 nov. 2024.

KURDVE, M. Digital assembly instruction system design with green lean perspective-case study from building module industry. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 72, p. 762-767, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118302750>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LEKA, S. *et al.* Effects of a cognitive ergonomics workplace intervention (CogErg) on work functioning, well-being, and productivity: study protocol for a randomized controlled trial. **BMC Psychology**, Berlin, v. 7, n. 35, 2019. Disponível em: <https://bmcp psychology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40359-019-0349-1>. Acesso em: 20 nov. 2024.

LYLES, T. **PSVR 2 specs**: how it stacks up against the original PSVR, Oculus Quest 2, and valve index. []: Blog IGN, [2022]. Disponível em: <https://www.ign.com/articles/psvr2-vs-oculus-quest-2-valve-index-comparison-specs>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MASA, A. P. **Sensorama**. []: Blog Tecnologia Obsoleta, [2009]. Disponível em: <https://alpoma.net/tecob/?p=1141>. Acesso em: 20 nov. 2024.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. 260 p.

MOMPEU, G. *et al.* Methodology for augmented reality-based adaptive assistance in industry. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 154, p. 104021, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523001719>. Acesso em: 05 dez. 2024.

MOURA, C. R.; NUNES, C. C. Padronização de processo na linha de montagem de uma empresa multinacional: um estudo de caso. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, v. 14, n. 2, 2019. Disponível em: <https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/2263>. Acesso em: 05 dez. 2024.

MOURTZIS, D. *et al.* Augmented reality visualization of production scheduling and monitoring. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 88, p. 151-156, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120303425?via%3Dihub>. Acesso em: 05 dez. 2024.

MUÑOZ-SAAVEDRA, L. *et al.* Augmented and virtual reality evolution and future tendency. **Applied sciences**, Basel, v. 10, n. 1, p. 322, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/322>. Acesso em: 05 dez. 2024.

- NAKAMURA, T. *et al.* Calibration-free projector-camera system for spatial augmented reality on planar surfaces. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION*, 21., 2012, Tsukuba. **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6460078>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- NEUMANN, U.; MAJOROS, A. Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance. *In: VIRTUAL REALITY ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, 1998, Atlanta. **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 1998. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/658416>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- NIJHOLT, A. Humorous and playful social interactions in augmented reality. *In: ABELLA, R. M. R. (coord). Contribuciones a la lingüística ya la comunicación social: tributo a Vitelio Ruiz Hernández*, Santiago de Cuba: Centro de Lingüística Aplicada, 2021. p. 167-173.
- NISHIHARA, A.; OKAMOTO, J. Object recognition in assembly assisted by augmented reality system. *In: SAI INTELLIGENT SYSTEMS CONFERENCE (INTELLISYS)*, 2015, London. **Proceedings [...]**. New York: IEEE, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7361172>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- OLIVEIRA, R. M.. Revolução industrial na Inglaterra: um novo cenário na idade moderna. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo. 7. ed. v. 1, p. 89-116, 2017. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/historia/revolucao-industrial-na-inglaterra>. Acesso em: 15 out. 2024.
- PARK, S. *et al.* Review of Microsoft HoloLens applications over the past five years. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 16, p. 7259, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7259>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- PEINADO, J.; GRAEML, A. R. **Administração da produção: Operações industriais e de serviços**. Curitiba: Unicenp, 2007. 750 p.
- PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C.. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013. 277 p.
- RAJ, S. *et al.* Augmented reality and deep learning based system for assisting assembly process. **Journal on Multimodal User Interfaces**, Heidelberg, v. 18, n. 1, p. 119-133, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12193-023-00428-3>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- RELJIĆ, V. *et al.* Augmented reality applications in industry 4.0 environment. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 12, p. 5592, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5592>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- ROCHA, B. A. B. *et al.* Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista Pensamento Jurídico**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 298-318, 2020. Disponível em: <https://ojs.unialfa.com.br/index.php/pensamentojuridico/article/view/419>. Acesso em: 20 nov. 2024.

RODRIGUES, L. E. B. *et al.* Aplicação de ferramentas de produção enxuta para melhoria de processos: estudo de caso em um curtime. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 44., 2024, Porto Alegre. **Anais [...]**. São José dos Campos: ABEPRO, 2024. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_411_2014_46927.pdf. Acesso em: 05 dez. 2024.

RUSTICI, C. **A brief history of augmented reality**. [S.I.]: **Direct Industry E-Magazine**, [2020]. Disponível em: <https://emag.directindustry.com/2020/06/15/a-brief-history-of-augmented-reality/>. Acesso em: 09 nov. 2024.

SAFI, M. *et al.* Review of augmented reality in aerospace industry. **Aircraft engineering and aerospace technology**, Leeds, v. 91, n. 9, p. 1187-1194, 2019. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/aeat-09-2018-0241/full/html>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SANTOS, L. S.; ARAUJO, R.B. **Aula 3: a Revolução Industrial**. Aracaju: Universidade Federal do Sergipe, [2021]. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/10264518102016Historia_economica_geral_e_do_brasil_Aula_03.pdf. Acesso em: 25 mar. 2023.

SERVÁN, J. *et al.* Assembly work instruction deployment using augmented reality. **Key Engineering Materials**, Bäch, v. 502, p. 25-30, 2012. Disponível em: <https://www.scientific.net/KEM.502.25>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SIGOV, A. *et al.* Emerging enabling technologies for Industry 4.0 and beyond. **Information Systems Frontiers**, Heidelberg, v.26, p. 1585-1595, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10796-021-10213-w>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SILVA, M. C. A.; GASPARIN, J. L. A segunda revolução industrial e suas influências sobre a educação escolar brasileira. *In: SEMINÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS*, 7., 2006, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: UNICAMP, 2006. Disponível em: https://histedbrantigo.fe.unicamp.br/acer_histedbr/seminario/seminario7/. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOUZA JÚNIOR, A.; RIBEIRO, N. A inserção das tecnologias da Indústria 4.0 na atividade de auditoria governamental. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 43., 2023, Fortaleza. **Anais [...]**. São José dos Campos: ABEPRO, 2023. Disponível em: <https://abepro.org.br/publicacoes/artigo.asp?e=enegep&a=2023&c=45626>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SWELLER, J.; CHANDLER, P. A cognitive load theory approach to defining and measuring task complexity. **Educational Psychology Review**, Heidelberg, v. 35, n. 63, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10648-023-09782-w>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SZAJNA, A. *et al.* Assessment of augmented reality in manual wiring production process with use of mobile AR glasses. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 17, p. 4755, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4755>. Acesso em: 20 nov. 2024.

VORRABER, W. *et al.* Assessing augmented reality in production: remote-assisted maintenance with HoloLens. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 88, p. 139-144, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120303401>. Acesso em: 20 nov. 2024.

WEBEL, S. *et al.* An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. **Robotics and Autonomous Systems**, Amsterdam, v. 61, n. 4, p. 398-403, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889012001674?via%3Dihub>. Acesso em: 20 nov. 2024.

WHITE, J. **Microsoft at MWC Barcelona: introducing Microsoft HoloLens 2**. [S.I.]: Microsoft. [2019]. Disponível em: <https://blogs.microsoft.com/blog/2019/02/24/microsoft-at-mwc-barcelona-introducing-microsoft-hololens-2/>. Acesso em: 21 out. 2024.

XMREALITY. **AR smart glasses**. Linköping: XMReality.com, [2024]. Disponível em: <https://www.xmreality.com/ar-smart-glasses>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ZAMPIERI, D. D. L. *et al.* Desafios econômicos para implantação da construção enxuta na indústria da construção civil brasileira de plantas de energia renovável: avaliação pela abordagem Dematel. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 44., 2024, Porto Alegre. **Anais [...]**. São José dos Campos: ABEPRO, 2024. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_ST_411_2014_47367.pdf. Acesso em: 05 nov. 2024.