UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (*set-up*) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira

Maicon Roberto Ferreira

Dissertação de Mestrado do Programa de Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria (MECAI)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Maicon Roberto Ferreira

Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (*set-up*) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria.
VERSÃO REVISADA

Área de Concentração: Matemática, Estatística e Computação

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Maldonado

USP – São Carlos
Outubro de 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

F383i Ferreira, Maicon Roberto
 Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de
 métodos e ferramentas baseadas em RA como
 estratégia para diminuição do tempo de parada
 durante a configuração (set-up) de máquinas CNC e
 CMM na indústria manufatureira. / Maicon Roberto
 Ferreira; orientador José Carlos Maldonado. -- São
 Carlos, 2021.
 104 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
 em Mestrado Profissional em Matemática, Estatística
 e Computação Aplicadas à Indústria) -- Instituto de
 Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade
 de São Paulo, 2021.

 1. Indústria 4.0. 2. Realidade Aumentada. 3.
 Configuração CNC. 4. Máquinas CNC. 5. Inspeção CMM.
 I. Maldonado, José Carlos, orient. II. Título.

Maicon Roberto Ferreira

**Industry 4.0: Analysis of the viability of using AR-based
methods and tools as a strategy to decrease downtime
during the configuration (*set-up*) of CNC and CMM
machines in the manufacturing industry**

Master dissertation submitted to the Instituto de
Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-
USP, in partial fulfillment of the requirements for
the degree of the Master – Professional Masters in
Mathematics, Statistics and Computing Applied to
Industry. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Mathematics, Statistics and
Computing

Advisor: Prof. Dr. José Carlos Maldonado

**USP – São Carlos
October 2021**

*Este trabalho é dedicado a minha tão amada e saudosa mãe,
Dona Rosalina (in memoriam),
que partiu tão cedo deixando tão boas lembranças.
Ao meu pai Seu Zé,
que vem me ensinando o quão forte podemos ser.
E a minha esposa Nádia,
que me deu suporte nos momentos difíceis durante essa jornada.*

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento principal é para as pessoas que me educaram, amaram e motivaram a alcançar meus objetivos. Meus pais, D. Rosalina (*in memoriam*) e Seu Zé, e minha esposa Nádia. Muito obrigado, vocês sempre serão as pessoas mais importantes na minha vida.

Também agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos Maldonado que apesar de todas minhas falhas, nunca deixou de acreditar e de me incentivar. Sua dedicação como orientador, seu altíssimo conhecimento teórico e sua paciência foram os pilares que sustentaram meu foco e minha motivação até a conclusão deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer também a todos professores do ICMC, e em especial ao Prof. Dr. Adenilso da Silva Simão, Prof. Dr. Afonso Paiva Neto, Profa. Dra. Agma Juci Machado Traina, Prof. Dr. Alexandre Cláudio Botazzo Delbem, Prof. Dr. Antonio Castelo Filho, Prof. Dr. Francisco Louzada Neto, Prof. Dr. José Alberto Cuminato e Prof. Dr. Rodrigo Fernandes de Mello, por compartilharem uma parte de seu conhecimento e toda sua dedicação, amor à profissão, experiências e amizade.

Meus agradecimentos especiais são para todas as pessoas que conviveram comigo, pessoal e profissionalmente durante essa jornada: Wesley-Anão (meu melhor amigo), Gabriel (companheiro de labuta na UNESP), Luiza (mentora, amiga e conselheira), Juliano Passareti (meu exemplo de dedicação), João Campos (futuro companheiro de labuta na NASA).

O apoio e amizade de todos contribuíram muito para que a finalização deste trabalho fosse possível.

Muito obrigado a todos.

*“O aspecto mais triste da vida de hoje
é que a ciência ganha em conhecimento
mais rapidamente que a sociedade em sabedoria.”
(Isaac Asimov)*

RESUMO

FERREIRA, M. R. **Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (*set-up*) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira.** 2021. 104 p. Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2021.

O aumento do uso de recursos computacionais na Indústria 4.0 abriu novas perspectivas para o uso da Realidade Aumentada (RA) como uma ferramenta complementar em processos de fabricação, desenvolvimento de protótipos e processos e em treinamento técnico nas últimas décadas. Com base em pesquisa da literatura científica e tecnológica, este trabalho propõe as diretrizes a serem observadas na escolha da ferramenta e dos dispositivos de RA de acordo com o setor da indústria em que serão utilizados. Apresenta-se um estudo de caso que tem como foco a implantação da tecnologia baseada em RA para melhorar o processo produtivo em máquinas-ferramentas CNC e em máquinas CMM de inspeção, reduzindo o tempo de parada durante a configuração (*set-up*) dessas máquinas. A análise dos resultados obtidos no estudo de caso mostra que o uso da RA durante o processo de configuração (*set-up*) das máquinas CMM e CNC resultou em uma redução no tempo de inatividade e em um aumento na correlação desempenho/satisfação do usuário/operador em comparação com os processos tradicionais.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Realidade Aumentada, Configuração CNC, Máquinas CNC, inspeção CMM.

ABSTRACT

FERREIRA, M. R. **Industry 4.0: Analysis of the viability of using AR-based methods and tools as a strategy to decrease downtime during the configuration (*set-up*) of CNC and CMM machines in the manufacturing industry.** 2021. 104 p. Dissertação (Mestrado – Mestrado Profissional em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2021.

The increased use of computational resources in Industry 4.0 has opened new perspectives for the use of Augmented Reality (AR) as a complementary tool in manufacturing processes, prototypes and processes development and in technical training in the last decades. Based on research in the literature, this work proposes the guidelines to be observed when choosing the AR tool and devices according to the industry sector in which they will be used. A case study is presented that focuses on the implementation of AR-based technology to improve the production process in CNC machine tools and CMM inspection machines, reducing downtime during configuration (*set-up*) of these machines. The analysis of the results obtained in the case study shows that the use of AR during the configuration process (*set-up*) of CMM and CNC machines resulted in a reduction in downtime and an increase in the performance / user / operator satisfaction compared to traditional processes.

Keywords: Industry 4.0, Augmented Reality, *set-up* CNC, CNC machines, CMM inspection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – As revoluções industriais	28
Figura 2 – Os pilares tecnológicos da Indústria 4.0	31
Figura 3 – A fábrica inteligente da Indústria 4.0	35
Figura 4 – Exemplo de programa em código G	36
Figura 5 – Exemplos de uso de softwares CAD e CAM	37
Figura 6 – Máquina de medição por coordenada CMM	38
Figura 7 – Eixos x, y e z e probe de um CMM	39
Figura 8 – Tabela com tempos de produção e parada de máquinas CNC	41
Figura 9 – <i>Continuum</i> real-virtual de Milgram e Kishino	44
Figura 10 – Princípio de funcionamento da realidade aumentada (RA).	44
Figura 11 – Calibração da câmera a partir de pontos de interesse 3D conhecidos	45
Figura 12 – Exemplos de marcadores aceitos pela biblioteca ARToolKit	46
Figura 13 – Tabela com resumo das técnicas para desenvolvimento de RA	50
Figura 14 – Tabela com a comparação dos principais <i>frameworks</i> disponíveis para realidade aumentada	51
Figura 15 – Tecnologias para renderização de RA	53
Figura 16 – Princípio de operação de uma exibição de RA em VST	53
Figura 17 – Princípio de operação de uma exibição de RA em OST	54
Figura 18 – Tabela comparativa dos dispositivos de exibição de conteúdo de RA	56
Figura 19 – Substituição de uma lâmina de serra com uso de RA	60
Figura 20 – Treinamento orientado com RA imersiva	61
Figura 21 – Uso de RA para a montagem de uma estrutura formada por peças de encaixe	61
Figura 22 – Uso de RA na logística e <i>picking</i>	62
Figura 23 – Distribuição dos dispositivos utilizados em estudos de caso de operações de RA aplicadas à indústria	63
Figura 24 – Lista de critérios para avaliar a carga mental, com escalas de descrição e classificação.	70
Figura 25 – Lista de comparação de dois por dois de critérios para avaliar a carga mental.	71
Figura 26 – Máquinas CNC e CMM utilizadas no estudo	74
Figura 27 – Exemplo de instrução de <i>set-up</i> em papel	75
Figura 28 – Imagem vista pelo operador na tela do aplicativo e imagem do seu uso na prática	76
Figura 29 – Divisão de gênero	79
Figura 30 – Divisão etária	80

Figura 31 – Área de trabalho	80
Figura 32 – Conhecimentos da Indústria 4.0, RA e RV	81
Figura 33 – Escala Likert	82
Figura 34 – Tabela com o resumo da soma e médias do tempo de <i>set-up</i> e taxa de falha para fresadora CNC e máquina de inspeção CMM usando instruções de papel e em RA.	83
Figura 35 – Tempo de <i>set-up</i> gasto usando instruções de papel e RA.	83
Figura 36 – Taxa percentual de falha para RA e instrução em papel	84
Figura 37 – Resultados dos testes estatísticos: ANOVA	84
Figura 38 – Teste t (produtividade e eficácia do tempo)	85
Figura 39 – Resultados teste de carga mental NASA-TLX	86
Figura 40 – Resultados do <i>feedback</i> dos operadores	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
acatech	<i>Deutsche Akademie der Technikwissenschaften</i>
AIVs	<i>Autonomous Internship Vehicles</i>
APT	<i>Automatic Programmed Tool</i>
BMBF	<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>
BRIEF	<i>Binary Robust Independent Elementary Features</i>
BRISK	<i>Binary Robust Invariant Scalable Keypoints</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CG	Computação Gráfica
CLP	Controladores lógicos programáveis
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
DFKI	<i>Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz</i>
EIA	<i>Electronic Industries Association</i>
FAST	<i>Features from Accelerated Segment Test</i>
FREAK	<i>Fast Retina Keypoint</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NC	<i>Numeric Control</i>
ORB	<i>Oriented FAST and Rotated BRIEF</i>
RA	Realidade Aumentada
RGBD	<i>Red, Green, Blue, Depth</i>
RV	Realidade Virtual
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SIFT	<i>Scale-Invariant Feature Transform</i>
SIGGRAPH	<i>Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques</i>
SURF	<i>Speeded-Up Robust Features</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação e objetivos	25
1.2	Organização da dissertação	25
2	A FÁBRICA INTELIGENTE DA INDÚSTRIA 4.0	27
2.1	A indústria 4.0: conceito e origem	28
2.1.1	<i>Definição de Indústria 4.0</i>	<i>30</i>
2.1.2	<i>Os pilares tecnológicos digitais da Indústria 4.0</i>	<i>32</i>
2.2	A fábrica inteligente do futuro	33
2.2.1	<i>A tecnologia CNC na fábrica inteligente da Indústria 4.0</i>	<i>35</i>
2.2.2	<i>A tecnologia CMM nos processos de inspeção da Indústria 4.0</i>	<i>38</i>
2.2.3	<i>Os processos de configuração (set-up) de máquinas CNC e CMM</i>	<i>40</i>
2.3	Considerações finais	42
3	REALIDADE AUMENTADA	43
3.1	Princípios operacionais da realidade aumentada (RA)	44
3.2	Estimativa da pose da câmera	45
3.3	Algoritmos de monitoramento	46
3.3.1	<i>Monitoramento baseado em um marcador</i>	<i>46</i>
3.3.2	<i>Monitoramento baseado em uma imagem de referência ou marcador natural</i>	<i>48</i>
3.3.3	<i>Monitoramento baseado em um modelo 3D</i>	<i>49</i>
3.4	Estruturas existentes	50
3.5	Os dispositivos de renderização	52
3.5.1	<i>Video-See-Through (VST)</i>	<i>53</i>
3.5.2	<i>Optical-See-Through (OST)</i>	<i>54</i>
3.5.3	<i>Vantagens e desvantagens dos diferentes dispositivos de renderização</i>	<i>55</i>
3.6	Considerações finais	57
4	A REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA 4.0	59
4.1	Categorias de uso da RA na Indústria 4.0	59
4.1.1	<i>Manutenção industrial com RA</i>	<i>59</i>
4.1.2	<i>Treinamento com RA no contexto industrial</i>	<i>60</i>
4.1.3	<i>Montagem industrial com uso de RA</i>	<i>61</i>

4.1.4	<i>O uso da RA para logística industrial</i>	62
4.2	Escolha do dispositivo de RA para cada categoria	62
4.2.1	<i>Manutenção industrial</i>	64
4.2.2	<i>Montagem industrial</i>	64
4.2.3	<i>Treinamento industrial</i>	64
4.2.4	<i>Logística e picking industrial</i>	65
4.3	Considerações finais	65
5	METODOLOGIA E DESIGN DO ESTUDO	67
5.1	Reafirmação do objetivo da pesquisa e do estudo	67
5.2	Metodologia, critérios e ferramentas para análise do estudo	68
5.2.1	<i>Ferramentas estatísticas de análise</i>	69
5.2.1.1	<i>ANOVA ou análise de variância</i>	69
5.2.1.2	<i>O questionário de carga mental NASA-TLX</i>	70
5.2.2	<i>Questionário de escala Likert</i>	71
5.3	População e Amostragem	72
5.4	Primeira parte do estudo de caso	72
5.4.1	<i>Procedimentos de coleta de dados, pressupostos e limitações</i>	73
5.5	Segunda parte do estudo de caso	73
5.6	Considerações finais	77
6	RESULTADOS	79
6.1	Resultados da primeira parte do estudo de caso	79
6.1.1	<i>Dados demográficos</i>	79
6.1.2	<i>Dados de conhecimento sobre Indústria 4.0 e RA</i>	81
6.1.3	<i>Dados da escala Likert</i>	81
6.2	Resultados da segunda parte do estudo de caso	82
6.2.1	<i>Resultados do teste de carga mental NASA-TLX</i>	86
6.2.2	<i>Resultados do feedback dos operadores</i>	86
6.3	Considerações finais	87
7	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A	CARTA-CONVITE PARA PARTICIPAÇÃO DA PESQUISA	97
APÊNDICE B	TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO PARA O ESTUDO	99

APÊNDICE C	QUESTIONÁRIO DE PESQUISA	101
------------	------------------------------------	-----

INTRODUÇÃO

As tecnologias digitais e conectadas se desenvolveram rápida e amplamente principalmente a partir dos anos 2000. Os recentes avanços tecnológicos em comunicação sem fio, tecnologia da informação e robótica, deram início a uma nova era industrial que vem mudando a maneira de fazer negócios das empresas de manufatura em todo o mundo.

Segundo Klaus M. Schwab ([SCHWAB; MIRANDA, 2019](#)) esta é a 4^a revolução industrial, que ao contrário das anteriores não resultou de uma ruptura tecnológica, mas sim, do uso de novas tecnologias para interconectar e sincronizar as diferentes etapas durante a produção.

Esta nova era industrial, é caracterizada pelo uso de novas tecnologias digitais como a análise de dados massivos (*Big Data*), a Internet das Coisas (*Internet of Things* (IoT)), a Biologia Sintética (projetar microrganismos e sistemas vivos, como agentes de transformações em escala industrial de matérias-primas), os Sistemas Ciberfísicos (*Cyber-Physical System* (CPS)), a Manufatura Aditiva (impressão 3D), a Realidade Aumentada (RA) e a Realidade Virtual (RV). As empresas de manufatura que integram essas tecnologias digitais em todas as suas operações, como produção, suprimento, logística, *marketing* e gerenciamento, são as fábricas inteligentes da Indústria do futuro: A Indústria 4.0 ([CHEN et al., 2018](#)).

Essas fábricas inteligentes caracterizam-se pelo uso dessas ferramentas digitais, de robôs inteligentes e colaborativos, de impressoras 3D para prototipar ou personalizar projetos, protótipos ou toda uma produção, de máquinas-ferramentas de controle numérico computadorizado (*Computer Numeric Control* (CNC)) e de máquinas de inspeção por medição de coordenadas (*Coordinate Measuring Machine* (CMM)) que são interconectadas e permitem o compartilhamento de informações tornando as linhas de produção reconfiguráveis para se adaptar à demanda, e saber o que lhes será pedido e, finalmente, ferramentas de RA e RV para treinar e auxiliar os funcionários em suas tarefas e missões ([Cazzolla et al., 2019](#)).

As máquinas-ferramentas CNC são amplamente usadas no controle digital dos movimentos e operações durante a usinagem de peças e as máquinas de inspeção CMM são usadas

para inspecionar as peças através das medições das geometrias das entidades ou *features* da peça detectando pontos discretos em sua superfície.

Empresas fabricantes de máquinas CNC e CMM e empresas desenvolvedoras de softwares de comando, como por exemplo *Heidenhain*, *Siemens*, *Fagor*, *Mitsubishi*, *Fanuc*, *Renishaw*, *CIMCO Edite Metrology*, têm investido em pesquisas e tem desenvolvido melhorias na ergonomia e na interface de suas máquinas (MARTINOV; LJUBINOV; MARTINOVA, 2013). Porém, embora tenham melhorado muito a precisão nos processos de fabricação e inspeção, essas máquinas ainda enfrentam vários desafios relacionados à sua eficiência operacional e sua configuração (*set-up*) que costuma ser uma tarefa demorada e na maioria dos casos, sujeita a erros do operador que podem resultar em colisões (CARICATO *et al.*, 2014). O custo de tais erros pode ser prejudicial para qualquer empresa de manufatura.

O surgimento dessas novas fábricas inteligentes da Indústria 4.0 proporcionou um avanço incontestável e ao mesmo tempo irreversível nas instituições governamentais, militares e de ensino, reduzindo drasticamente os custos do desenvolvimento e implantação de novos produtos e processos e substituindo ou auxiliando os métodos tradicionais de ensino e treinamento em todas as áreas onde têm sido aplicadas (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006).

Em síntese, quando objetos virtuais são inseridos em ambientes reais, tem-se a RA, que utiliza um registro de informações ou imagens virtuais permitindo ao usuário ver e interagir com esses elementos tridimensionais inseridos no ambiente físico através de um dispositivo de captura de imagens (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011).

A RA está sendo amplamente integrada em máquinas CNC e CMM para melhorar a eficiência operacional, simplificando a tarefa realizada pelos operadores que as manipulam.

No entanto, muitos projetos se referem a provas de conceito e muitas questões ainda surgem:

- No nível técnico:
 - quais tipos de dispositivo de renderização usar?
 - qual software ou aplicativo escolher?
 - existem restrições para sua implementação?
 - o treinamento necessário para o operador exigirá muitos recursos e tempo?
- Em termos de *feedback*:
 - analisar a eficácia do uso da RA em máquinas CNC e CMM e verificar se há uma redução no tempo de inatividade durante sua configuração e no número de falhas (erros que podem gerar uma colisão durante o processo) decorrentes de sua utilização
 - determinar a eficácia da RA na melhoria do desempenho e satisfação dos operadores encarregados de manusear as máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira.

1.1 Motivação e objetivos

As empresas mundiais tem investido grande parte de seus recursos no desenvolvimento de novas ferramentas para aumentar sua competitividade perante os novos concorrentes do mundo pós globalização. Vivenciamos uma remodelagem de toda a cadeia produtiva através da reestruturação dos *layouts* das fábricas e do fluxo de peças no chão de fábrica (SCHWAB; MIRANDA, 2019) (RIFKIN; SILVA; ROSA, 2000).

Dado o cenário, este trabalho enfoca o uso da RA no contexto da indústria do futuro e, mais especificamente, o seu uso na indústria manufatureira, no setor de produção de peças e serviços em maquinário CNC e nos processos de inspeção de qualidade com uso de máquinas de inspeção por coordenada CMM. Primeiramente é preciso tornar essa tecnologia acessível ao maior número de pessoas e indústrias possíveis. É por isso que é necessário definir as diretrizes que cada empresa e cada setor deve seguir para facilitar a escolha correta das ferramentas a utilizar em cada situação.

O foco maior desse estudo é analisar os resultados obtidos em estudo de caso para avaliar o nível de entendimento e envolvimento dos operadores/usuários que trabalham direta ou indiretamente com RA e comparar a realização de uma operação de *set-up* tradicional (com as informações em papel) com a realização da mesma operação utilizando o aplicativo de RA *e-Drawings*¹ (versão gratuita para Android) e assim, determinar a relevância (redução no tempo e no número de falhas que podem resultar em colisões) do uso das tecnologias de RA nos processos de configuração (*set-up*) de máquinas CNC e de inspeção com máquinas CMM.

Para tal, é necessário realizar uma pesquisa aprofundada da fábrica inteligente na Indústria 4.0 e das aplicações da tecnologia de RA em seus setores diversos a fim de estabelecer as diretrizes concernentes a cada setor para sua implantação e entender as necessidades e restrições concernentes ao uso da RA de cada setor da indústria manufatureira possibilitando definir quais os melhores aplicativos e dispositivos de renderização para cada setor dado o contexto industrial em que será utilizado e em seguida, avaliar a eficácia dessa tecnologia.

Portanto, será feita uma análise nos métodos de avaliação de uso e um estudo da contribuição da RA nos processos produtivos da Indústria 4.0 para identificar se os resultados obtidos em empresas que já utilizam essas tecnologias baseadas em RA são positivos quando analisada a correlação satisfação/desempenho do operador.

1.2 Organização da dissertação

O Capítulo 2, apresentará a Indústria 4.0, seus princípios operacionais e pilares tecnológicos e sua definição na literatura. Também serão abordadas as tecnologias de produção em

¹ <https://www.edrawingsviewer.com/view-cad-files-arvr>

máquinas-ferramentas CNC e em máquinas de inspeção por coordenadas CMM, bem como as tarefas envolvidas nos processos de configuração (*set-up*) dessas máquinas.

Em seguida o Capítulo 3 apresentará a RA, sua definição, seus princípios operacionais, algoritmos e dispositivos associados.

O Capítulo 4, tratará do uso da RA em um contexto industrial. Isso permitirá extrair os tipos de dispositivos a serem usados, dependendo dos casos de uso: desenvolvimento, manufatura, inspeção de qualidade, manutenção, montagem, treinamento, logística, etc.

O Capítulo 5 apresentará a metodologia e os objetivos do estudo de caso realizado.

No Capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso.

E finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas a conclusão final, a contribuição deste trabalho e uma proposta para trabalhos futuros.

A FÁBRICA INTELIGENTE DA INDÚSTRIA

4.0

O uso do primeiro tear em 1784 transformou o ambiente industrial utilizando a força da água e do vapor como energia mecânica o que originou a 1ª revolução industrial. A 2ª revolução começou em 1870 com o advento do conceito de linhas de produção em massa através da eletricidade, padronização e permutabilidade. Já em 1969, a 3ª revolução caracterizou-se pelo uso dos computadores, eletrônicos e a utilização dos Controladores lógicos programáveis (CLP) nas fábricas resultando na modernização industrial através da automação das operações de produção ([BRITANNICA, 2020](#)).

Desde o início dos anos 2000, o advento da Internet vem desenvolvendo e sofisticando ainda mais o ambiente industrial através do conceito de interconectividade digital, permitindo que os dispositivos e máquinas-ferramentas do chão de fábrica se conectassem criando o conceito dos chamados Sistemas Ciberfísicos (CPS) e abrindo assim novas perspectivas e proporcionando visibilidade em todas as etapas da linha de produção e nas máquinas, possibilitando a manutenção preventiva e diminuindo assim os tempos de parada ([SCHWAB; MIRANDA, 2019](#)).

Essas novas tecnologias e dispositivos geram, processam e entregam os dados de valor agregado em tempo real. Esses dados formam verdadeiros mares de informações que devem ser analisados e explorados para gerenciamento. Atualmente bilhões de sensores estão integrados a fluxos de recursos, redes de transporte e de energia, cadeias de logística, máquinas e equipamentos de produção, escritórios, residências e em veículos, monitorando constantemente suas condições e desempenho ([SCHWAB; MIRANDA, 2019](#)). Até 2030, estima-se que mais de 100 trilhões de sensores conectarão os seres humanos em uma rede inteligente global.

Portanto, estamos vivenciando uma nova revolução industrial na qual essas novas tecnologias iniciaram um modelo de economia que vem gerando oportunidades econômicas sem precedentes, milhões de novos empregos, e um novo conceito de fábrica inteligente que é en-

gajada em baixas emissões de carbono ajudando a reduzir as mudanças climáticas. Segundo Schwab (SCHWAB; MIRANDA, 2019), todas as mudanças geradas pela conectividade entre os objetos e a análise dos dados gerados pela sociedade como um todo, e particularmente pelos setores da indústria associados a métodos de gestão, trabalho e modelos de negócios, é o que define a 4ª revolução industrial (Figura 1).

Figura 1 – As revoluções industriais

Fonte – (INDÚSTRIA, 2019)

2.1 A indústria 4.0: conceito e origem

Além de ser uma consequência natural da digitalização e das novas tecnologias, a introdução do conceito de Indústria 4.0 está também relacionada ao fato de que muitos governos e empresas notaram que as possibilidades para aumentar os lucros na produção industrial estão se esgotando e novas possibilidades precisam ser encontradas. Notadamente, os custos de produção foram consideravelmente reduzidos com a introdução da produção *just-in-time*, adotando os conceitos *Kaizen*, *5S*, de *Lean Manufactory* (SAKAKIBARA *et al.*, 1997) e, principalmente, terceirizando a produção para países com custos de tarifação e mão-de-obra mais baratos.

Quando se trata dos custos decrescentes da produção industrial, a Indústria 4.0 é uma solução promissora que pode resultar em:

- diminuição de 10 a 30% nos custos de produção,
- diminuição de 10 a 30% nos custos logísticos, e

- diminuição de 10 a 20% nos custos de gerenciamento de qualidade.

Portanto, na feira de Hannover de 2006 o governo alemão apresentou sua “Estratégia de alta tecnologia” explicando como pretendia impulsionar a inovação, que não era apenas uma questão de inovação tecnológica, mas também sobre inovação social com a sociedade em geral colocada no centro, como a Sociedade 5.0 do Japão.

"A economia está à beira da 4ª revolução industrial. Impulsionado pela Internet, o mundo real e virtual continua a convergir para uma Internet das Coisas" (BUNDESREGIERUNG, 2014).

É aqui que a Indústria 4.0 foi mencionada pela primeira vez em um relacionamento claro e direto com o advento de uma 4ª revolução industrial. O documento descreveu as características da produção industrial do futuro da seguinte forma:

- Um alto grau de individualização (personalização) de produtos com uma produção altamente flexível;
- A inclusão e o envolvimento de clientes e parceiros de negócios nos processos de design e criação de valor, e
- A conexão entre a produção e serviços de alta qualidade que levariam aos chamados produtos híbridos.

O governo alemão expressou sua intenção de apoiar as comunidades de negócios, de ciência e pesquisa a fim de desenvolverem e implementarem a Indústria 4.0, focando na segurança do trabalho e no impacto nos empregos, bem como nas prioridades digitais de serviços, análise de dados massivos, computação em nuvem, redes digitais inteligentes, ciência e educação digitais.

Dessa forma, cinco anos depois, em 2011, o Dr. Kagermann da Academia Alemã de Ciência e Engenharia (*Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech)*), o Dr. Wolfgang Wahlster, do Centro Alemão de Pesquisa em Inteligência Artificial (*Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI)*) e o Dr. Wolf-Dieter Lukas, do Ministério Federal de Pesquisa e Educação (*Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*) apresentaram os resultados de seu trabalho sobre a Indústria 4.0 (WAHLSTER, 2011). A ideia principal foi de explorar os potenciais de novas tecnologias e conceitos como:

- Disponibilizar o uso da Internet e da Internet das coisas;
- Integrar os processos técnicos e os negócios nas empresas;
- Fazer um mapeamento digital e uma virtualização do mundo real, e

- Inserir as “fábricas inteligentes”, incluindo “meios inteligentes” de produção industrial e “produtos inteligentes”.

A partir de então o termo Indústria 4.0 se tornou amplamente conhecido.

2.1.1 Definição de Indústria 4.0

O tema Indústria 4.0 tem aumentado consideravelmente na literatura acadêmica e como em qualquer outro assunto, os pesquisadores têm percepções diferentes quanto à sua definição.

Além disso, as muitas contribuições de centros de pesquisa, empresas e universidades tornam o termo “Indústria 4.0” ainda mais confuso, e mesmo os principais promotores da ideia apenas descrevem a visão, a tecnologia básica e cenários selecionados, mas não fornecem uma definição clara. Algumas definições para a Indústria 4.0 encontradas na literatura acadêmica são:

- A Indústria 4.0 utiliza o poder da tecnologia de comunicações e invenções inovadoras para impulsionar o desenvolvimento da indústria de transformação ([KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013](#)).
- O setor 4.0 é cercado por uma enorme rede de tecnologias avançadas em toda a cadeia de valor e serviços. A automação, a robótica de inteligência artificial, a IoT e a manufatura aditiva estão trazendo uma nova era de processos de fabricação. Os limites entre o mundo real e a realidade virtual estão ficando mais desfocados e causando um fenômeno conhecido como sistemas de produção cyber físicos ([SCHUMACHER; EROL; SIHN, 2016](#)).
- Indústria 4.0 refere-se à 4ª revolução industrial. As tecnologias da indústria 4.0 têm o potencial de criar extraordinárias oportunidades de crescimento e vantagens competitivas. Os especialistas preveem que as empresas poderão aumentar sua produtividade em cerca de 30% usando a Indústria 4.0 ([VOICE, 2019](#)).
- A Indústria 4.0 é um dos conceitos mais importantes no desenvolvimento da indústria global e na economia mundial, e caracteriza-se pelo uso das novas tecnologias digitais interconectando os mundos físico, digital e biológico. A melhoria das tecnologias está trazendo significativos efeitos nas indústrias, economias e planos de desenvolvimento dos governos ([SCHWAB; MIRANDA, 2019](#)).
- A Indústria 4.0 faz pleno uso de tecnologias emergentes e rápido desenvolvimento de máquinas e ferramentas para lidar com os desafios globais, a fim de melhorar os níveis da indústria. O principal conceito do setor 4.0 é utilizar a avançada tecnologia da informação para implantar serviços de IoT. A produção pode ser executada de forma mais rápida e com o mínimo tempo de inatividade, gerando um produto de melhor qualidade e sistemas de produção mais eficientes para alcançar e manter uma economia nos custos ([WANG et al., 2016](#)).

- Indústria 4.0 é um termo aplicado a um grupo de transformações rápidas no design, fabricação, operação e serviço de sistemas e produtos de fabricação. A designação 4.0 significa que esta é a 4ª revolução industrial do mundo, sucessora de três revoluções industriais anteriores que causaram saltos quânticos de produtividade e mudaram a vida das pessoas em todo o mundo (PARLIAMENT, 2015).

Cabe enfatizar que apesar de todas essas definições estarem próximas da ideia original, a Indústria 4.0 vai além da digitalização e envolve mais do que automação e troca de dados. O autor deste trabalho acrescenta que a Indústria 4.0 potencializa o uso dos pilares tecnológicos digitais (Figura 2) e dos dados gerados em todas as etapas da produção tornando o gerenciamento e as tomadas de decisão em tempo real mais dinâmicos, maximizando a conectividade homem-máquina e o envolvimento dos clientes e parceiros de negócios a fim de obter uma produção personalizada, flexível e de alta qualidade na qual a priorização de um alto nível de bem-estar e de capacitação atrai e mantém os melhores colaboradores, e o papel principal dado para a eficiência energética e para o uso consciente de recursos e materiais atrai e fideliza seus consumidores.

Figura 2 – Os pilares tecnológicos da Indústria 4.0

Fonte: Adaptada de ANTELO (2016).

2.1.2 Os pilares tecnológicos digitais da Indústria 4.0

1. Análise de dados (*Big data*)

O poder da análise de dados e do reconhecimento de padrões pode ser aproveitado nas indústrias para reduzir o tempo de inatividade e os desperdícios principalmente pela Internet Industrial das Coisas (*Industrial Internet of Things* (IIoT)), que é constituída por diversos sensores que coletam informações em tempo real de temperatura, umidade, quantidade, espessuras, entre outras durante todo o processo produtivo (WITKOWSKI, 2017).

2. Simulação

Uma simulação, atualmente, é usada para projetar componentes fabricados. Na Indústria 4.0, ele pode ser usado para simular um ambiente virtual da própria fábrica com os dados em tempo real e analisar a produtividade antes que uma alteração na fábrica possa ser feita. Isso ajuda os engenheiros a visualizar o projeto de uma maneira muito melhor, consequentemente, ajudando-os a identificar problemas e obstáculos no estágio inicial (Zúñiga; Moris; Syberfeldt, 2017).

3. Inteligência artificial

A inteligência artificial na indústria garante maior confiabilidade e regularidade na resolução de problemas e tomada de decisões, prevenindo erros e gerenciando melhor as informações da cadeia produtiva (LEE *et al.*, 2018).

4. Internet das Coisas

Um ecossistema no qual todos os sensores e atuadores com a capacidade de funcionar separadamente e se comunicar com todos os outros elementos da cadeia produtiva e que permitem o compartilhamento de informações tornando as linhas de produção reconfiguráveis para se adaptar à demanda e saber o que lhes será pedido (WITKOWSKI, 2017).

5. Robôs Autônomos

Os robôs autônomos operam com base em um algoritmo lógico complexo, o que significa que não exigem nenhum caminho predefinido para desempenhar suas funções. Por exemplo, a Tesla Motors e a Amazon abrigam veículos internos autônomos (*Autonomous Internship Vehicles* (AIVs)) para transferir materiais entre estações de trabalho com cargas de até 59 kg que são capazes de recarregar sua própria bateria sem intervenção (SCHWAB; MIRANDA, 2019).

6. Computação na nuvem (*Cloud*)

É um sistema remoto que pode ser acessado desde qualquer lugar usando a Internet que dão suporte às comunicações máquina-máquina, máquina-humano, humano-máquina e

humano-humano, caracterizando-a portanto como um dos elementos cruciais dos sistema ciberfísico (CPS) ([SONY, 2018](#)).

7. Ciber segurança

À medida que mais e mais componentes são conectados e a ação de um dispositivo se baseia na saída de outro dispositivo, mais decisões operacionais são descentralizadas, mais preocupações de segurança são levantadas. O roubo e a obliteração intencional podem ser verificados através da segurança cibernética ([LEZZI; LAZOI; CORALLO, 2018](#)).

8. Realidades Aumentada (RA) e Virtual (RV)

Os sistemas baseados em RA e RV estão invadindo a indústria de tecnologia. As instruções de reparo remoto e treinamento podem ser enviadas para qualquer parte do mundo com acessibilidade à Internet, ajudando os técnicos a aprimorar e aprender novas habilidades ([Fraga-Lamas et al., 2018](#)).

9. Manufatura aditiva (impressão 3D)

A flexibilidade e versatilidade da manufatura aditiva permite o desenvolvimento de projetos complexos aumentando a eficiência do processo e reduzindo sua complexidade, permitindo uma rápida prototipagem e processos de produção altamente descentralizados com uma economia de tempo e custos comparado aos processos de fabricação convencionais ([DILBEROGLU et al., 2017](#)).

2.2 A fábrica inteligente do futuro

O conceito de fábrica inteligente é um assunto de ampla mobilização entre os setores público e privado em muitos países, sejam ricos ou emergentes. Essa mobilização faz parte do contexto mais geral de uma conscientização da importância do setor manufatureiro para seu desenvolvimento econômico. Isso passa pela modernização da ferramenta de produção e através de uma maior disseminação de ferramentas digitais nas empresas, a serviço de uma personalização de alto nível e cada vez maior.

Existem muitas variantes para descrever a fábrica inteligente do futuro. Se pensarmos em seus propósitos, podemos afirmar que a indústria do futuro é mais ágil, flexível, menos dispendiosa e mais respeitosa com seus trabalhadores e com o meio ambiente, graças a um forte nível de automação e integração digital de toda a cadeia produtiva.

De uma maneira complementar, se analisamos seu conteúdo, podemos descrever a indústria do futuro como uma revolução tecnológica que oferece novas possibilidades na forma de produzir visando responder aos novos desafios da competitividade pós globalização ([CHEN et al., 2018](#)). Esta segunda definição está implicitamente ligada a duas vertentes:

1. Do ponto de vista tecnológico:

Apresenta a indústria do futuro como uma nova revolução industrial, que pode ser descrita como a evolução da robotização para a robotização “inteligente” que faz uso do desenvolvimento de novas tecnologias e, em particular, do progresso no domínio digital: capacidade de armazenamento, análise e processamento de dados em larga escala, desenvolvimento de redes de comunicação, modelagem e simulação digital.

Essas tecnologias são numerosas e quando as enumeramos (*Big data*, manufatura aditiva, RA, RV, etc.) pode dar a impressão de serem um conjunto de peças tecnológicas isoladas e heterogêneas, porém é vital ressaltar que o ponto principal ao abordarmos as tecnologias implementadas no âmbito da indústria do futuro, é entender e insistir na premissa e importância da ligação e articulação entre elas. Pode-se citar como exemplo que para a implementação de uma análise massiva de dados (*Big data*) eficaz, torna-se necessário o uso de tecnologias de nuvem eficientes, bem como segurança cibernética aprimorada, e esta tecnologia se torna ainda mais justificada e eficiente à medida que a IoT se desenvolve ao mesmo tempo (BüCHI; CUGNO; CASTAGNOLI, 2020).

2. Do ponto de vista da personalização em massa:

A demanda por diferenciação de produtos está se fortalecendo e atingindo níveis hoje que exigem uma flexibilidade muito alta dos processos de produção, a fim de manter os custos unitários de um produto personalizado de valor agregado comparáveis aos da produção em massa. No início do século 20, a única maneira de fabricar um automóvel que fosse acessível à classe média foi apostar em uma produção padronizada. Reconhecido historicamente pela idealização e implantação da chamada “Linha de produção em série”, Henry Ford afirmava que todos poderiam ter um Ford T da cor que desejassem, contanto que essa cor fosse preta. Hoje as possibilidades de personalização são quase infinitas.

Graças à multiplicação do número de sensores nos produtos e nas máquinas que os manipulam, cada produto passa por um tratamento específico em cada uma das etapas de fabricação, ao mesmo tempo em que possibilitam a detecção e correção das falhas em tempo real, flexibilizando e reduzindo cada vez mais os custos de fabricação (BüCHI; CUGNO; CASTAGNOLI, 2020).

O conceito de indústria do futuro formaliza um caminho que deve ser seguido a fim de superar os dois principais obstáculos da indústria mundial:

- O econômico - melhorar os processos de produção a fim de oferecer um produto personalizado a preço competitivo para resistir à concorrência internacional (SCHWAB; MIRANDA, 2019);

- O social - melhorar os métodos de produção a fim de reduzir a penúria do trabalho industrial e obter uma eficiência energética que integre a fábrica em seu ambiente (SCHWAB; MIRANDA, 2019).

Finalmente, a fábrica inteligente do futuro (Figura 3) abrange as seguintes transições simultâneas: competitividade, personalização, eficiência energética, consciência ecológica, conectividade digital, organizacional e social. É uma fábrica limpa, silenciosa e em harmonia com seu ecossistema, uma fábrica centrada no ser humano que leva em conta a expectativas dos funcionários ao longo da vida profissional atraindo os melhores talentos (RIFKIN; SILVA; ROSA, 2000).

Figura 3 – A fábrica inteligente da Indústria 4.0

Fonte – (HERRMANN, 2018)

2.2.1 A tecnologia CNC na fábrica inteligente da Indústria 4.0

A tecnologia CNC surgiu em 1947 quando a pequena empresa *Parsons Corporation* fabricante de rotores e hélices para helicópteros, desenvolveu uma técnica para realizar o controle de uma máquina de usinagem através de números, ligando-a a um microcomputador onde eram inseridas as instruções de movimentos em cartões perfurados. Visualizando o grande avanço dessa tecnologia, a força aérea americana contratou a empresa Parsons e patrocinou estudos em adaptações de máquinas-ferramenta convencionais para NC, controle numérico, e em 1953 o

Massachusetts Institute of Technology (MIT) apresentou o primeiro protótipo de uma máquina Numeric Control (NC) (MUSEUM, 2013).

As máquinas-ferramenta CNC utilizam o mesmo conceito das máquinas convencionais somado à capacidade de controlar os movimentos lineares por meio da eletrônica e da computação. O controle dos eixos da máquina é realizado simultaneamente por códigos específicos, em geral nas linguagens *Automatic Programmed Tool* (APT) muito utilizado como ferramenta auxiliar na programação de peças com geometrias complexas em máquinas com 4 e 5 eixos e na linguagem *Electronic Industries Association* (EIA)/*International Organization for Standardization* (ISO), também conhecida como código G (Figura 4) (PEASE, 1952).

Figura 4 – Exemplo de programa em código G

Block	Description	Purpose
%	Start of program.	Start Program
O0001 (PROJECT1)	Program number (Program Name).	
(T1 0.25 END MILL)	Tool description for operator.	
N1 G17 G20 G40 G49 G80 G90	Safety block to ensure machine is in safe mode.	Change Tool
N2 T1 M6	Load Tool #1.	
N3 S9200 M3	Spindle Speed 9200 RPM, On CW.	
N4 G54	Use Fixture Offset #1.	Move To Position
N5 M8	Coolant On.	
N6 G00 X-0.025 Y-0.275	Rapid above part.	
N7 G43 Z1. H1	Rapid to safe plane, use Tool Length Offset #1.	
N8 Z0.1	Rapid to feed plane.	
N9 G01 Z-0.1 F18.	Line move to cutting depth at 18 IPM.	Machine Contour
N10 G41 Y0.1 D1 F36.	CDC Left, Lead in line, Dia. Offset #1, 36 IPM.	
N11 Y2.025	Line move.	
N12 X2.025	Line move.	
N13 Y-0.025	Line move.	
N14 X-0.025	Line move.	
N15 G40 X-0.4	Turn CDC off with lead-out move.	
N16 G00 Z1.	Rapid to safe plane.	Change Tool
N17 M5	Spindle Off.	
N18 M9	Coolant Off.	
(T2 0.25 DRILL)	Tool description for operator.	Move To Position
N19 T2 M6	Load Tool #2.	
N20 S3820 M3	Spindle Speed 3820 RPM, On CW.	
N21 M8	Coolant On.	Move To Position
N22 X1. Y1.	Rapid above hole.	
N23 G43 Z1. H2	Rapid to safe plane, use Tool Length Offset 2.	
N24 Z0.25	Rapid to feed plane.	Drill Hole
N25 G98 G81 Z-0.325 R0.1 F12.	Drill hole (canned) cycle, Depth Z-.325, F12.	
N26 G80	Cancel drill cycle.	
N27 Z1.	Rapid to safe plane.	End Program
N28 M5	Spindle Off.	
N29 M9	Coolant Off.	
N30 G91 G28 Z0	Return to machine Home position in Z.	
N31 G91 G28 X0 Y0	Return to machine Home position in XY.	
N32 G90	Reset to absolute positioning mode (for safety).	
N33 M30	Reset program to beginning.	End Program
%	End Program.	

Fonte – (AUTODESK, 2018)

O *Computer Aided Design* (CAD)/*Computer Aided Manufacturing* (CAM) (Figura 5), e o desenvolvimento de sistemas baseados em Internet Industrial das Coisas (IIoT) que integram as tarefas de robôs com as máquinas-ferramentas CNC e outros equipamentos da fábrica inteligente tem reduzido drasticamente os tempos de produção aumentando os ganhos e diminuindo os erros durante os processos de fabricação.

O *Computer Aided Design* (CAD) realiza desenhos e projeções em 2D ou 3D reduzindo essas operações a fórmulas matemáticas armazenadas na memória do computador. Uma das vantagens deste método, além de maior rapidez e eficiência, é de permitir ao desenhista/projetista o estudo de vários aspectos e ângulos do objeto desenhado, rotacionando, ampliando, separando e analisando e testando por meio de simulações de temperatura, pressão, tensões mecânicas, escoamento fluido-dinâmico, etc, de cada um de seus elementos (Werner Dankwort *et al.*, 2004).

Figura 5 – Exemplos de uso de softwares CAD e CAM

Fonte – (GRABCAD, 2020) (MACHINING, 2019)

Através do *Computer Aided Manufacturing* (CAM) é possível desenvolver ou somente visualizar um elemento em 2D ou 3D e então selecionar a máquina-ferramenta CNC a utilizar para que o software gere automaticamente as operações de fabricação que serão realizadas e seu respectivo código G. O operador pode então realizar uma simulação do processo e verificar se ocorrerá alguma colisão durante o processo e definir a melhor estratégia de fabricação. As vantagens no uso do CAM são a velocidade, precisão, acurácia e confiabilidade que não podem ser igualadas por programadores manuais (Werner Dankwort *et al.*, 2004).

2.2.2 A tecnologia CMM nos processos de inspeção da Indústria 4.0

Uma máquina de medição por coordenadas CMM é utilizada para medir a geometria de objetos físicos detectando pontos discretos na superfície do objeto com um sensor (*probe*) que pode ser mecânico, óptico, laser e de luz branca. Dependendo da máquina, a posição do sensor pode ser controlada manualmente por um operador ou por um computador (VICENTE, 2000). (Figura 6).

Figura 6 – Máquina de medição por coordenada CMM

Fonte: Elaborada pelo autor.

A posição do sensor é determinada em função de uma posição de referência, conhecido como “Zero-máquina”, e do seu deslocamento a partir deste ponto em um sistema de coordenadas cartesianas tridimensional, ou seja, com eixos x , y e z . Além de mover o sensor ao longo dos eixos

muitas máquinas também permitem que o ângulo do apalpador seja controlado para permitir a medição de superfícies que de outra forma seriam inacessíveis (Figura 7).

Figura 7 – Eixos x, y z e probe de um CMM

Fonte: Adaptada de [HEXAGON \(2020\)](#).

O CMM típico do tipo “Ponte 3D” permite o movimento do sensor ao longo dos eixos x , y e z , que são ortogonais entre si em um sistema de coordenadas cartesianas tridimensional. Cada eixo possui um sensor que monitora a posição do sensor naquele eixo. Quando o sensor entra em contato (ou detecta de outra forma) uma localização particular no objeto, a máquina coleta amostras dos três sensores de posição, medindo assim a localização de um ponto na superfície do objeto, bem como o vetor tridimensional da medição realizada. Este processo é repetido conforme necessário, movendo a sonda a cada vez, para produzir uma nuvem de pontos que descreve as áreas de superfície de interesse ([VICENTE, 2000](#)).

A partir do sinal de detecção, os pontos de medição são determinados no objeto a ser medido com as posições dos eixos do dispositivo de medição por coordenadas, que serve como interface entre a máquina e a peça de trabalho.

Obter diferentes coordenadas dos pontos de uma peça não é muito útil por si só. Um CMM é, portanto, conectado a um computador com software para interpretar as coordenadas. Este tipo de software calcula as formas geométricas ideais nos pontos sondados nas superfícies

da peça a ser medida, o que permite o cálculo rápido de um defeito de tolerância geométrica (forma, localização, paralelismo, coaxialidade, planicidade, etc.).

2.2.3 Os processos de configuração (*set-up*) de máquinas CNC e CMM

Essencialmente, após o desenvolvimento do desenho em 3D e do programa em código G, o *set-up* é a primeira e principal etapa em um processo de fabricação em uma máquina-ferramenta CNC. É a etapa de preparação das máquinas CNC antes da execução da peça. No *set-up* definem-se: a ordem correta das ferramentas no trocador de ferramentas de acordo com as operações que serão realizadas; o programa G; e a forma de fixação e posição da peça na máquina. As etapas padrão a serem realizadas em um *set-up* são:

- a colocação e verificação das ferramentas no magazine ferramental;
- a definição dos diâmetros e comprimentos das ferramentas
- a instalação e alinhamento do(s) dispositivo(s) de fixação (morsas, mesas magnéticas, placas de deslocamento angular e linear, etc);
- a fixação da peça no dispositivo de fixação, definição e alinhamento do ponto de “pre-set”, e
- a definição dos pontos $x=0$, $y=0$ e $z=0$ na peça para que todos os deslocamentos da máquina ou das ferramentas sejam referenciados a partir destas coordenadas;

É importante ressaltar que a ordem e as etapas que serão realizadas no *set-up* variam de acordo com o tipo (torno vertical ou horizontal, fresadora vertical ou horizontal, torno suíço, centro de usinagem, dobradeira, prensa, máquina de corte a laser, etc) e modelo da máquina a ser preparada.

Nas máquinas de inspeção CMM o processo de *set-up* é igualmente importante e necessário. Um *set-up* bem realizado e documentado garante a repetibilidade da inspeção de uma amostragem de determinada peça de um lote, por exemplo. É no *set-up* que definem-se a posição e a localização exata da peça na mesa de mármore do CMM. As etapas padrão a serem realizadas em um *set-up* para uma máquina CMM são:

- a colocação e verificação dos sensores no cabeçote apalpador;
- a instalação e alinhamento do(s) dispositivo(s) de fixação (morsas, mesas magnéticas, placas de deslocamento angular e linear, etc);
- a fixação da peça no dispositivo de fixação conforme a posição do modelo CAD na tela do computador, e

- a definição dos planos a serem utilizados como referência para cada eixo x, y e z;

Alguns fabricantes de máquinas CNC e CMM vem desenvolvendo funcionalidades em seus produtos que visam diminuir o tempo de *set-up* e facilitar a operação de suas máquinas.

Porém, cabe ressaltar que quando se trata dos tempos de parada que estão ligados ao *set-up*, estes ainda são relativamente excessivos. Um estudo em um contexto industrial do setor ferramenteiro (Figura 8) mostrou que o tempo de parada em máquinas CNC chega a 16% comparado ao tempo efetivo de usinagem (produção) (ENESEP, 2009).

Figura 8 – Tabela com tempos de produção e parada de máquinas CNC

Fonte – (ENESEP, 2009)

2.3 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentada a evolução do ambiente industrial desde o primeiro tear até os dias atuais onde o aproveitamento de tecnologias digitais e dos dados gerados em todas as etapas da produção, tornam o gerenciamento e as tomadas de decisão em tempo real muito mais dinâmicos, maximizando dessa forma a conectividade homem-máquina e o envolvimento dos clientes e parceiros de negócios, resultando então em uma produção personalizada, flexível e de alta qualidade.

Detalhou-se também as tecnologias de produção em máquinas-ferramentas CNC e de inspeção por coordenadas em máquinas CMM, bem como as tarefas envolvidas nos processos de configuração (*set-up*).

É necessário enfatizar que mesmo sabendo-se que alguns fabricantes de máquinas CNC e CMM vem desenvolvendo funcionalidades em seus produtos que visam facilitar seu manuseio e diminuir o tempo de configuração (*set-up*), as indústrias que procuram se encaixar no modelo atual de fábrica inteligente estão modernizando toda sua cadeia produtiva e tem investido nas novas tecnologias da Indústria 4.0. Dentre os investimentos atuais da indústria manufatureira mundial, destacam-se aqueles ligados à tecnologia baseada em RA.

Portanto, o próximo capítulo irá enfatizar os princípios da tecnologia de RA, seus princípios operacionais, funcionalidade e dispositivos de visualização existentes.

REALIDADE AUMENTADA

As tecnologias para o desenvolvimento de softwares focados no contexto da Indústria 4.0 têm evoluído muito nos últimos 20 anos, e uma dessas tecnologias que merece destaque é o campo da computação responsável pela geração imagens: a Computação Gráfica (CG). Seu objetivo maior é o de tornar a interação homem-computador mais agradável através de técnicas de visualização e renderização de *pixels* de forma a melhorar nossa percepção ao visualizarmos um conjunto de informações, detalhes de ambientes ou de processos e simulações tornando o conteúdo muito mais imersivo, didático e interessante (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006).

A CG é composta de várias subáreas, entre elas a RV e a RA. Em síntese, a RV permite a modelagem de ambientes tridimensionais virtuais que simulem mundos ou eventos reais ou não onde o usuário é inserido. Por outro lado, quando objetos virtuais são inseridos em ambientes reais através de um registro de informações que permitem ao usuário ver e interagir através de um dispositivo de captura de imagens com esses elementos tridimensionais no ambiente físico, tem-se a RA (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006) (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011).

O termo Realidade Aumentada (RA) foi introduzido em 1992 por Thomas Caudell e David Mizell quando criaram um protótipo de capacete do tipo *head-up display*, que permitia conhecer a posição da cabeça no mundo real e exibir o conteúdo virtual através de um sistema ótico transparente em tempo real (Caudell; Mizell, 1992). Já em 1994, Paul Milgram e Fumio Kishino propuseram a não existência de uma fronteira clara entre o mundo real e o mundo virtual e a possibilidade de passar de um mundo para outro através de um *Continuum* que foi chamado Realidade mista (MILGRAM; KISHINO, 1994) (Figura 9).

Posteriormente em 1997, Ronald Azuma (AZUMA, 1997) oferece uma definição mais estruturada de RA que não depende da técnica utilizada e onde qualquer sistema de RA deve respeitar estas três regras: combinar o real e o virtual, ser interativo em tempo real e estar sincronizado em 3D.

Figura 9 – *Continuum* real-virtual de Milgram e Kishino

Fonte: Adaptada de [Milgram e Kishino \(1994\)](#).

Ao contrário da RV, onde o usuário está totalmente imerso em um mundo calculado digitalmente, a RA visa adicionar algum conteúdo virtual ao mundo real. O usuário, portanto, vê principalmente o mundo real. O objetivo dos objetos virtuais é fornecer informações relevantes e contextualizadas, dando um novo significado do sistema ao usuário. Obviamente, o significado dado dependerá da aplicação desejada: *marketing*, medicina, comunicação, manutenção, treinamento, lazer, esporte, educação.

A RA permite que imagens virtuais sejam sobrepostas à visão do mundo real aprimorando dessa maneira qualquer objeto do mundo real com informações avançadas obtidas de fontes digitais. Esse aprimoramento permite que o usuário obtenha informações em tempo real das fontes digitais e as aplique em situações do mundo real.

3.1 Princípios operacionais da realidade aumentada (RA)

O principal objetivo de um sistema de RA é conhecer a pose (posição e orientação) da câmera que filma a cena em relação a um objeto já conhecido da cena. Uma vez determinado, é possível adicionar qualquer tipo de “imagem aumentada” (objeto virtual), misturando assim o real e o virtual ([TORI; KIRNER; SISCOUITO, 2006](#)) ([CARMIGNIANI; FURHT, 2011](#)). O princípio de operação pode ser dividido em quatro estágios (Figura 10):

Figura 10 – Princípio de funcionamento da realidade aumentada (RA).

Fonte: Elaborada pelo autor.

1. a câmera filma a cena;
2. o objetivo é conhecer a pose da câmera, isto é, sua posição e orientação em cada imagem filmada, e assim, um objeto (marcador, imagem de referência ou modelo 3D) é reconhecido;
3. conhecendo a pose da câmera, o algoritmo usado reconhece o marcador colocado no sistema para operar e assim as “imagens aumentadas” (objetos virtuais) são adicionadas em coerência com o mundo real, e
4. a renderização é então obtida no dispositivo de exibição (PC, smartphone, tablet, óculos inteligentes).

3.2 Estimativa da pose da câmera

O objetivo da estimativa de pose é encontrar a translação e a rotação entre um objeto conhecido e a câmera. Para tal, supõe-se que a câmera está calibrada, ou seja, os parâmetros intrínsecos (distância focal e ponto principal) são conhecidos. Esse problema é resolvido determinando um fator de escala através de um objeto com dimensões conhecidas e fornecendo uma lista de correspondências entre os pontos 3D conhecidos do objeto e suas projeções 2D na tela da câmera (Figura 11).

Figura 11 – Calibração da câmera a partir de pontos de interesse 3D conhecidos

Fonte: [OpenCV \(1999\)](#).

3.3 Algoritmos de monitoramento

Através de um detalhamento dos principais algoritmos de monitoramento existentes é possível conhecer seus parâmetros levando em consideração: o tamanho dos marcadores, os tipos e número de pontos de interesse a ser detectado no modelo 3D do objeto e conhecer suas restrições e limites. Dessa maneira, a escolha do algoritmo para uso industrial será mais fácil.

Nos algoritmos de rastreamento, existem três métodos principais, dependendo das características do objeto que é conhecido no ambiente:

- com marcador;
- com imagem de referência (na literatura, esse método também é chamado “sem marcador”, no entanto, ele usa uma imagem de referência, portanto a designação “seguida de marcador natural” é geralmente mais apropriada), e
- baseado em um modelo 3D do objeto.

Portanto, tendo-se em vista que toda RA é baseada na aquisição em tempo real de imagens com uma câmera e na estimativa das características dessas imagens possibilitando a inclusão dos elementos virtuais nos locais certos independentemente do ponto de vista do usuário, um dos desafios em sistemas de RA é determinar a forma de apresentação e onde as informações e ou imagens devem ser exibidas. Para tal, a solução típica mais utilizada atualmente é o monitoramento baseado na utilização de um padrão conhecido que é desenhado previamente, chamado marcador (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006).

3.3.1 Monitoramento baseado em um marcador

O rastreamento de marcadores foi muito popularizado pela ferramenta ARToolKit, mostrado pela primeira vez em 1999 na conferência anual do *Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques* (SIGGRAPH) (Billinghamurst *et al.*, 2000). Ela utiliza um marcador chamado I_{ref} , que é uma imagem com as seguintes características (Figura 12):

Figura 12 – Exemplos de marcadores aceitos pela biblioteca ARToolKit

Fonte: Adaptada de Sementille *et al.* (2013).

- a imagem é quadrada;
- seu tamanho é conhecido na cena real;
- está em preto e branco;
- está rodeado por uma faixa preta grossa, e
- possui um identificador exclusivo no centro.

Essas restrições de formas e cores são fortes o suficiente para permitir que o marcador seja localizado em uma cena filmada. Para cada imagem da cena, chamada I_{scene} , a localização do marcador possibilita deduzir a pose da câmera (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011). Os passos do algoritmo de monitoramento baseado em marcadores são:

1. A imagem é binarizada: a transição de uma imagem colorida ou em escala de cinza para uma imagem em preto e branco é feita por limiarização;
2. Os contornos do quadrado são detectados usando a Transformada de Hough, 1962 (SHEHATA *et al.*, 2015);
3. os cantos do quadrado são identificados com o Detector de canto Harris (HARRIS; STEPHENS, 1988). As posições deste último permitem calcular a pose da câmera. Ao mesmo tempo, a parte central, sobre fundo branco, do marcador é comparada a uma base de marcadores. Isso possibilita determinar a orientação do marcador e saber qual marcador é detectado e, portanto, qual objeto virtual deve ser exibido, e
4. o objeto virtual escolhido é retornado ao visor.

As vantagens deste algoritmo são:

- a velocidade de cálculo do algoritmo de detecção visto que as operações na imagem permanecem simples (Limiarização, Transformada de Hough e Detector de cantos Harris);
- detecção de múltiplos marcadores sem forte impacto no desempenho, e
- estabilidade de detecção.

As desvantagens:

- oclusão parcial do marcador pode impedir o reconhecimento;
- o algoritmo não é muito robusto na mudança de luminosidade;
- o ambiente deve ser preparado com marcadores previamente conhecidos, e
- em um contexto industrial, os marcadores devem ser mantidos.

3.3.2 Monitoramento baseado em uma imagem de referência ou marcador natural

Para superar as restrições vinculadas aos marcadores, é necessário desenvolver novos algoritmos que permitam criar a RA sem o uso deles. O monitoramento com imagens de referência soluciona esse problema pois é baseado em imagens naturais já presentes no ambiente. Portanto, não é mais necessário preparar o ambiente com marcadores para que o sistema de RA encontre sua orientação (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011).

O registro por imagem de referência é baseado na detecção de pontos de interesse. Extrair e caracterizar pontos de interesse faz parte do tema maior de caracterizar uma imagem que pode ser:

- pelas bordas ou contornos: eles podem ser detectados usando os filtros *Sobel*, *Prewitt*, *Roberts* ou *Canny*.
- pelos cantos: eles podem ser detectados pelo Detector de cantos de Harris (HARRIS; STEPHENS, 1988), e
- por pontos de interesse: eles podem ser detectados por meio de técnicas de detecção que utilizam descritores como *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), *Speeded-Up Robust Features* (SURF), *Features from Accelerated Segment Test* (FAST), *Binary Robust Independent Elementary Features* (BRIEF), *Oriented FAST and Rotated BRIEF* (ORB), *Binary Robust Invariant Scalable Keypoints* (BRISK), *Fast Retina Keypoint* (FREAK).

A conclusão é que cada ponto de interesse pode ser descrito de uma maneira única, possibilitando a correspondência entre os pontos de interesse da imagem de referência e da imagem da cena.

As vantagens dos algoritmos de ponto de interesse são:

- a detecção do elemento de referência funciona mesmo com oclusão parcial porque uma imagem de referência pode conter centenas de pontos de interesse, e
- não é necessário preparar o ambiente se o sistema estiver suficientemente texturizado;

As desvantagens são:

- quanto mais marcadores detectar ao mesmo tempo, mais o tempo de cálculo aumenta;
- uma foto de um sistema com uma forma 3D complexa não permite o reconhecimento efetivo de um ponto de vista diferente daquele tirado durante a foto, e
- um sistema mal texturizado torna o método ineficaz.

Na maioria dos usos industriais, esse método é usado como uma versão com marcadores personalizados. Para isso, uma textura é impressa em um objeto que é colocado na cena para ser reconhecido pelo aplicativo. Portanto, as restrições se juntam às dos marcadores naturais e ainda há um problema em reconhecer um objeto industrial com textura leve a partir do seu modelo 3D.

3.3.3 Monitoramento baseado em um modelo 3D

Esse tipo de rastreamento é baseado em uma representação 3D do elemento a ser reconhecido (TORI; KIRNER; SISCOUTTO, 2006). (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011). Como em outros algoritmos de rastreamento, o princípio é o seguinte:

1. na fase *offline* para cada imagem de referência I_{ref} , os descritores definem pontos de interesse únicos para uma posição conhecida do objeto;
2. então, na fase *online* para cada imagem da cena I_{scene} , os mesmos descritores são calculados;
3. é realizada uma fase de correspondência entre os descritores I_{ref} e I_{scene} ;
4. a instalação da câmera é determinada, e
5. os objetos virtuais são adicionados.

As vantagens de ser baseado em um modelo 3D são:

- vários pontos de vista do objeto podem ser calculados na fase *offline*;
- os descritores podem se basear apenas na forma do objeto e portanto, não estão sujeitos a variações no brilho ou alterações na aparência visual do objeto, e
- o método de alinhamento da nuvem de pontos, o *Active Closest Point*, permite refinar a posição encontrada pelo algoritmo de reconhecimento de objetos 3D.

As desvantagens são:

- aumenta o tempo de cálculo;
- necessita do modelo 3D do objeto, e
- requer um detalhamento das informações.

Também deve ser observado que a maioria desses algoritmos de detecção de objetos usando seu modelo 3D exige que a câmera veja a cena em três dimensões como por exemplo as

câmeras *Red, Green, Blue, Depth* (RGBD), do tipo *Kinect* que recuperaram as informações de profundidade graças aos sensores infravermelhos.

A Figura 13 apresenta uma tabela com o resumo dos diferentes métodos de monitoramento existentes para uma melhor comparação entre suas vantagens e desvantagens.

Figura 13 – Tabela com resumo das técnicas para desenvolvimento de RA

Métodos	Rastreamento por marcador	Rastreamento por pontos de interesse	Rastreamento por modelo 3D
Ilustrações	ARToolKit, Vuforia	SURF: Implementado por Matlab
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade de cálculo - Estabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Pode trabalhar sem marcador 	<ul style="list-style-type: none"> - Robusto - Trabalha com objetos mal texturizados - Reconhecimento e todos os pontos de vista - Modelo 3D acessível em qualquer lugar
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de preparo do meio ambiente - Manutenção de marcadores 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensível a variações de luminosidade - Apenas objeto texturizado - Ideal com uma superfície plana - Precisa de uma foto - Limitação do ponto de vista do reconhecimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior tempo de cálculo - Precisa do modelo 3D do objeto - Requer informações detalhadas

Fonte: Elaborada pelo autor.

Finalmente, para desenvolver ferramentas de RA, não é necessário dominar esses aspectos da visão computacional, afinal existem estruturas que implementam certos algoritmos necessários para aplicativos de RA.

3.4 Estruturas existentes

Como visto, a RA é baseada em métodos de processamento de imagem e métodos de renderização em 3D (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011). Para o desenvolvimento de aplicativos de RA, são necessários estes dois componentes:

1. uma ferramenta para rastrear objetos, e
2. um *software* para renderização em 3D.

Atualmente, existem mais de 70 estruturas que podem ser consultadas acessando a lista em ¹. A Figura 14 apresenta uma tabela com as características principais e um comparativo das 3 estruturas que figuram atualmente entre as mais utilizadas por desenvolvedores de RA: *Vuforia*, *OpenCV* e *Wikitude* (AMIN; GOVILKAR, 2015).

Figura 14 – Tabela com a comparação dos principais *frameworks* disponíveis para realidade aumentada

AR framework
Características	Vuforia	Wikitude	OpenCV SDK
Rastreamento por marcador	Sim	Sim	Sim
Rastreamento por imagem de referência	Sim	Sim	Sim
Rastreamento por modelo 3D	Objeto digitalizado apenas	Objeto digitalizado apenas	Sim
SLAM	Sim	Sim	Sim
Integrado à Unity 3D	Sim	Sim	Não
Integrado à Unreal Engine	Sim	Não	Sim
Integrado à Ogre 3D	Em desenvolvimento	Em desenvolvimento	Em desenvolvimento
Suporte para iOS	Sim	Sim	Não
Suporte para Android	Sim	Sim	Sim
Forte comunidade de desenvolvedores	Sim	Sim	Sim
Gratuito	Limitado	Teste gratuito com marca d'água	Sim
Open Source	Não	Não	Sim

Fonte: Adaptada de Amin e Govilkar (2015).

Os critérios de seleção que se deve considerar para comparar e escolher a estrutura a utilizar são (AMIN; GOVILKAR, 2015):

- os tipos de métodos de monitoramento suportados;
- integração da estrutura nos três principais mecanismos de renderização 3D;

¹ <http://socialcompare.com/en/comparison/augmented-reality-sdk>.

- suporte para sistema *Android* ou *IOS*;
- a presença de uma comunidade de desenvolvedores, e
- uso gratuito da ferramenta.

A tabela também apresenta o *OpenCV* que é uma biblioteca de desenvolvimento *devkit* ou *Software Development Kit* (SDK) e não uma estrutura pois ele tem especialmente a vantagem de ser de código aberto (*open source*), permitindo programar e modificar qualquer tipo de algoritmo.

As escolhas da estrutura dependem das necessidades. Uma empresa que deseja demonstrar um conceito utilizará o *Vuforia* ou o *Wikitude* para avaliar sua eficácia e verificar se as funcionalidades correspondem às suas necessidades. Para necessidades mais específicas, eles precisarão passar por um desenvolvimento usando a biblioteca *OpenCV*. No entanto, o tempo necessário para configurar um aplicativo funcional em vários tipos de dispositivos utilizando o *OpenCV* pode tornar restritivo seu uso em um contexto industrial.

Em conclusão, pode-se dizer que o reconhecimento e rastreamento de objetos conhecidos é o núcleo do *software* de RA. No entanto, sem um dispositivo de renderização, ele permanece inútil.

3.5 Os dispositivos de renderização

No momento, ainda não é possível tornar o conteúdo virtual visível diretamente na visão de um ser humano, portanto faz-se necessário o uso de um dispositivo de visualização que permita a mistura dos conteúdos real e virtual, como por exemplo um *laptop*, *tablet*, óculos inteligentes, *smartphone* ou mesmo um projetor (Figura 15) (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). (KIRNER; TORI, 2004) (CARMIGNIANI; FURHT, 2011).

Esses dispositivos são de três tipos:

- usado pelo usuário: óculos inteligentes.
- portátil pelo usuário: *tablets* ou *smartphones*, e
- por projeção: tem a vantagem de não exigir outro equipamento do usuário.

Além do critério de preço, a escolha do tipo de dispositivo depende destes critérios principais:

- o visor é *Video-See-Through* (VST) ou *Optical-See-Through* (OST)?
- qual é o campo de visão oferecido pelo dispositivo?

Figura 15 – Tecnologias para renderização de RA

Dispositivos de exibição de realidade aumentada

Fonte: Elaborada pelo autor.

- o visor é binocular ou monocular?
- o usuário deve estar equipado com o dispositivo de exibição?

3.5.1 Video-See-Through (VST)

Dependendo do dispositivo escolhido, o conteúdo virtual e o real serão misturados e visualizados de forma diferente pelo usuário. A versão *Video-See-Through* (VST) permite misturar conteúdo real e virtual dentro de uma tela (Figura 16)

Figura 16 – Princípio de operação de uma exibição de RA em VST

Fonte: Adaptada de Cieutat (2013).

A operação é a seguinte:

1. a câmera captura a cena;
2. a imagem da câmera é processada para reconhecer o objeto de interesse na cena e deduzir a pose da câmera;
3. o conteúdo virtual é adicionado em coerência com a posição calculada da câmera, e
4. o usuário vê o resultado “real e virtual” em uma tela.

Este método permite que o usuário tenha uma sincronização perfeita entre o real e o virtual; não há atraso entre a renderização do mundo real e o aumento exibido. No entanto, o usuário vê o mundo real através de uma câmera. Sua visão é, portanto, prejudicada porque os dispositivos atuais não têm um campo de visão suficientemente alto.

3.5.2 *Optical-See-Through (OST)*

A versão *Optical-See-Through (OST)* funciona desta maneira (Figura 17):

Figura 17 – Princípio de operação de uma exibição de RA em OST

Fonte: Adaptada de Cieutat (2013).

A operação é a seguinte:

1. a câmera captura a cena;
2. a imagem da câmera é processada para reconhecer o objeto de interesse na cena e por deduzir a pose da câmera;

3. apenas o conteúdo virtual é projetado em telas semitransparentes, e
4. o usuário vê o resultado de duas maneiras:
 - a) seus olhos vêem o mundo real;
 - b) o objeto virtual é visto através da tela semitransparente onde é projetado.

O método OST é o mais próximo do caso ideal, pois o usuário pode olhar para o sistema real e ter as informações em realidade aumentada diante de seus olhos. No entanto, é necessário calibrar esse tipo de dispositivo para cada usuário.

3.5.3 Vantagens e desvantagens dos diferentes dispositivos de renderização

A escolha do dispositivo é extremamente importante para uma aplicação de RA, pois por exemplo, se for necessário ter as mãos livres durante sua utilização, certamente os dispositivos como *tablets* ou *smartphones* devem ser banidos no momento da escolha, ou se o operador sempre deve ter uma boa visão de seu ambiente no mundo real, será necessário levar em consideração a possível oclusão vinculada aos óculos óticos transparentes.

Os dispositivos binoculares podem ser equipados com câmeras frontais, portanto o usuário vê o mundo real e virtual através de uma tela localizada diretamente na frente de cada um dos seus olhos. Essa configuração é apenas de uso limitado no contexto de manutenção industrial tendo em vista o fato de que o usuário sentiria uma perda de rumo, porque ele teria que se mover enquanto vê as informações ou imagens aumentadas através de uma tela intermediária. No entanto, eles oferecem maior facilidade de implementação de um aplicativo de RA pois não requerem calibração.

Os dispositivos monoculares permitem que o usuário veja o conteúdo virtual e real em uma pequena tela remota. Geralmente é colocado na parte superior direita do olho. Portanto, o usuário pode ver o mundo real olhando normalmente. Quando ele precisar ver as informações fornecidas pelos aumentos, ele deverá mover o olhar para o canto superior direito. Esse método de exibição, supera os problemas de segurança encontrados nos óculos óticos transparentes, no entanto, o usuário deve constantemente mover o olhar para a tela remota para ver as informações ou imagens aumentadas e depois de vê-los, ele deve focar novamente sua visão na cena real e projetar mentalmente o que entendeu. Esse problema é igual ao de uma tela remota ou de um manual em papel.

Em relação aos *tablets* e *smartphones* a desvantagem de não ter as mãos livres é compensada por sua resolução mais alta e tamanho de tela maior, além de permitir que o usuário interaja intuitivamente com o aplicativo de RA.

Nos dispositivos como projetores o usuário está com as mãos livres e não precisa carregar nada para ver os aumentos. No entanto, a projeção requer suporte. Portanto, isso limita o tipo de conteúdo que pode ser exibido com este dispositivo.

Finalmente, a Figura 18 mostra um comparativo entre esses vários dispositivos de exibição de RA levando em consideração algumas restrições básicas em um contexto industrial. Por exemplo, as possíveis interações (critério -> interações) com o sistema de RA são importantes, pois o operador deve ser capaz de recuperar informações da base de conhecimento. Se o operador precisar usar capacete o dia todo, ele aumenta seu risco de distúrbios osteomusculares (critério -> equipado pelo usuário). Por fim, como a mistura entre real e virtual não é feita do ponto de vista da câmera, é essencial calibrar a câmera com os olhos do usuário ou a câmera com o projetor (critério -> calibração necessária).

Figura 18 – Tabela comparativa dos dispositivos de exibição de conteúdo de RA

Dispositivo	OST	Visão ótica	VST	Tablet ou celular	Monitor	Projetor portátil	Projetor fixo
Características
Móvel	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Uso exterior	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Interações	Limitadas	Limitadas	Limitadas	Tátil	Tátil	Limitadas	Limitadas
Mãos livres	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Equipado pelo usuário	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Não
Oclusão do mundo real	Sim	Limitada	Sim	Limitada	Não	Não	Não
Funciona em qualquer forma	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Binocular	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Calibração necessária	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
Cansaço visual	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Tempo de utilização (recarga)	Limitado	Limitado	Limitado	Limitado	Limitado	Limitado	Limitado
Exemplos de aparelhos	Microsoft HoloLens Meta 2 Epson Moverio BT-300 Laster WAVE	Vuzix M100 Vuzix M300 ORA-2	Oculus Rift HTC Vive	Samsung Galaxy iPad	Câmera e tela touch-screen	Câmera e projetor comum	Câmera e projetor comum

Fonte: Adaptada de Krevlen e Poelman (2010).

3.6 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados o funcionamento da RA e os princípios da visão computacional que permitiram a sua implementação, os tipos de monitoramento e estruturas existentes, além dos diferentes dispositivos para exibição dos objetos virtuais.

Os dispositivos do tipo OST parecem mais próximos da renderização ideal de RA, mas precisam ser calibrados regularmente, enquanto os dispositivos do tipo VST permitem um registro mais preciso entre o real e o virtual, mas exigem que o usuário desvie o olhar para poder ver o mundo real, ou seja, possui a mesma limitação ou inconveniente de uma tela remota ou de uma instrução em papel.

O uso dessa tecnologia na Indústria 4.0 ainda deixa dúvidas em aberto:

- Em quais casos usar essa tecnologia num contexto industrial?
- Que necessidades a RA atende?
- Como escolher o dispositivo certo de acordo com o caso de uso?

No capítulo seguinte, serão detalhados os usos da RA no contexto da fábrica inteligente da Indústria 4.0 e os critérios para a escolha do dispositivo certo.

A REALIDADE AUMENTADA NA INDÚSTRIA 4.0

A RA se encaixa perfeitamente na Indústria 4.0 pois permite aos fabricantes economizar tempo e evitar erros de manuseio que custam caro para a empresa. De fato, a RA permite otimizar o desempenho da indústria, melhorando a precisão em todas as etapas da produção: da formação à produção e passando pelo planejamento e manutenção industrial. Portanto, saber adaptar esta tecnologia aos diferentes setores da fábrica do futuro para oferecer soluções cada vez mais práticas e assim, otimizar seu desempenho, é essencial às empresas que visam personalizar seus produtos e atender às necessidades de seus clientes.

4.1 Categorias de uso da RA na Indústria 4.0

As principais razões pelas quais as empresa estão se interessando na implantação de ferramentas de RA são: a melhoria das interações diretas com os clientes, a melhoria dos processos de acesso remoto e a melhoria da eficiência e segurança durante a transferência de conhecimentos entre funcionários. Neste contexto da Indústria 4.0, a RA vem sendo aplicada nos setores de manutenção, montagem, logística, simulação de processos e treinamentos (Cazzolla *et al.*, 2019). O ponto comum entre todos esses usos é a necessidade de compartilhar conhecimento e fazer um *update* das equipes através de um treinamento rápido e eficaz. As empresas atentas a essas futuras tecnologias estão atraindo mais pessoas e a RA pode ser um elemento-chave entre os incentivos para recrutamento.

4.1.1 Manutenção industrial com RA

Tendo-se em vista que o foco principal da RA nos casos de utilização para manutenção destina-se à transmissão de conhecimento entre funcionários experientes e novos contratados, instruções de manutenção em 3D digital e exibição de informações em formato digital (incluindo

a apresentação de informações detalhadas de manutenção) para uma máquina, a aceitação da implantação de soluções de RA para o pessoal de manutenção vem ocorrendo notavelmente bem.

A Figura 19 ilustra um projeto que utilizou a RA para a troca de uma lâmina de serra em um equipamento industrial:

Figura 19 – Substituição de uma lâmina de serra com uso de RA

Fonte: Marsot e Govaere (2008).

4.1.2 Treinamento com RA no contexto industrial

Seja treinando novos funcionários no local ou garantindo a transferência de conhecimento entre especialistas experientes e jovens no local de trabalho, a RA tem claramente um papel a desempenhar.

O uso dessa tecnologia para treinamento traz aos participantes a enorme vantagem de não se ater ao uso de apostilas e manuais em papel e de assistir a vídeos pois permitem uma interação instantânea e em geral estimulante com as ferramentas e com as máquinas que serão utilizadas no decorrer de seu trabalho.

A principal vantagem da utilização de RA em treinamentos industriais é que não é necessário ter o sistema real para o treinamento.

A Figura 20 mostra um exemplo do uso de treinamento orientado com RA imersiva para profissionais aprenderem a montagem da porta de um avião.

Figura 20 – Treinamento orientado com RA imersiva

Fonte: [Gonzalez-Franco et al. \(2016\)](#).

4.1.3 Montagem industrial com uso de RA

A assistência à montagem com uso de RA é mais restritiva em termos de registro real-virtual do que para uso em manutenção, pois cada elemento deve ser colocado precisamente no sistema a ser montado (Figura 21).

Figura 21 – Uso de RA para a montagem de uma estrutura formada por peças de encaixe

Fonte: [Tang et al. \(2003\)](#).

4.1.4 O uso da RA para logística industrial

O uso de identificadores ou marcadores de RA também vem sendo utilizado para auxiliar empresas de logística e *picking*, isto é, recuperação de vários itens em uma ordem definida para preparar lotes ¹ (Figura 22).

Figura 22 – Uso de RA na logística e *picking*

Fonte: Adaptada de DHL (2014).

Paul Davies e David Lee ² oferecem feedback sobre a implementação da RA nas cadeias de produção da *Boeing*, apresentando todos os problemas e soluções implementados para um teste de realidade aumentada em sua linha de produção.

4.2 Escolha do dispositivo de RA para cada categoria

De fato, cada tipo de uso possui restrições específicas às quais um tipo de dispositivo pode responder. A tabela da Figura 23 separa as publicações de acordo com a categoria de uso e nota-se que 31% dos estudos de caso de RA em operações industriais, são realizados em *tablets* ou *smartphones*.

Isto se dá porque nesses dispositivos, as estruturas existentes para implantar aplicativos de RA estão muito bem integradas para esses suportes e as interações táteis nesses dispositivos

¹ https://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/csi_augmented_reality_report_290414.pdf

² http://thearea.org/wp-content/uploads/2017/07/Augmented_Reality_at_Boeing_-_Lessons_Learned.pdf

são prévia e amplamente conhecidas pela maioria dos usuários e portanto, não acrescentam uma dificuldade adicional na atividade realizada com o uso da realidade aumentada.

Figura 23 – Distribuição dos dispositivos utilizados em estudos de caso de operações de RA aplicadas à indústria

Dispositivo Uso	Optical-see-through (OST)	Visão ótica	Video-see-through (VST)	Tablet ou smartphone	Tela remota	Projektor portátil	Projektor fixo
Manutenção	4 (Bottecchia, 2010) (Bottecchia, et al., 2010) (Feiner, et al., 1993) (Schwald & De Laval, 2003)	2 (Aromaa, et al., 2016) (Friedrich, et al., 2002)	1 (Henderson & Feiner, 2011)	9 (Aromaa, et al., 2016) (Benbelkacem, et al., 2011) (Davies & Lee, 2014) (Friedrich, et al., 2002) (Lamberti, et al., 2014) (Lee & Rhee, 2008) (Marsot & Govaere, 2008) (Martínez, et al., 2014) (Stanimirovic, et al., 2014)	0	1 (Sakata, et al., 2003)	0
Montagem	0	0	4 (Suárez-Warden, et al., 2015) (Syberfeldt, et al., 2015) (Syberfeldt, et al., 2014) (Westerfield, et al., 2015)	1 (Davies & Lee, 2014)	2 (Re, et al., 2016) (Wu, et al., 2016)	0	1 (Funk, et al., 2016)
Treinamento	1 (Cieutat, 2013)	0	2 (Gonzalez-Franco, et al., 2016) (Westerfield, et al., 2015)	0	2 (Cieutat, 2013) (Martínez, et al., 2014)	0	0
Logística e picking	0	0	0	0	0	2 (Funk, et al., 2016) (Herter, 2014)	0
Total	5	2	7	10	4	3	1
Porcentagem	17%	6%	22%	31%	11%	8%	6%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, vem o uso de dispositivos VST com 22% das publicações por ter um campo de visão suficientemente confortável para o usuário. No entanto, esses dispositivos não devem ser transferidos para a indústria porque sua falta de ergonomia não permite o uso por longos períodos. Os estudos com dispositivos do tipo OST, atualmente com 17%, devido aos recentes lançamentos de óculos inteligentes que possuem um campo de visão confortável de até 90°.

Os usos com dispositivos do tipo visão ótica são pouco representados, pois esses dispositivos ainda são recentes e sua exibição monocular pode parecer restritivo e os estudos com dispositivos do tipo projetores fixos e portáteis (11%), exigem uma calibração e o sistema ainda não é muito portátil.

Por meio dessa revisão nota-se que os usos são variados, mas ainda podem ser categorizados: manutenção, montagem, treinamento e logística/picking. Finalmente, em um contexto industrial, é importante usar o dispositivo correto de acordo com os usos identificados para cada categoria de uso.

4.2.1 Manutenção industrial

De fato, para fazer manutenção, é necessário:

1. ter informações precisas sobre as operações de manutenção;
2. permitir ao operador salvar suas devoluções no sistema de informações da empresa;
3. ter um sistema móvel, utilizável em ambientes fechados e dependendo do contexto externo;
e
4. evitar que o operador perca tempo calibrando o sistema de realidade aumentada.

Portanto, é necessário ter um sistema com as seguintes características correspondentes:

- tipo OST;
- com interações instintivas;
- que seja móvel e permita o uso ao ar livre; e
- que não requeira calibração.

4.2.2 Montagem industrial

A montagem requer principalmente operações o mais rápido possível, a fim de reduzir os custos de produção. Portanto, é bastante dedicado às linhas de produção. As restrições são:

- minimizar movimentos desnecessários do operador;
- que as informações fornecidas em RA sejam tão precisas quanto possível para a colocação da peça a ser montada;
- deixar o operador livre para se mover; e
- poder ser usado sem limite de tempo.

Os capacetes do tipo VST possibilitam atender a todas as restrições, exceto a de “equipado pelo usuário” (Figura 18), e continuam sendo uma das maneiras mais práticas de avaliar o desempenho de um sistema de RA para montagem.

4.2.3 Treinamento industrial

Os dispositivos usados para o treinamento são principalmente capacetes VST ou telas remotas. O fato de o conteúdo já existir e o melhor desempenho de monitoramento com dispositivos VST, permitem que o usuário/operador fique com as mãos livres e com uma experiência durante o treinamento como se estivesse em condições reais.

4.2.4 Logística e picking industrial

No que diz respeito à logística e *picking* industrial, as empresas líderes do seguimento usam dispositivos projetores portáteis como capacetes de visão ótica *head up* por sua qualidade de imagem e tela conectada. No entanto, o sistema deve ser usado pelo operador e o campo de visão limitado permanece restritivo. Consequentemente, o limite dos objetos virtuais disponíveis na RA projetada não é uma restrição para esse uso, além de ter a vantagem de deixar o operador com as mãos livres.

4.3 Considerações finais

Neste capítulo, vimos que no contexto da Indústria 4.0 a RA vem sendo aplicada nos setores de manutenção, montagem, logística, simulação de processos e treinamentos e que o ponto comum entre todos esses usos é a necessidade de compartilhamento de conhecimento, facilidade de entendimento e satisfação do operador.

As empresas atentas a essas futuras tecnologias estão utilizando a RA como um elemento-chave entre os incentivos para recrutamento e que é importante usar o dispositivo correto de acordo com os usos identificados para cada categoria de uso.

Finalmente, embora as repercussões positivas fortes sejam obviamente de grande importância, é necessário, no entanto, questionar a capacidade dessas novas experiências de RA aplicadas à indústria 4.0 no que concerne ao objetivo maior de qualquer empreendimento em qualquer área de negócio: como produzir um retorno mensurável no investimento para sua implantação?

Portanto, como ainda existe a necessidade de quantificar a contribuição dessa tecnologia no contexto da Indústria 4.0 em critérios precisos, o próximo capítulo irá detalhar a metodologia utilizada no estudo de caso deste trabalho a fim de avaliar se seus recursos e vantagens são relevantes para garantir um bom retorno de seu investimento.

METODOLOGIA E DESIGN DO ESTUDO

A pesquisa bibliográfica para a realização deste trabalho permitiu fazer um balanço do estado da arte das tecnologias de RA em um contexto industrial. O Capítulo 2, apresentou os princípios operacionais e os pilares tecnológicos da “Fábrica do futuro” na Indústria 4.0, bem como uma nova proposta deste autor de definição para a Indústria 4.0, além de mostrar em síntese as tecnologias CAD, CAM, CNC e CMM na indústria 4.0.

Em seguida o Capítulo 3 apresentou a RA. Sua definição, seus princípios operacionais, algoritmos e os dispositivos associados.

O Capítulo 4 apresentou seu uso em um contexto industrial bem como uma proposta das diretrizes a seguir para uma melhor escolha do dispositivo de RA a ser utilizado conforme os casos de uso como manufatura, manutenção, montagem, treinamento, logística.

Apesar disso, essas tecnologias ainda não são simples de implementar. Portanto, é necessário definir um método para avaliá-los de acordo com critérios precisos, para poder implementá-los de maneira relevante e escolher as operações com alto potencial de otimização.

Portanto este capítulo propõe um método para avaliar o uso da RA e analisar se a eficiência nos processos de *set-up* pode ser otimizada usando essa tecnologia. Será analisada por um lado, a relação desempenho/satisfação do usuário/operador e, por outro lado, identificar se há e validar uma possível redução nos tempos de parada ligados ao *set-up* em uma máquina fresadora CNC e em uma máquina de inspeção por coordenadas CMM do tipo ponte.

5.1 Reafirmação do objetivo da pesquisa e do estudo

A digitalização e o desenvolvimento de novas tecnologias levaram à introdução da Indústria 4.0. Como consequência natural, essa introdução levou governos e empresas a perceberem que existem possibilidades de aumentar o lucro na produção industrial. Os métodos anteriores, como produção *just-in-time* e terceirização da produção para aproveitar os custos mais baixos

de mão-de-obra, simplesmente não são mais efetivos por mais tempo. Por sua vez, as empresas investiram recursos no desenvolvimento de ferramentas para ampliar a competitividade em um mercado em constante mudança (LASI *et al.*, 2014).

A metodologia abordada neste trabalho consiste em revisar, detalhar e sintetizar os resultados já adquiridos em outros estudos de caso do uso da RA na indústria encontrados na literatura e definir os critérios mais apropriados para propor um método de avaliação do uso da RA em um contexto industrial.

Será apresentado um estudo de caso realizado que foi dividido em duas partes distintas: na primeira parte foi feita uma análise das respostas obtidas em um questionário de escala Likert (Apêndice C) para avaliar o nível de entendimento e envolvimento dos operadores/usuários que trabalham direta ou indiretamente com RA. A segunda parte compara um aplicativo comercial de RA com um suporte em PDF para realizar o *set-up* de uma máquina-ferramenta (fresadora) CNC e de uma máquina de inspeção por coordenada CMM.

Este estudo ajudará a definir se a estratégia de investir em uma ferramenta com tecnologia baseada em RA para realizar os processos de *set-up* irá reduzir o tempo de parada da máquina durante o processo e avaliar qual o nível de desempenho e satisfação reportado pelos usuários/operadores.

5.2 Metodologia, critérios e ferramentas para análise do estudo

Para fazer uma avaliação de um sistema de RA de acordo as anormas vigentes como: ISO 9241-210: 2010 “Ergonomia da interação homem-sistema - Parte 210: Projeto centrado no homem para sistemas interativos” (ABNT, 2011) requer a definição das três categorias de critérios para a avaliação de usabilidade, que pode ser definida como o grau em que um sistema, produto ou serviço pode ser usado, por usuários específicos, para atingir objetivos definidos com eficiência, eficácia e satisfação.

Os termos eficiência, eficácia e satisfação são definidos da seguinte maneira neste padrão:

- Eficiência - precisão e grau de conclusão segundo os quais o usuário alcança objetivos especificados;
- Eficácia - relação entre os recursos gastos e a precisão e o grau de conclusão segundo os quais o usuário atinge objetivos especificado;
- Satisfação - ausência de desconforto e atitudes positivas no uso do produto.

No entanto, essas categorias de critérios permanecem muito genéricas e precisam ser refinadas no contexto do uso de um sistema de RA, portanto elas podem ser avaliadas desta maneira:

- Desempenho - medida quantificável de um critério objetivo, como o tempo de execução das tarefas ou o número de erros cometidos durante a operação.
- Satisfação - esse critério é avaliado principalmente por meio de questionários baseados na escala de Likert (ROBINSON, 2014) e pode ser acompanhado pelo questionário de carga mental do usuário (HART; STAVELAND, 1988). Isso permite avaliar qual carga cognitiva requer uma tarefa específica.

Após definir as três categorias de análise, resta definir as ferramentas associadas para avaliar um experimento ou estudo.

5.2.1 Ferramentas estatísticas de análise

A estatística é, na verdade, o ramo absoluto mais amplamente utilizado da matemática na pesquisa quantitativa. As técnicas estatísticas são utilizadas ampla e extensivamente na indústria para análises em geral, incluindo custos, produção, prazos, metas, resultados, etc.

Além da média e da variância, para explicar tendências, é necessário usar testes estatísticos mais detalhados para concluir que um sistema é melhor que outro. Este capítulo irá apresentar os diferentes testes usados neste estudo, todos implementados e plotados no software *Rstudio* (GRÖMPING, 2015) e no pacote *Microsoft Office* (OSE, 2016).

5.2.1.1 ANOVA ou análise de variância

A análise de variância, ou ANOVA (RöDEL, 1971), é uma das análises estatísticas mais amplamente utilizada na literatura. Pode ser resumida da seguinte forma: A ANOVA assume que a variável a ser explicada segue uma distribuição normal, e assim partindo dessa hipótese, devemos primeiro verificar a homogeneidade das variações usando um teste de Bartlett (BARTLETT; FOWLER, 1937). Em seguida, o cálculo da ANOVA permite verificar se uma média é estatisticamente diferente em função da variável explicativa categórica (ou seja, um meio explicativo) com um risco de α % (geralmente $\alpha = 5\%$).

O teste usa duas hipóteses complementares:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_g$ todos os meios são os mesmos,

H_1 : pelo menos um dos meios é diferente.

Essa ferramenta estatística permite avaliar variáveis objetivas, como a duração da execução de uma tarefa, mas também variáveis subjetivas avaliadas por um usuário/operador como satisfação, eficiência, facilidade de entendimento e de manuseio.

No entanto, é essencial ter ferramentas reconhecidas para avaliar esses dados subjetivos. Portanto, foi utilizado o teste NASA-TLX de carga mental e um questionário de escala Likert.

5.2.1.2 O questionário de carga mental NASA-TLX

Carga mental é um conceito desenvolvido pela NASA (HART; STAVELAND, 1988). Seu objetivo é avaliar subjetivamente o requisito de uma tarefa. A carga mental é avaliada usando um valor único, no entanto, esse valor é calculado levando em consideração três dimensões que medem as demandas impostas ao participante (demandas mentais, físicas e temporais) e três dimensões que enfocam como o participante lida com a tarefa em mãos (desempenho autoavaliado, esforço e nível de frustração).

A avaliação ocorre em duas fases. O primeiro é avaliar cada critério em uma escala de 1 a 10. Recomenda-se o uso de um valor contínuo para esta avaliação. A Figura 24 apresenta os seis critérios, com sua descrição e a escala de valores associada para atendê-los. Note-se que o critério denominado *desempenho* é utilizado com uma escala invertida, pois quanto maior o valor dado pelo participante neste critério, melhor sua autoavaliação referente ao seu desempenho, ao contrario dos outros criterios, onde a nota alta evidencioa uma dificuldade ou exiencia (física, mental ou temporal) maior.

Figura 24 – Lista de critérios para avaliar a carga mental, com escalas de descrição e classificação.

Critério	Descrição	Escala de avaliação
Exigência mental	Qual era o nível de exigência mental e perceptiva da tarefa (isto é, pensar, decidir, calcular, lembrar, olhar, procurar etc.)? A tarefa foi fácil ou exigente, simples ou complexa, exigindo pouca ou muita precisão?	Baixo -> alto
Exigência física	Qual era o nível de atividade física exigido pela tarefa (ou seja, empurrar, puxar, girar, controlar, ativar etc.)? A tarefa foi simples ou exigente, lenta ou rápida, fácil ou intensa, relaxante ou extenuante?	Baixo -> alto
Exigência temporal	Quanta pressão de tempo você sentiu por causa da velocidade ou ritmo em que as tarefas estavam acontecendo? O ritmo foi lento ou rápido, silencioso ou frenético?	Baixo -> alto
Desempenho	Você acha que alcançou os objetivos da tarefa estabelecidos pelo pesquisador (ou por você)? Você ficou satisfeito com seu desempenho nos objetivos estabelecidos?	Bom-> ruim (escala invertida)
Esforço	Quanto esforço você teve que fazer para concluir a tarefa solicitada (mental e fisicamente)?	Baixo -> alto
Nível de frustração	Durante a execução da tarefa, você se sentiu satisfeito, relaxado, confiante (baixo nível de frustração), ou melhor, desanimado, irritado, estressado, sem confiança (nível alta frustração)?	Baixo -> alto

Fonte: Adaptada de Hart e Staveland (1988).

A segunda fase consiste em comparar os critérios dois a dois. A Figura 25 apresenta a fase 2 com uma lista das quinze comparações a serem feitas para avaliar a carga mental.

Figura 25 – Lista de comparação de dois por dois de critérios para avaliar a carga mental.

Exigência física ou Exigência mental	Exigência temporal ou Exigência física	Exigência temporal ou Nível de frustração
Exigência temporal ou Exigência mental	Desempenho ou Exigência física	Exigência temporal ou Esforço
Desempenho ou Exigência mental	Nível de frustração ou Exigência física	Desempenho ou Nível de frustração
Nível de frustração ou Exigência mental	Esforço ou Exigência física	Desempenho ou Esforço
Esforço ou Exigência mental	Exigência temporal ou Desempenho	Esforço ou Nível de frustração

Fonte: Adaptada de [Hart e Staveland \(1988\)](#).

Depois que todas as comparações são feitas, o número de vezes que o critério escolhido é contado.

Na pontuação NASA-TLX ponderada NASA-TLX o usuário primeiro classifica todas as seis subcategorias após concluir uma tarefa específica e, em seguida, pondera a contribuição de cada fator de uma maneira predefinida. O objetivo é entender melhor qual fonte potencial é responsável principalmente pela carga de trabalho percebida. Por outro lado, na pontuação NASA-TLX bruta, o usuário avalia todas as seis subcategorias após completar uma tarefa específica, sem pesá-las. O resultado é a média aritmética de todas as subescalas.

A carga mental *TLX* é avaliada de acordo com esta fórmula:

$$TLX = \frac{1}{15} \cdot \sum_{i=1}^6 \rho_i \cdot N_i \quad (5.1)$$

Onde:

ρ_i : avaliação do critério i em uma escala de 1 a 10.

N_i : número de aparências do critério i na lista de quinze comparações (Fig. 25).

TLX : valor que representa a carga mental e varia de 1 (baixo) a 10 (alto).

5.2.2 Questionário de escala Likert

Muito comumente utilizada para pesquisas de opinião, o questionários de escala Likert (Apêndice C) é baseado em uma escala de respostas psicométricas previamente explicada àqueles

que respondem à pesquisa.

Por meio da análise das respostas dos participante, pode-se medir o nível de concordância ou discordância, satisfação ou insatisfação, entendimento ou não sobre determinado tema, facilidade ou dificuldade em entender determinada sentença ou instrução, a relevância de determinado tema, uma frequência de erros e acertos, etc.

5.3 População e Amostragem

A população da primeira parte deste estudo que visou analisar e avaliar o nível de entendimento e envolvimento dos operadores/usuários que trabalham direta ou indiretamente com RA é composta por 50 participantes de duas empresas da região de Québec QC, Canadá que receberam a Carta-convite (Apêndice A) e permitiram a participação de alguns de seus funcionários, porém restringiram a divulgação dos dados e informações das empresas antecipadamente caracterizadas pelas mesmas como sendo de segredo industrial e segurança nacional.

As visitas às empresas também não foram permitidas tendo em vista o início do protocolo de isolamento e confinamento (*lockdown*) decorrente da pandemia de COVID-19 ¹ que foi declarado pelo Ministério da Saúde da província de Québec e passou a vigorar a partir do dia 17 de Março de 2020, visando diminuir a propagação do vírus SARS-CoV-2 ^{2 3}.

Já a população da segunda parte do estudo é composta pelos funcionários da empresa Usitech onde o autor trabalha de maneira efetiva e permanente desde junho de 2019, o que resultou em uma amostragem de 21 participantes. No final de setembro de 2020, a empresa adquiriu a permissão de continuar suas atividades durante as restrições da pandemia tendo em vista que a empresa presta serviços para os setores essenciais como saúde, pesquisa, defesa nacional e alimentação, e assim foi possível realizar os experimentos respeitando as medidas de distanciamento interpessoal, de higienização e desinfecção dos objetos utilizados (celulares, apostilas e computadores).

5.4 Primeira parte do estudo de caso

Esta primeira parte do estudo de caso visa exclusivamente conhecer e analisar qual o nível de entendimento dos participantes sobre os temas vitais da pesquisa, a saber: Indústria 4.0, Realidades Aumentada (RA) e Virtual (RV).

¹ https://pt.wikipedia.org/wiki/Pandemia_de_COVID-19

² <https://pt.wikipedia.org/wiki/SARS-CoV-2>

³ <https://pt.wikipedia.org/wiki/COVID-19>

5.4.1 Procedimentos de coleta de dados, pressupostos e limitações

Para ambas as partes do estudo, após a permissão das empresa, os funcionários receberam informações detalhadas sobre o objetivo do estudo e o termo de consentimento informado (Apêndice B). Toda a coleta de dados foi realizada remotamente.

Os funcionários contataram o pesquisador, que continuou a correspondência por e-mail, primeiro fornecendo o formulário de consentimento informado e depois o questionário (Apêndice C). Os funcionários retornaram o formulário de consentimento e o questionário preenchidos por e-mail.

Supõe-se que os participantes tenham preenchido o questionário voluntariamente e da melhor maneira possível e que o instrumento de pesquisa tenha sido abrangente o suficiente para avaliar o benefício e o uso de RA e RV pelas empresas. Supõe-se também que a metodologia selecionada seja a mais adequada ao estudo que está sendo realizado tendo em vista as limitações resultantes das restrições impostas pelo contexto pandêmico em que foi realizado.

5.5 Segunda parte do estudo de caso

Objetivos:

- analisar a eficácia do uso da RA na melhoria do desempenho de máquinas-ferramenta CNC e de máquinas de inspeção por coordenadas CMM, reduzindo o tempo de inatividade durante sua configuração (*set-up*);
- determinar a eficácia da RA na melhoria do desempenho e satisfação dos operadores encarregados de manusear as máquinas CNC e CMM na indústria de manufatura.

Basicamente, as tarefas de configuração (*set-up*) deste estudo incluíam o posicionamento do material bruto na fresadora garantindo um sincronismo perfeito evitando possíveis colisões e o posicionamento da peça usinada na mesa de mármore da CMM de forma a garantir uma medição sem erros devidos a vibrações ou deslocamentos da peça, e possibilitar uma repetitividade do processo de forma rápida e precisa para inspeções futuras.

As máquinas utilizadas neste estudo conforme mostrado na Figura 26 foram respectivamente:

- uma fresadora CNC da marca *DMG* modelo *DMU-50* com comando da marca *Siemens* e equipada com dispositivo autônomo de troca de *pallets*, e
- uma máquina CMM da marca *IMS - Impact* e modelo *Standard* ($x=750mm$; $y=750mm$; $z=550mm$) com cabeçote apalpador da marca *Renishaw* e modelo *AT20*.

Figura 26 – Máquinas CNC e CMM utilizadas no estudo

Máquina CMM IMS-Impact com cabeçote Renishaw

Fonte: Elaborada pelo autor.

As instruções tradicionais em papel são informações descritivas, geralmente em um formato de tutoriais com as coordenadas a serem colocadas no comando da máquina CNC ou CMM para depois posicionar a ferramenta ou peça de acordo.

Em geral são apenas instruções escritas, porém, conforme a quantidade de operações e

deslocamntos no *set-up* numa mesma peça, algumas imagens como fotos ou desenhos podem ser adicionados para facilitar o entendimento (Figura 27).

Figura 27 – Exemplo de instrução de *set-up* em papel

No Piece UCB : 11139-9-1

OPÉRATION 1 Scier tel que listing. Temp Reel 01 Date 01	Machines ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 4 Insertion Bushings ** Appuyer sur le coté facer ** ** Mettre de l'huile pour insertion ** Temp Reel 04 Date 04	Machines Journaller ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 7 Temp Reel 07 Date 07
OPÉRATION 2 Brass 660 Face pour blanchir. Usiner Ext. à 2.490" / 2.4875" Utiliser dessin Temp Reel 02 Date 02	Machines LYNX ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 5 Acier 1045 Usiner l'autre coté de la roue Bore Intérieur à 2.132" / 2.130" Temp Reel 05 Date 05	Machines LYNX ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 8 Temp Reel 08 Date 08
OPÉRATION 3 Acier 1045 Face & Drill 2 1/4". Usiner Ext. à 50%. Bore Intérieur à 2.4862" / 2.4855" Temp Reel 03 Date 03	Machines LYNX ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 6 Temp Reel 06 Date 06	Machines ▼ ▼ ▼	OPÉRATION 9 Temp Reel 10 Date 10

Montage:

OP1: ➤ X: CENTRE ➤ Y: CENTRE ➤ Z: CENTRE (IMAGE SET-UP ICI)	OP2: ➤ X: CENTRE ➤ Y: CENTRE ➤ Z: CENTRE (IMAGE SET-UP ICI)
NOTE :	NOTE :
OP3: ➤ X: CENTRE ➤ Y: CENTRE ➤ Z: CENTRE (IMAGE SET-UP ICI)	OP4: ➤ X: CENTRE ➤ Y: CENTRE ➤ Z: CENTRE (IMAGE SET-UP ICI)
NOTE :	NOTE :

Fonte: Elaborada pelo autor.

A proposta deste estudo foi fornecer essas mesmas instruções de posicionamento através de imagens 3D da peça ou matéria-prima acrescida de marcas ou setas indicando exatamente os pontos de referência para seu posicionamento.

A Figura 28 mostra respectivamente, uma imagem com a tela inicial do aplicativo mostrando um desenho de uma peça em 3D e as setas referenciais em sua extremidade inferior e uma imagem com um exemplo de sua aplicação prática durante os experimentos.

Figura 28 – Imagem vista pelo operador na tela do aplicativo e imagem do seu uso na prática

(a) Tela do aplicativo RA

(b) Exemplo da utilização RA na CMM

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta segunda parte do estudo de caso, o objetivo foi testar as variáveis estudadas durante a operação de configuração (*set-up*) dependendo do meio de instrução utilizado (RA ou papel) para os operadores, independentemente da experiência prévia na máquina a ser configurada.

As variáveis estudadas foram o tempo necessário para realizar as tarefas, o número de erros, e a aceitabilidade da RA para os operadores.

Isso deve tornar possível responder a estas três perguntas:

1. Qual meio permite que a operação seja realizada o mais rápido possível?
2. Qual meio permite que a operação seja realizada com o menor número de erros possível?
3. Qual suporte é mais confortável e oferece maior confiança ao operador?

Para responder à última questão do estudo de caso, os operadores foram convidados a responderem ao questionário de carga mental NASA-TLX elaborado em código aberto e disponibilizado na plataforma “GitHub” por Francesco Schwarz^{1,2} diretamente neste link³ e a deixarem um *feedback* sobre o *stress* sentido, a facilidade de uso e a confiança que sentiram ao responderem as seguintes questões:

¹ <https://github.com/isellsoap>

² <https://github.com/isellsoap/nasa-tlx>

³ <https://nasa-tlx.firebaseio.com/>

- Quão confortável você se sentiu ao realizar as operações? (Conforto)
- Você achou fácil usar os suportes? (Fácilidade de uso)
- Você acha que este meio é uma boa escolha para esta operação? (Aprovação)

5.6 Considerações finais

Este capítulo permitiu, em primeiro lugar, categorizar os critérios de avaliação de desempenho (duração, número de erros, ...) e satisfação (questionário de carga mental) do uso da RA como ferramenta auxiliar durante os processos de configuração das máquinas-ferramentas CNC e máquinas de medição por coordenadas CMM.

O estudo concluiu que um guia dos passos de configuração (*set-up*) em RA para máquinas CNC e CMM é tão eficaz quanto um tradicional em papel em termos de duração total. Além disso, a RA tornou possível cometer menos erros em comparação com a instrução de papel. Percebe-se ainda, que o uso da tecnologia de RA resultou em uma perda significativa do tempo de execução nesta fase.

RESULTADOS

Os resultados do estudo de caso foram divididos em suas duas partes distintas e permitiram conhecer e analisar o perfil dos usuários, verificar seu nível de entendimento e analisar a eficácia do uso da RA em máquinas-ferramenta CNC e máquinas de inspeção por coordenadas CMM nos critérios tempo (os tempos para executar cada uma das subtarefas e o tempo total da operação de *set-up*) e taxa de falhas (número de erros que resultam em uma colisão potencial) e determinar se existe uma melhoria no desempenho e satisfação dos operadores.

6.1 Resultados da primeira parte do estudo de caso

6.1.1 Dados demográficos

Figura 29 – Divisão de gênero

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Divisão etária

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 – Área de trabalho

Fonte: Elaborada pelo autor.

As informações demográficas foram colhidas e analisadas para traçar um perfil dos usuários que participaram da pesquisa e verificar a correlação entre esses resultados e as tecnologias de RA na indústria (Figuras 29, 30 e 31).

Nota-se que 90% dos participantes se declararam do gênero masculino, que 68% está na faixa etária entre 30 e 41 anos e 74% trabalham diretamente ligados à produção.

6.1.2 Dados de conhecimento sobre Indústria 4.0 e RA

Figura 32 – Conhecimentos da Indústria 4.0, RA e RV

Qual das opções a seguir o (a) Sr. (a) concorda ser a melhor definição para a Indústria 4.0?	O uso de RA e RV durante o processo de produção.	12	24%
	A capacidade de interagir com aplicativos de RA e RV.	6	12%
	A otimização do setor industrial.	32	64%

(a) Conhecimentos da Indústria 4.0

Como o (a) Sr. (a) definiria a RA?	A capacidade de imergir e interagir em um ambiente computadorizado.	9	18%
	A capacidade de usar a tecnologia para criar realidades alternativas.	3	6%
	A capacidade de ver o mundo real com um modelo 3D projetado na imagem.	38	76%

(b) Conhecimentos da realidade aumentada (RA)

Como o (a) Sr. (a) definiria a RV?	Uma simulação em computador que permite o desenvolvimento de um modelo.	12	24%
	Uma realidade baseada em computador.	11	22%
	Um mundo 3D interativo e hipotético no qual o usuário pode interagir.	27	54%

(c) Conhecimentos da realidade virtual (RV)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como visto na Figura 32, sobre a definição da Indústria 4.0, 24% dos participantes concordaram que dentre as opções, a Indústria 4.0 pode ser definida como envolvendo o uso da RA e RV durante a produção enquanto 64% optaram por definí-la como a otimização dos processos no setor industrial.

Quanto a definição de RA e de RV 76% responderam que a RA é a capacidade de ver o mundo real com um modelo 3D inserido na imagem, e 54% dos participantes definiu RV como um mundo 3D interativo e hipotético no qual o usuário pode interagir.

6.1.3 Dados da escala Likert

Nota-se que os participantes concordaram que as novas necessidades do mercado levaram as empresas a avançar em suas tecnologias o que ajudou a dar uma nova visão digital dentro da empresa e concordaram firmemente que as tecnologias de RA e RV levaram à automação de muitos processos dentro da empresa sendo assim benéfica na solução de problemas. Também nota-se uma alta frequência de concordância na afirmação de que a inovação se tornou mais rápida como resultado implantação das tecnologias digitais baseadas em RA e RV (Figura 33).

Figura 33 – Escala Likert

6.2 Resultados da segunda parte do estudo de caso

Uma análise estatística foi realizada nos dados da tabela da Figura 34 para determinar a relação entre o tempo de configuração e a taxa de falha e o respectivo método de fresadora usado.

O tempo total necessário para realizar todas as subtarefas e concluir a operação de fresagem foi calculado.

O tempo médio de conclusão de cada sub tarefa também foi calculado para o método de instrução em papel e o sistema de RA.

O tempo total necessário para configurar e concluir a operação de fresamento usando o método tradicional de instrução em papel é de 1767 segundos (29,45 minutos).

O tempo médio necessário para concluir uma sub tarefa individual usando o mesmo método é 117,8 segundos.

O tempo total necessário para configurar e concluir a tarefa de operação de fresamento usando o método RA proposto é de 1141 segundos (19,01 minutos).

O tempo médio para configurar as máquinas durante a operação de fresagem e processo de inspeção foi reduzido em 35,45% quando os métodos RA foram empregados.

Figura 34 – Tabela com o resumo da soma e médias do tempo de *set-up* e taxa de falha para fresadora CNC e máquina de inspeção CMM usando instruções de papel e em RA.

Tarefa	Tempo de set-up segundos (s)		Taxa de falha	
	Instruções em papel	RA	Instruções em papel	RA
1	108	50	10	0
2	30	15	10	0
3	45	37	0	5
4	126	82	10	5
5	20	10	5	1
6	30	15	15	0
7	86	46	2	4
8	32	18	4	1
9	5	1	0	0
10	45	12	20	5
11	156	108	15	10
12	360	250	35	16
13	420	276	30	15
14	155	107	10	2
15	149	114	10	2
Total	1767	1141	176	66
Average	117.8	76.06666667	11.73333333	4.4

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tendência mostrada nas Figuras 35 e 36 é que o tempo médio de conclusão das tarefas com RA é menor do que com as instruções em papel. A taxa média de falha do método tradicional de instrução em papel é 11,7% enquanto que a RA diminuiu para 4,4%.

Figura 35 – Tempo de *set-up* gasto usando instruções de papel e RA.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Taxa percentual de falha para RA e instrução em papel

No entanto, é necessário poder validar esta tendência, graças ao teste estatístico da análise de variância ou ANOVA.

É calculada uma ANOVA sobre a duração média, como variável a ser explicada, e com o suporte (RA ou papel) como variável explicativa. O resultado do teste para um fator de risco $\alpha = 0,05$ fornece um $p\text{-value}$ $0,5209 > 0,05$ (Figura 37).

Figura 37 – Resultados dos testes estatísticos: ANOVA

ANOVA sobre a duração média, como variável a ser explicada, e com o suporte como variável explicativa						
DESCRIÇÃO					Alpha	0.05
Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância	SS	Erro padrão
Gestão	21	28.06	1.34	0.02	0.48	0.05
Produção	21	55.56	2.65	0.10	1.90	0.05
ANOVA						
Sources	SS	df	MS	F	p-value	F crit
Entre grupos	18.01	1	18.01	$F(3, 20) = 0,874$	0,5209	4.08
Dentro dos grupos	2.39	40	0.06			
Total	20.39	41	0.50			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi realizado um *teste t* para H_1 ou seja, a hipótese de que as amostras comparadas não podem ser consideradas iguais, pois o valor calculado supera aquele que se deveria esperar, caso fossem iguais, lembrando sempre que a igualdade, em Estatística, não indica uma identidade. Este teste comparou os resultados recuperados durante a configuração das máquinas CMM e CNC (Figura 38):

Figura 38 – Teste t (produtividade e eficácia do tempo)

Tempo gasto			Taxa de falhas		
	Instruções em papel	RA		Instruções em papel	RA
Mean	117,8	76,06667	Mean	11,73333	4,4
Variance	15046,03	7265,781	Variance	103,9238	27,97143
Observations	15	15	Observations	15	15
Pearson Correlation	0,994014		Pearson Correlation	0,785089	
Hypothesized Mean Difference	0		Hypothesized Mean Difference	0	
df	14		df	14	
t Stat	4,138119		t Stat	4,132386	
P(T<=t) one-tail	0,000502		P(T<=t) one-tail	0,000508	
t Critical one-tail	1,76131		t Critical one-tail	1,76131	
P(T<=t) two-tail	0,001005		P(T<=t) two-tail	0,001016	
t Critical two-tail	2,144787		t Critical two-tail	2,144787	

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com os resultados apresentados, há significância estatística entre o tempo de montagem e entre a porcentagem da taxa de falha nas máquinas CMM e CNC com e sem RA. Consequentemente, a H_1 foi apoiada pelos resultados do estudo. Isso significa que o nível de desempenho dos operadores que usam o sistema RA proposto é maior do que o sistema tradicional. Uma taxa de falha mais baixa é indicativa de taxa de alto desempenho. Comparado ao método tradicional de instrução em papel, o método RA exigirá menos tempo para configurar e, portanto, reduzirá consideravelmente o tempo de inatividade.

Portanto, podemos supor que com um treinamento mais detalhado na aplicação RA e uma operação com menos etapas, as lacunas teriam aumentado entre as diferentes mídias; provavelmente teríamos visto uma diferença estatisticamente mais significativa. Deve-se notar, entretanto, que as ferramentas de RA são usadas instintivamente; embora os usuários não tenham sido treinados, eles foram capazes de realizar a operação em tempos equivalentes ao suporte convencional. Isso significa que o procedimento é, geralmente, melhor compreendido pelos operadores. Em outras palavras, a duração da operação é menos dependente do operador.

6.2.1 Resultados do teste de carga mental NASA-TLX

A boa avaliação da relação entre os critérios “desempenho” e “esforço” comprovam que a utilização da tecnologia de RA nos processos de *set-up*, mesmo quando os operadores não são previamente treinados, resulta em um nível de satisfação muito superior quando comparados ao uso de instruções em papel (Figura 39).

Figura 39 – Resultados teste de carga mental NASA-TLX

6.2.2 Resultados do feedback dos operadores

Para o critério “conforto”, a RA e a instrução em papel são classificados respectivamente 44% e 30% (Figura 40). Esse resultado é animador para a adoção das ferramentas baseadas em

RA, principalmente porque alguns operadores estavam configurando as máquinas pela primeira vez. Então, eles entenderam as tarefas e as realizaram com uma média de 78% de facilidade.

E finalmente, com base nas respostas da terceira questão, pode-se concluir que este tipo de aplicação para a RA encontrará pouca resistência quando implantada.

Figura 40 – Resultados do *feedback* dos operadores

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 Considerações finais

Foi comprovado portanto durante a realização deste estudo que a taxa média de falha do método tradicional de instrução em papel é 11,7% enquanto que a RA diminuiu para 4,4% embora os operadores não tenham sido previamente treinados no aplicativo de RA.

O tempo de operação com o uso de RA foi 13% mais rápido do que a mesma operação com o suporte de papel e a taxa de falha em instruções em papel foi próximo de 12% maior do que em RA.

Além disso, o estudo também propôs melhores práticas para o desenvolvimento de aplicações de RA para a realização de operações em sistemas industriais.

Este capítulo permitiu, em primeiro lugar, categorizar os critérios de avaliação do uso da RA para realizar operações de *set-up* em máquinas CNC e CMM. Essas categorias são: desempenho (duração, número de erros, ...), satisfação (carga mental, esforço) e comportamento (frustração).

Os resultados apresentados no presente capítulo devem ser vistos com reserva devido a quantidade reduzida de elementos amostrais que foram considerados. Entretanto, os dois estudos realizados mostraram que as tecnologias baseadas em RA podem ajudar a reduzir as despesas

relacionadas a inatividade e, principalmente, despesas relacionadas a possíveis colisões por erros do operador, seja devido ao mal entendimento da tarefa a realizar, seja pela falta de foco e atenção devido as exigências físicas e mentais da tarefa.

CONCLUSÃO

A tecnologia de realidade aumentada (RA) permite que os usuários experimentem um mundo aumentado ao sobrepor informações virtuais de coisas e objetos no mundo real. Com isso, o usuário pode estar em contato tanto com o mundo virtual quanto com o real.

Os resultados mostraram que RA e RV são impactantes de diferentes maneiras. Em média, os participantes concordaram que as novas necessidades do mercado levam as empresas a avançar em suas tecnologias.

Reconhece-se que a RA e a RV têm capacidade para melhorar os resultados das empresas, mas, para capitalizar os resultados positivos, é necessário que os funcionários tenham o conhecimento adequado. É necessário aumentar a colaboração e a transparência da gerência para os funcionários para garantir que todos tenham a oportunidade de desenvolver habilidades que possam levar ao aumento do uso de RA e RV. Em termos de desempenho e satisfação dos operadores, os principais resultados obtidos foram:

- a duração total da operação é a mesma independentemente do meio explicativo utilizado, embora os operadores ainda não tenham sido treinados em mídia de RA;
- partindo do pressuposto de que o meio RA apresenta imediatamente a informação necessária, pudemos evidenciar que o tempo de consulta da tarefa em RA é em média 33% mais curto que o tempo de consulta do manual em papel. Isso significa que o operador entende a tarefa em mãos mais rápido;
- o número de erros cometidos é reduzido graças à realidade aumentada. Por meio do estudo, observa-se que a RA evita os erros causados pela confusão das vistas dos desenhos em 2D, mesmo em perspectiva isométrica, já que a sobreposição de informações em RA indicava o lugar preciso para intervir.

Para a indústria 4.0, o uso de RA fornece uma abordagem que é capaz de representar informações relevantes do trabalho que operadores e técnicos estão realizando em tempo real. É um método adequado de operação de máquinas, pois torna muito fácil orientar o operador nos aspectos técnicos da operação de uma máquina.

Os resultados deste estudo observacional devem ser vistos com reserva devido suas limitações: as medidas de distanciamento social devido à pandemia, o que dificultou as interações com os participantes do estudo, e principalmente, a quantidade reduzida de elementos amostrais que foram considerados.

Entretanto, pode-se concluir que a RA orienta e auxilia os operadores durante os procedimentos de configuração, eliminando a tarefa de alternar entre as máquinas e consultar o manual de instrução em papel, uma vez que a tarefa pode ser realizada diretamente à tela em RA. Isso reduz o tempo necessário para a execução da tarefa e a porcentagem de falhas, além de influenciar positivamente o nível de desempenho e satisfação dos operadores devido a sua facilidade de uso.

Um dos participantes da segunda parte deste estudo está trabalhando desde maio de 2021 em uma empresa canadense de software de inspeção que está desenvolvendo um protótipo de aplicativo em RA que possui um vídeo demonstrativo que pode ser assistido neste link ¹.

Após uma divulgação deste trabalho por parte deste participante, um dos engenheiros de software e o gerente de produtos desta empresa contataram o autor deste trabalho e o convidaram a realizar um novo estudo de caso com seu protótipo.

Portanto, para este trabalho futuro (com previsão de início após o fim das restrições devido a pandemia), o autor realizará um estudo comparativo entre os dois aplicativos de RA e também um estudo qualitativo. Esse tipo de estudo será igualmente benéfico no desenvolvimento de novos métodos de *set-up* utilizando o protótipo desta empresa além de promover a inovação e aumentar o alcance estratégico da RA em outras etapas da cadeia produtiva.

¹ https://drive.google.com/file/d/1NH8aACibLVIIflylBszw420bnE_ifpe2

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBRISO9241-210 DE 08/2011 Ergonomia da interação humano-sistema - Parte 210: Projeto centrado no ser humano para sistemas interativos**. 2011. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=088057>>. Acesso em: 2020-05-13. Citado na página 68.

AMIN, D.; GOVILKAR, S. Comparative study of augmented reality sdk's. **International Journal on Computational Science Applications**, v. 5, p. 11–26, 02 2015. Citado na página 51.

ANTELO, R. **El impacto de Industria 4.0 en las fábricas**. 2016. Disponível em: <<https://www.thesmartcityjournal.com/es/home-es/tecnologia/1079-impacto-industria-4-0-fabricas>>. Acesso em: 2020-03-09. Citado na página 31.

AUTODESK. **G-Code: The CNC Programming Language**. 2018. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/cnc-programming-fundamentals-g-code/>>. Acesso em: 2020-06-13. Citado na página 36.

AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators & Virtual Environments**, MIT Press, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997. Citado na página 43.

BARTLETT, M. S.; FOWLER, R. H. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences**, v. 160, n. 901, p. 268–282, 1937. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1937.0109>>. Citado na página 69.

Billinghurst, M.; Poupyrev, I.; Kato, H.; May, R. Mixing realities in shared space: an augmented reality interface for collaborative computing. In: **2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. ICME2000. Proceedings. Latest Advances in the Fast Changing World of Multimedia (Cat. No.00TH8532)**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 1641–1644 vol.3. ISSN null. Citado na página 46.

BRITANNICA, T. E. of E. **Industrial Revolution**. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution>>. Acesso em: 2021-01-01. Citado na página 27.

BUNDESREGIERUNG, D. **Die neue Hightech-Strategie Innovationen für Deutschland**. 2014. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)>. Acesso em: 2019-03-09. Citado na página 29.

BüCHI, G.; CUGNO, M.; CASTAGNOLI, R. Smart factory performance and industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 150, p. 119790, 2020. ISSN 0040-1625. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004016251931217X>>. Citado na página 34.

CARICATO, P.; COLIZZI, L.; GNONI, M.; GRIECO, A.; GUERRIERI, A.; LANZILOTTO, A. Augmented reality applications in manufacturing: A multi-criteria decision model for performance analysis. **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**, v. 19, p. 754–759, 01 2014. Citado na página 24.

CARMIGNIANI, J.; FURHT, B. Augmented reality: an overview. In: **Handbook of augmented reality**. [S.l.]: Springer, 2011. p. 3–46. Citado nas páginas 24, 43, 44, 47, 48, 49, 50 e 52.

Caudell, T. P.; Mizell, D. W. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: **Proc. Twenty-Fifth Hawaii Int. Conf. System Sciences**. [S.l.: s.n.], 1992. ii, p. 659–669 vol.2. ISSN null. Citado na página 43.

Cazzolla, A.; Lanzilotti, R.; Roselli, T.; Rossano, V. Augmented reality to support education in industry 4.0. In: **Proc. 18th Int. Conf. Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. ISSN 2380-1603. Citado nas páginas 23 e 59.

CHEN, B.; WAN, J.; SHU, L.; LI, P.; MUKHERJEE, M.; YIN, B. Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. **IEEE Access**, v. 6, p. 6505–6519, 2018. Citado nas páginas 23 e 33.

CIEUTAT, J.-M. A few applications of augmented reality : New modes of information and communication technologies. effects on perception, cognition and action. 03 2013. Citado nas páginas 53 e 54.

DHL. **AUGMENTED REALITY IN LOGISTICS Changing the way we see logistics – a DHL perspective**. 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?time_continue=67&v=I8vYrAUb0BQ&feature=emb_title>. Acesso em: 2010-03-13. Citado na página 62.

DILBEROGLU, U. M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 545 – 554, 2017. ISSN 2351-9789. 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303529>>. Citado na página 33.

ENESEP. **ESTUDO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA MÁQUINAS CNC EM UM AMBIENTE DE FERRAMENTARIA**. 2009. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegeg2009_TN_STO_091_616_13525.pdf>. Acesso em: 2010-06-13. Citado na página 41.

Fraga-Lamas, P.; Fernández-Caramés, T. M.; Blanco-Novoa, ; Vilar-Montesinos, M. A. A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. **IEEE Access**, v. 6, p. 13358–13375, 2018. Citado na página 33.

GONZALEZ-FRANCO, M.; CERMERON, J.; LI, K.; PIZARRO, R.; THORN, J.; HANNAH, P.; HUTABARAT, W.; TIWARI, A.; BERMELL-GARCIA, P. Immersive augmented reality training for complex manufacturing scenarios. 02 2016. Citado na página 61.

GRABCAD. **Solidworks simulation library**. 2020. Disponível em: <https://grabcad.com/library?page=1&time=all_time&sort=recent&query=solidworks%20simulation>. Acesso em: 2020-06-13. Citado na página 37.

GRÖMPING, U. Using r and rstudio for data management, statistical analysis and graphics (2nd edition). **Journal of Statistical Software**, v. 68, 11 2015. Citado na página 69.

HARRIS, C. G.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. In: **Alvey Vision Conference**. [S.l.: s.n.], 1988. Citado nas páginas 47 e 48.

HART, S. G.; STAVELAND, L. E. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. In: HANCOCK, P. A.; MESHKATI, N. (Ed.). **Human Mental Workload**. North-Holland, 1988, (Advances in Psychology, v. 52). p. 139 – 183. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508623869>. Citado nas páginas 69, 70 e 71.

HERRMANN, F. The smart factory and its risks. **Systems**, v. 6, p. 38, 10 2018. Citado na página 35.

HEXAGON. **ESTUDO DE INDICADORES DE DESEMPENHO PARA MÁQUINAS CNC EM UM AMBIENTE DE FERRAMENTARIA**. 2020. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/solutions/technical-resources/metrology-101/intro-to-coordinate-metrology>. Acesso em: 2020-09-13. Citado na página 39.

INDUSTRIA, C. e. S. B. Ministério da. **As revoluções industriais**. 2019. Disponível em: <http://www.industria40.gov.br/>. Acesso em: 2020-09-09. Citado na página 28.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 – Securing the Future of German Manufacturing Industry**. München, 2013. Disponível em: http://forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_final_report.pdf. Citado na página 30.

KIRNER, C.; TORI, R. Introdução à realidade virtual, realidade misturada e hiper-realidade. **Realidade Virtual: Conceitos, Tecnologia e Tendências**. 1ed. São Paulo, v. 1, p. 3–20, 2004. Citado nas páginas 24, 43, 47, 48, 49, 50 e 52.

KREVELEN, R. V.; POELMAN, R. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. **International Journal of Virtual Reality (ISSN 1081-1451)**, v. 9, p. 1, 06 2010. Citado na página 56.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H.-G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business Information Systems Engineering: The International Journal of WIRTSCHAFTSINFORMATIK**, v. 6, n. 4, p. 239–242, 2014. Disponível em: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:spr:binfse:v:6:y:2014:i:4:p:239-242>. Citado na página 68.

LEE, J.; DAVARI, H.; SINGH, J.; PANDHARE, V. Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 18, p. 20 – 23, 2018. ISSN 2213-8463. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213846318301081>. Citado na página 32.

LEZZI, M.; LAZOI, M.; CORALLO, A. Cybersecurity for industry 4.0 in the current literature: A reference framework. **Computers in Industry**, v. 103, p. 97 – 110, 2018. ISSN 0166-3615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361518303658>. Citado na página 33.

MACHINING, E. V. **Swiss CAM machine simulation | Material removal is simulation in real-time**. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mw0dtI9Nonc>. Acesso em: 2020-06-13. Citado na página 37.

MARSOT, J.; GOVAERE, V. Prévention des risques en maintenance industrielle: apports et limites des techniques de réalité augmentée. In: **IHM '08**. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 60.

MARTINOV, G.; LJUBINOV, A.; MARTINOVA, L. Remote machine tool control and diagnostic based on web technologies. p. 351–356, 01 2013. Citado na página 24.

MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Trans. Information Systems**, vol. E77-D, no. 12, p. 1321–1329, 12 1994. Citado nas páginas 43 e 44.

MUSEUM, M. **Numerically Controlled Milling Machine, MIT Servomechanisms Lab, 1950s**. 2013. Disponível em: <<http://museum.mit.edu/150/86>>. Acesso em: 2020-11-11. Citado na página 36.

OPENCV. **Camera Calibration and 3D Reconstruction**. 1999. Disponível em: <https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html>. Acesso em: 2020-01-09. Citado na página 45.

OSE, S. Using excel and word to structure qualitative data. **Journal of Applied Social Science**, v. 10, 08 2016. Citado na página 69.

PARLIAMENT, E. **Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth**. 2015. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)>. Acesso em: 2019-03-09. Citado na página 31.

PEASE, W. An automatic machine tool. **Scientific American**, Scientific American, a division of Nature America, Inc., v. 187, n. 3, p. 101–115, 1952. ISSN 00368733, 19467087. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/24950784>>. Citado na página 36.

RIFKIN, J.; SILVA, M.; ROSA, M. **A Terceira Revolução Industrial**. M.BOOKS, 2000. ISBN 9788576801818. Disponível em: <<https://books.google.ca/books?id=AoVTLgEACAAJ>>. Citado nas páginas 25 e 35.

ROBINSON, J. Likert scale. In: _____. **Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 3620–3621. ISBN 978-94-007-0753-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5_1654>. Citado na página 69.

RöDEL, E. Fisher, r. a.: Statistical methods for research workers, 14. Aufl., oliver & boyd, edinburgh, london 1970. xiii, 362 s., 12 abb., 74 tab., 40 s. **Biometrische Zeitschrift**, v. 13, n. 6, p. 429–430, 1971. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bimj.19710130623>>. Citado na página 69.

SAKAKIBARA, S.; FLYNN, B. B.; SCHROEDER, R. G.; MORRIS, W. T. The impact of just-in-time manufacturing and its infrastructure on manufacturing performance. **Management Science**, v. 43, p. 1246–1257, 1997. Citado na página 28.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. **Procedia CIRP**, v. 52, p. 161–166, 12 2016. Citado na página 30.

SCHWAB, K.; MIRANDA, D. **A Quarta Revolução Industrial**. Edipro, 2019. ISBN 9788552100461. Disponível em: <<https://books.google.ca/books?id=XZSWDwAAQBAJ>>. Citado nas páginas 23, 25, 27, 28, 30, 32, 34 e 35.

SEMENTILLE, A.; AMÉRICO, M.; BELDA, F.; MARAR, J. F.; CUNHA, A. Arstudio. estúdio virtual para produção de conteúdos audiovisuais em realidade aumentada para tv digital. **Revista Tram[p]as de la comunicación y la cultura • ISSN 2314-274X**, 11 2013. Citado na página 46.

SHEHATA, A.; MOHAMMAD, S.; ABDALLAH, M.; RAGAB, M. A survey on hough transform, theory, techniques and applications. 02 2015. Citado na página 47.

SONY, M. Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. **Production Manufacturing Research**, v. 6, p. 416–432, 10 2018. Citado na página 33.

TANG, A.; OWEN, C.; BIOCCA, F.; MOU, W. Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. In: **Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2003. (CHI '03), p. 73–80. ISBN 1581136307. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/642611.642626>>. Citado na página 61.

TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. A. **Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada**. [S.l.]: Editora SBC, 2006. Citado nas páginas 24, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 50 e 52.

VICENTE, M. A. F. . **Constituição e funcionamento de uma máquina de medição de coordenadas**. 2000. Disponível em: <<http://www.mat.uc.pt/~engeo/cadeiras/ano3/mg/cmm.pdf>>. Acesso em: 2020-11-11. Citado nas páginas 38 e 39.

VOICE, B. the G. I. **Was ist Industrie 4.0?** 2019. Disponível em: <di.eu/artikel/news/was-ist-industrie-4-0/>. Acesso em: 2019-09-09. Citado na página 30.

WAHLSTER, H. K. u. W.-D. L. W. **Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution**. 2011. Disponível em: <https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf>. Acesso em: 2020-03-13. Citado na página 29.

WANG, S.; WAN, J.; LI, D.; ZHANG, C. Implementing smart factory of industrie 4.0: An outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2016, p. 1–10, 01 2016. Citado na página 30.

Werner Dankwort, C.; WEIDLICH, R.; GUENTHER, B.; BLAUROCK, J. E. Engineers' cax education—it's not only cad. **Computer-Aided Design**, v. 36, n. 14, p. 1439 – 1450, 2004. ISSN 0010-4485. CAD Education. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448504000491>>. Citado nas páginas 37 e 38.

WITKOWSKI, K. Internet of things, big data, industry 4.0 – innovative solutions in logistics and supply chains management. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 763 – 769, 2017. ISSN 1877-7058. 7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817313346>>. Citado na página 32.

Zúñiga, E. R.; Moris, M. U.; Syberfeldt, A. Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0. In: **2017 Winter Simulation Conference (WSC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 3828–3839. Citado na página 32.

CARTA-CONVITE PARA PARTICIPAÇÃO DA PESQUISA

Convite para participação do estudo **“Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (“set-up”) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira.”**.

Obrigado por reservar um tempo para ler esta carta e considerar permitir que seus funcionários participem da pesquisa.

A participação levará entre 15 e 20 minutos e envolve o preenchimento de um questionário. Peço que por favor o (a) Sr. (a) permita que os participantes usem um computador para preencher o questionário.

A digitalização e o desenvolvimento de novas tecnologias levaram à introdução da Indústria 4.0. Como consequência natural, essa introdução levou governos e empresas a perceberem que existem possibilidades de aumentar o lucro na produção industrial.

Por sua vez, as empresas investiram recursos no desenvolvimento de ferramentas para ampliar a competitividade em um mercado em constante mudança. Com base nesse cenário, o presente estudo enfatiza o uso de RA no contexto industrial. Para fazer isso, é importante saber como a RA pode ser usada por pessoas com e sem experiência com computadores.

O nome da empresa e dos participantes, não serão incluídos nos resultados finais. De fato, todos os resultados serão agregados e será impossível dizer quais empresas e funcionários participaram do estudo pois a identificação nos resultados será feita apenas com a indicação de “empresas da região”, garantindo o anonimato.

Ao final, irei analisar estatisticamente os dados e os resultados obtidos serão inseridos em minha dissertação de **Mestrado em Ciências da Computação do programa MECAI no**

ICMC-USP, São Carlos, SP - Brasil.

Peço que por favor o (a) Sr. (a) responda sua confirmação após ler e assinar o *Termo de consentimento livre e esclarecido para o estudo* que segue, sobre a participação de sua empresa e me envie neste e-mail: (endereço de e-mail do autor).

Obrigado pelo seu tempo.

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO PARA O ESTUDO

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

Formulário de Consentimento Livre e Esclarecido para o estudo intitulado: “**Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (“set-up”) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira.**”.

Propósito do estudo

A digitalização e o desenvolvimento de novas tecnologias levaram à introdução da Indústria 4.0. Como consequência natural, essa introdução levou governos e empresas a perceberem que existem possibilidades de aumentar o lucro na produção industrial. Por sua vez, as empresas investiram recursos no desenvolvimento de ferramentas para ampliar a competitividade em um mercado em constante mudança. Com base nessa base, o presente estudo enfatiza o uso de RA no contexto de sistemas industriais complexos. Para fazer isso, é importante saber como a AR pode ser usada por pessoas com e sem experiência com computadores.

Papel do Participante

Sua participação consiste em preencher um questionário conforme sua conveniência. Este questionário não deve demorar mais que 15 a 20 minutos do seu tempo. Se você deseja participar, seu empregador concordou em permitir o uso do computador no local de trabalho para preencher o questionário. Você também pode preencher o questionário em outro local, se preferir.

Direitos e responsabilidades dos participantes

Não haverá impacto do seu empregador se você decidir ou não participar. Seu empregador deu permissão para você participar e não é necessário para o emprego. Você é responsável por

fazer qualquer pergunta que possa ter. Você tem o direito de retirar sua participação a qualquer momento antes da publicação dos resultados. Para fazer isso, envie um e-mail para (e-mail) com a data e a declaração de retirada e seus resultados serão excluídos e não incluídos nos resultados finais. Todos os dados serão agregados, para que sua confidencialidade seja mantida. Os dados pessoais limitados são coletados e apenas para fins de localização dos resultados no caso de você retirar.

Garantias Éticas

Quando usadas no estudo, suas respostas serão agregadas (combinadas) com as de outros participantes. Isso significa que será impossível alguém contar suas respostas de outras pessoas. Quando você preencher o questionário, seus resultados serão armazenados com um número aleatório. Uma planilha será criada com esse número e seu nome. A razão para isso é que ele permitirá que o pesquisador exclua suas respostas se você decidir retirar sua participação do estudo. Todos os dados serão armazenados no Microsoft Excel, serão criptografados e salvos em um arquivo protegido por senha e em um pen drive protegido por senha. Após a conclusão do estudo e o período de tempo apropriado, o pendrive USB será limpo e o arquivo excluído permanentemente.

Acordo de Participação

Ao responder a este email com a data, meu nome e declaração de contrato, certifico que:

- Tenho mais de 18 anos e sou capaz de tomar decisões legais
- Sou funcionário atual de uma empresa participante.
- Compreendo os termos no formulário de consentimento informado.
- Tive a chance de fazer perguntas e as respondi para minha satisfação.
- Minha decisão de participar é totalmente voluntária.

QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

Instrumento de pesquisa para o estudo intitulado “Indústria 4.0: Análise da viabilidade do uso de métodos e ferramentas baseadas em RA como estratégia para diminuição do tempo de parada durante a configuração (*set-up*) de máquinas CNC e CMM na indústria manufatureira”.

Por favor, segundo sua opinião, forneça a resposta mais precisa possível. Lembre-se de que suas respostas serão agregadas.

Instruções gerais:

Para a parte 2, as questões estão relacionadas à sua empresa.

Para a parte 3: *Questionário da escala Likert*, os valores são de 1 a 7, onde:

1 = discordo totalmente;

2 = discordo;

3 = discordo em parte;

4 = não concordo nem discordo;

5 = concordo em parte;

6 = concordo;

7 = concordo totalmente.

Questionário de pesquisa para o estudo intitulado Indústria 4.0

Parte 1: Informações Demográficas

Com qual gênero o (a) Sr. (a) se identifica?	Masculino	
	Feminino	
Em qual faixa etária o (a) Sr. (a) está?	18 - 21	
	22 - 25	
	26 - 29	
	30 - 33	
	34 - 37	
	38 - 41	
	42 - 45	
	46 - 49	
	50+	
Na sua empresa, em que área o (a) Sr. (a) trabalha?	Gestão	
	Produção	
Há quanto tempo o (a) Sr. (a) trabalha nesta empresa?	< 6 meses	
	6 – 12 meses	
	1 – 3 anos	
	4 – 6 anos	
	7 – 9 anos	
	10 – 12 anos	
	13 – 15 anos	
O (a) Sr. (a) ocupa o mesmo cargo desde que começou a trabalhar nesta empresa?	15+ anos	
	Sim	
	Não	

Parte 2: Conhecimento da Indústria 4.0, Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV)

Qual das opções a seguir o (a) Sr. (a) concorda ser a melhor definição para a Indústria 4.0?	O uso de RA e RV durante o processo de produção.	
	A capacidade de interagir com aplicativos de RA e RV.	
	A otimização do setor industrial.	
Como o (a) Sr. (a) definiria a RA?	A capacidade de imergir e interagir em um ambiente computadorizado.	
	A capacidade de usar a tecnologia para criar realidades alternativas.	
	A capacidade de ver o mundo real com um modelo 3D projetado na imagem.	
Como o (a) Sr. (a) definiria a RV?	Uma simulação em computador que permite o desenvolvimento de um modelo.	
	Uma realidade baseada em computador.	
	Um mundo 3D interativo e hipotético no qual o usuário pode interagir.	

Parte 3: Questionário da escala Likert

	1	2	3	4	5	6	7
Novas necessidades de mercado levaram minha empresa a avançar em sua tecnologia.							
A nova tecnologia levou a uma nova visão digital dentro da empresa.							
A alta gerência da empresa tem sido transparente em relação às mudanças na visão digital.							
A transformação digital dentro da empresa é liderada por uma equipe especificamente dedicada.							
Os investimentos digitais são uma das principais prioridades da empresa e envolvem um orçamento financeiro separado.							
A empresa experimentou diferentes tecnologias para determinar a mais eficiente para os objetivos da empresa.							
A tecnologia digital tem sido benéfica na solução de problemas dentro da empresa.							
Os dados em tempo real estão disponíveis através de máquinas de produção conectadas, levando a uma melhor tomada de decisão no momento em que é necessário.							
Vários usuários têm acesso a uma plataforma que oferece visibilidade de todo o processo de produção usando RA e RV.							
As informações contidas na plataforma podem ser acessadas remotamente.							
A plataforma é atualizada automaticamente com base nas necessidades e decisões tomadas.							
Canais digitais permitiram uma colaboração aprimorada.							
A inovação tornou-se mais rápida como resultado das tecnologias digitais: RA e RV.							
A tecnologia digital é uma das principais ferramentas de alavancagem da empresa.							
As tecnologias de RA e RV levaram à introdução e implementação de modelos benéficos que melhoraram a produção da empresa.							
Me ofereceram treinamento em RA e RV.							
Estou confortável em usar RA e RV.							
As tecnologias de RA e RV levaram à automação de muitos processos dentro da empresa.							
Eu usei RA e RV extensivamente, pessoalmente ou no trabalho.							
O uso de RA e RV pode melhorar ou aumentar o conhecimento sobre processos de produção e quaisquer áreas de melhoria.							
Eu utilizo RA e RV para ajudar meu entendimento, levando a um desempenho aprimorado.							