

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**RENAN DUARTE DE LIMA**

**USO DE SCANNER 3D PARA O CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM  
PRODUÇÃO: ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO E SEUS IMPACTOS**

**São Paulo**

**2023**

Lima, Renan Duarte de.

Uso de scanner 3d para o controle dimensional de peças em produção: análise da implementação e seus impactos. / Renan Duarte de Lima. 2023.

61 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2023.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Scanner 3D. 2. Controle de qualidade. 3. Meio de medição. 4. Braço de medição.
- I. Rodrigues Pinto, Luiz Fernando. II. Título

CDU 658.5

**RENAN DUARTE DE LIMA**

**USO DE SCANNER 3D PARA O CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM  
PRODUÇÃO: ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO E SEUS IMPACTOS**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Produção da  
Universidade Nove de Julho -  
UNINOVE, como requisito para  
obtenção do título de mestre em  
Engenharia de Produção.

Prof. Luiz Fernando Rodrigues  
Pinto, Dr - Orientador

**São Paulo**

**2023**

**PARECER – EXAME DE DEFESA**

Parecer da Comissão Examinadora designada para o exame de defesa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção a qual se submeteu o aluno Renan Duarte de Lima.

Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Produção", com Dissertação intitulada **"USO DE SCANNER 3D PARA O CONTROLE DIMENSIONAL DE PEÇAS EM PRODUÇÃO: ANÁLISE DA IMPLEMENTAÇÃO E SEUS IMPACTOS"**, a Comissão Examinadora considerou o trabalho:

- Aprovado       Aprovado condicionalmente  
 Reprovado com direito a novo exame       Reprovado

**EXAMINADORES**

Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto - Uninove (Orientador)

---

Prof. Dr. Marcelo Nunes Fonseca – MACKENZIE (Membro Externo)

---

Prof. Dr. Marcos Antonio Gaspar – PPGI/Uninove (Membro Externo)

---

São Paulo, 19 de dezembro de 2023

## RESUMO

O aumento simultâneo da automação industrial, junto às exigências em relação às especificações e tolerâncias dos produtos, exigem maiores demandas em termos de qualidade segurada, produtividade e segurança, e novos métodos de medição surgiram para suprir tais necessidades: entre eles, a medição dimensional via scanner 3D. As pesquisas desenvolvidas até então demonstram os benefícios técnicos comparados à outros meios de medição disponíveis no mercado, porém não exploram os potenciais ganhos social, de acuracidade de medição, de capacidade produtiva e econômico que podem ser obtidos na implementação deste tipo de tecnologia. Este trabalho apresenta um estudo de caso em uma empresa de montagem de sistema pós-tratamento onde é realizado o comparativo entre esta tecnologia (scanner 3D) em relação à um meio de medição convencional (braço de medição tridimensional portátil). O objetivo deste estudo foi identificar e caracterizar os potenciais ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico com a utilização de medições via scanner 3D no ambiente de produção. Os resultados da pesquisa indicaram que, apesar do retorno sobre o investimento ser pouco atrativo, há a eliminação do alto risco ergonômico apresentado aos operadores na utilização do braço de medição. Além disso, a acuracidade do meio de medição em relação às características críticas do produto é significativamente mais alta: enquanto o braço de medição tridimensional possui uma repetibilidade e reproduzibilidade de 24,01% em sua pior característica medida (classificado apenas como condicionalmente capaz), o sistema de medição via robô com scanner 3D acoplado tem em sua pior característica avaliada uma variação de apenas 4,26%. Por fim, é possível demonstrar que, em termos de busca por novos produtos e negócios, o scanner 3D elimina uma eventual limitação em termos de capacidade do estágio de medição (aproximadamente 20.700 peças/ano do braço de medição tridimensional contra 69.100 peças/ano do scanner 3D). Este estudo busca estimular as organizações à pensarem em alternativas em relação aos potenciais ganhos de tecnologias da Indústria 4.0 em relação ao controle de qualidade dos processos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Scanner 3D, controle de qualidade, meio de medição, braço de medição.

## ABSTRACT

The simultaneous increasing of industrial automation and products requirements for specifications and tolerances expects higher quality assurance, productivity and safety, and new measurement methods emerged to supply these needs: among them the dimensional measurement using 3D scanner has arrived. The researches developed so far showed the technical benefits compared to different measurement methods available in the market but did not explore the potential social, measurement accuracy, production capacity and economic benefits the implementation of this kind of technology can bring to companies. This research shows a case study in an aftertreatment system manufacturer which compares this technology (3D scanner) related to a conventional measurement method (three-dimensional measurement arm) The study objective was identifying the potential social benefits, measurement accuracy, production capacity and economic throughout the measurement usage through 3D scanner in production environment. The research results showed that despite of return over investment being unattractive, it eliminated the high operator's ergonomics risk utilizing the measurement arm. Besides that, the measurement method accuracy related to the critical product features is substantially higher: three-dimensional measurement arm showed 24.01% as repeatability and reproducibility rate in its worst feature measured (just conditionally capable) while measurement system with robot plus 3D scanner showed only 4.26% (totally capable). Ultimately, it is possible to realize in terms of new products and businesses searching that scanner 3D eliminates a potential constraint for measurement station capacity (approximately 20,700 parts/year for measurement arm against 69,100 parts/year for 3D scanner). This study looked for stimulate companies to evaluate alternatives related to potential earnings from 4.0 Industry used for quality control of processes.

**KEYWORDS:** 3D scanner, quality control, measurement method, measurement arm

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 - Fluxo de informação das fases de uma revisão sistemática .....	36
Figura 2 - Etapas do estudo de caso .....	37
Figura 3 - Imagem ilustrativa do braço de medição tridimensional .....	41
Figura 4 - Imagem ilustrativa do sistema de robô com scanner 3D acoplado	41
Figura 5 - Partes do corpo avaliadas na análise ergonômica .....	43
Figura 6 - Análise ergonômica do posto de trabalho de medição .....	43

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resumo dos artigos.....	29
Tabela 2 - Combinação de palavras-chave .....	35
Tabela 3 - Comparativo da análise dos sistemas de medição.....	45
Tabela 4 - Redução do custo operacional .....	47
Tabela 5 - Custo total de energia elétrica .....	48
Tabela 6 – Custos e investimentos.....	49
Tabela 7 - Fluxo de caixa do scanner 3D .....	50
Tabela 8 - Fluxo de caixa do braço de medição .....	50
Tabela 9 - Novo fluxo de caixa do scanner 3D .....	52
Tabela 10 - Comparativo de VPL.....	53

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	11
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.3	OBJETIVOS .....	16
1.3.1	<i>Objetivo Específico.....</i>	16
1.4	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	17
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1	DEFINIÇÃO DE SCANNER 3D.....	19
2.2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	20
2.3	REVISÃO SISTEMÁTICA.....	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE PESQUISA .....</b>	<b>34</b>
3.2	MÉTODO PARA REVISÃO DA LITERATURA.....	34
3.3	MÉTODO DE ESTUDO DE CASO .....	37
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>40</b>
4.1	ESPECIFICAÇÕES DOS MEIOS DE MEDIÇÃO .....	40
4.2	ANÁLISE SOCIAL (ERGONÔMICA) DO PROCESSO .....	42
4.3	ANÁLISE DE ACURACIDADE DO MEIO DE MEDIÇÃO .....	44
4.4	CAPACIDADE PRODUTIVA DA MEDIÇÃO VIA ROBÔ COM SCANNER 3D .....	46
4.5	ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO.....	46
<b>5</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer pela oportunidade de ter esta experiência enriquecedora que é realizar um mestrado. Acredito que só quem passou por esse processo, se dedicou, desprendeu muitas horas e abdicou de diversas momentos sabe o quão desafiador e sacrificante é chegar até onde cheguei.

Em segundo lugar gostaria de agradecer às pessoas que sempre me apoiaram a seguir com meu objetivo e entender a importância deste importante passo: minha mãe, minha irmã e minha esposa. Além delas, gostaria de agradecer ao meu avô, por ter acreditado no meu potencial, lá atrás, e investido em mim para que me tornasse uma pessoa formada e apta para atingir meu objetivos.

Por fim, mas não mesmo importante, gostaria de agradecer ao meu orientador Luiz Fernando por ter sido sempre muito paciente, orientativo e criterioso durante toda esta caminhada.

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado a contextualização, a identificação do problema, perguntas de pesquisa, objetivos, justificativa e a estrutura da dissertação.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O aumento substancial da competitividade entre as empresas vem fazendo com que as mesmas busquem alternativas tecnológicas que possibilitem ganhos sociais, de qualidade, capacidade produtiva, econômicos de curto e longo prazo. Há diversas tecnologias que visam estes tipos de ganhos, e uma delas é voltada às medições realizadas para o controle de qualidade de processos fabris.

A atual tendência de robôs, automação, controle de qualidade e sua combinação estão levando o campo de metrologia à novos caminhos. O aumento da automação industrial com a simultânea redução das tolerâncias de produção exige maiores demandas em termos de qualidade assegurada. As medições precisam ser robustas, repetitivas, rastreáveis e ao mesmo tempo rápidas em um ambiente industrial. Os novos métodos propostos oferecem vantagens em termos de tempo de medição, resolução, medição sem contato e a possibilidade de medições que meios convencionais não são fisicamente capazes de alcançar (ZANGL *et al.*, 2021). Desvios dimensionais e geométricos podem levar a diversos problemas de qualidade relacionados à uma alta taxa de retrabalho ou refugo, redução no desempenho funcional do produto, falha de ferramental e paradas de linha inesperadas. Além disso, cerca de 60-70% das falhas encontradas durante o início de novos projetos estão relacionadas à variação dimensional (BABU *et al.*, 2019).

No passado, a deficiência mais relevante das técnicas de medições era o longo tempo até se ter todo o processo de medição concluído. Alguns métodos desenvolvidos ao longo do tempo eram impraticáveis dos pontos técnico e comercial, e o melhor indicador desta inicial falta de sucesso é o número de projetos iniciados e que nunca foram de fato concretizados. Desta forma, os recentes avanços em tecnologias de medição permitiram inspeções de superfícies não apenas com

métodos de contato como máquinas de medição de coordenadas (CMMs), mas também através de meios de medição sem contato (como scanners ópticos 3D) (BABU et al., 2019).

Segundo Józwik e Dziedzic (2021), métodos com contato são lentos e requerem pessoas qualificadas para utilizá-los. Técnicas de medição 3D possuem alta qualidade de dados, um alto números de pontos de medição – dando informações da superfície inteira do produto medido e comparação direta com os dados CAD.

Estes e outros ganhos tecnológicos ao longo do tempo permitiram com que estes novos meios de medição pudessem ser introduzidos dentro do próprio processo produtivo, sendo considerados inspeções em processo. Desta forma, este trabalho visa explorar estes meios de medições e seus benefícios.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

A medição via scanner 3D no ambiente de produção vem ganhando cada vez mais espaço nas pesquisas realizadas, principalmente por estar diretamente ligada às tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 e oferecer diversos benefícios às companhias que a adotam.

Dentro deste escopo, diversos autores buscaram explorar a Viabilidade Técnica da medição 3D no ambiente de produção. Zhuang et al. (2022) afirmaram que tecnologia gêmeo digital pode fazer o uso total de vantagens de baixo custo, alta eficiência e previsibilidade do espaço digital para fornecer uma solução viável a diversos problemas. Segundo Yi et al. (2022), a tecnologia de análise de tolerâncias de montagem tridimensional (3D) vem gradativamente se tornando um importante meio para prever a acurácia de montagem e verificação de qualidade das montagens mecânicas. Segundo Gotlih et al. (2022), o desenvolvimento e implementação dos gêmeos digitais que permitem a previsibilidade do comportamento dos processos físicos, serviços ou sistemas em um ambiente virtual vem aumentando constantemente no ambiente industrial. Yung et al. (2022) destacaram a utilização de avaliações não destrutivas, que vem sendo implantadas cada vez mais utilizando-se robôs autônomos, especialmente em ambientes desfavoráveis ou de acesso restrito.

Também, Józwik, Dziedzic (2021) exploraram um modelo de redes neurais artificiais que permitem a produção com alta qualidade com um número mínimo de escaneamento necessário na linha de produção. Gurjanov *et al.* (2021) abordou um método que engloba informação, medição e canais de sistemas ciberfísicos de controle.

A disponibilidade de melhores computadores e a possibilidade de utilizar modelos de gêmeos digitais apresentam uma oportunidade de estimar a qualidade do produto em paralelo ao processo real de produção. Desta forma, é possível eliminar ou ao menos reduzir o tempo de CMM para peças manufaturadas, uma vez que para componentes grandes, o pós-processo de metrologia pode custar até 25-50% do custo total da peça (KUSHWAHA *et al.*, 2021).

Zhang *et al.* (2021) desenvolveram um método preditivo com base na tecnologia gêmeo digital a fim de monitorar em tempo real a qualidade dos produtos sendo manufaturados na montagem de espaços naves. Ainda nesta linha de novas soluções, Santolamazza *et al.* (2020) propôs uma abordagem inovadora de aplicação de “sombra” digital em nuvem para garantir o controle de qualidade no processo de manufatura. Também, Yamasaki (2020) apresentou uma solução completa para sistemas de gestão 3D utilizando robôs e tecnologias de inteligência artificial.

Sinha *et al.* (2019) propuseram um modelo para estimar as variações nos erros de parâmetros de processos utilizando dados de medições de pontos de alta densidade na nuvem coletados por scanners ópticos 3D. Também, Tadeja *et al.* (2021) explorou a utilização de realidade virtual para suportar a análise de modelos fotogramétricos. Arvanitis *et al.* (2019) propuseram e compararam um método para melhorar a acurácia da representação física dos objetos scaneados através do mapeamento de saliências 3D.

Kurc *et al.* (2019) desenvolveram uma estratégia de medição com o objetivo de viabilizar tecnicamente a inspeção geométrica assistida por robôs no ramo de peças para aeronaves. Soderberg *et al.* (2018) atuou em obter um modelo de simulação com dados em tempo real para o controle de qualidade de componentes soldados. Também, Blake (2018) detalhou as tecnologias existentes para verificação de manufatura e documentação.

Felice e Petrillo (2014) focaram em obter um método de engenharia reversa baseado em um sistema estruturado de luz (câmeras). Já Shortis e Fraser (2013) exploraram os meios de medição 3D atuais. Ainda na linha de discutir a viabilidade técnica deste tipo de meio de medição, Danzl *et al.* (2011) analisou o desempenho do método de variação de foco (uma técnica de medição ótica 3D).

Atualmente, dispositivos digitais sem contato constituem uma boa alternativa em relação à máquinas de medição via coordenadas (CMMs) para inspeções em determinados tipos de peças (IULIANO *et al.*, 2010). Métodos óticos profilométricos e topográficos possuem um grande uso hoje em dia, como em medições de deformações, controle de qualidade do produto, medição de desgaste e diversos outros (POCHMON *et al.*, 2008).

Porém, algum dos métodos abordados precisam de melhorias. Munkelt *et al.* (2006) atuaram em corrigir algoritmos através de atualizações interativas que possibilitaram uma adaptação de possíveis inconsistências. Também, Kuhmstedt *et al.* (2005) apresentaram um novo método de auto calibração de sistemas de medição óticos 3D. Wolf *et al.* (2000) focaram seus esforços em otimizar o processo de medição a fim de se obter um melhor desempenho. Boesemann *et al.* (2000) trabalharam em um projeto de um novo sistema de medição ótico com foco na acuracidade das inspeções realizadas. Além destes estudos, Kuhmstedt *et al.* (1997) propuseram um sistema de medição 3D utilizando uma estrutura de iluminação capaz de eliminar os ruídos causados por sombras e luz excessivas por conta de reflexos e difrações na superfície do objeto.

Por fim, Ulmer *et al.* (1996) desenvolveram um sistema baseado em métodos holográficos e processamento de imagens para inspecionar e classificar superfícies metálicas para a avaliação de processos especiais de usinagem. Também, Berger e Schmidt (1994) trabalharam na viabilidade de implementação de uma tecnologia de automação na manufatura.

Alguns autores exploraram o tema de Precisão e Repetibilidade do Scanner 3D no ambiente de produção. Coetzee e Sonnendecker (2022) apresentaram um modelo de previsibilidade acurado que se adequa ao produto sendo produzido com base na tecnologia gêmeo digital. Também, Zangl *et al.* (2021) propuseram um método que oferece vantagens em termos de tempo de medição, resolução, medição sem contato

e a possibilidade de atingir pontos mais profundos nos furos inspecionados. Munkelt *et al.* (2020) apresentaram uma medição 3D com base na projeção de padrão ativa. Além dos estudos citados, Anderson *et al.* (2019) descreveram uma metodologia nova e inovativa de inspeção que combina o scaneamento a laser 3D, dados de metrologia precisa e resultado avançados de testes não destrutivos.

Ainda sobre Precisão e Repetibilidade do 3D, Fischer e Petz (2016) trabalharam em mitigar os impactos dos ruídos das câmeras utilizadas nos sistemas de medição óticos 3D. Também, Tuominen e Ilkka Niini (2008) apresentaram um método de verificação de acuracidade de sistemas de medição 3D na linha de produção com base em procedimentos de controle de qualidade. Brajlih *et al.* (2007) desenvolveram um teste de acuracidade de um determinado scanner ótico (ATOS™ II).

Diversos autores também exploraram o mesmo tema, porém com outro foco: a melhoria no processo de medição. Bauer *et al.* (2022) apresentaram uma abordagem capaz de reduzir significativamente a quantidade de projeções necessárias para inspeções. Também, Roveda *et al.* (2021) trabalharam em otimizar as posições utilizadas nos sistemas de visão. Tadeja *et al.* (2021) desenvolveram um estudo de caso qualitativo que mostrou que o método proposto (*gaze-supported bimanual interaction*) de modelos fotogramétricos 3D é uma modalidade promissora.

Ainda sobre Melhorias no Processo de Medição, Zorrer *et al.* (2019) propõem um sistema híbrido de suporte à tomada de decisões em relação aos retrabalhos necessários com base na análise dos dados de medição 3D. Também, Warmefjord *et al.* (2017) desenvolveram um conceito que descreve claramente quais dados de entrada são necessários e como devem ser coletados, armazenados e utilizados. Acko e Klobucar (2000) apresentaram um método alternativo de calibração dos artefatos utilizados na medição 3D.

Outros autores abordaram as diferenças técnicas entre meios de medição. Kritikos *et al.* (2022) realizaram a comparação qualitativa do escanamento obtido pelo scanner ótico 3D (*GOM ATOS Triple Scan II*) e o dispositivo METROMOM 1500 da empresa Zeiss. Também, Rausch *et al.* (2021) desenvolveram uma frente de trabalho que implanta e compara três abordagens diferentes de medições geométricas. Valigi *et al.* (2020) compararam o uso de scanner ótico 3D portátil com outros métodos 2D.

Ainda sobre as diferenças técnicas entre meios de medição, Muenstermann *et al.* (2017) apresentaram, discutiram e compararam as vantagens de sistemas baseados em DMD com outras abordagens. Por fim, Wan-tao *et al.* (2009) revisaram e compararam os dois principais métodos de geração de padrões senoidais.

Por fim, Babu *et al.* (2019) exploraram a redução no tempo de ciclo das medições no ambiente de produção. Eles apresentaram uma metodologia capaz de estimar todos os desvios da peça com base em uma medição parcial da mesma.

De modo geral, não foram identificados na literatura artigos que tenham analisado de forma abrangente todos os impactos da implementação deste tipo de tecnologia, tal como os possíveis ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômicos através de medições via scanner 3D no ambiente de produção.

Sendo assim, essa lacuna sugere a seguinte questão de pesquisa: quais são os impactos social, de qualidade, de capacidade produtiva e econômico na implementação e utilização do scanner 3D para medições no ambiente de produção?

### 1.3 OBJETIVOS

Com o intuito de responder ao problema de pesquisa levantado, o objetivo deste estudo foi identificar e caracterizar os potenciais ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico com a utilização de medições via scanner 3D no ambiente de produção. Este objetivo geral foi dividido em três objetivos específicos:

#### 1.3.1 Objetivo Específico

- Identificar nos artigos selecionados a abordagem utilizada e os resultados atingidos com o uso deste tipo de tecnologia;
- Desenvolver um estudo de caso no ambiente de produção;

- Identificar e avaliar os ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico obtidos com a medição via scanner 3D no processo produtivo.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Atualmente, o controle de qualidade de componentes é parte do processo de produção em cada área da indústria de engenharia (KRITIKOS *et al.*, 2022). A metrologia industrial de componentes mecânicos enfrentou recentemente uma revolução gradual através da aplicação de dispositivos óticos sem contatos na inspeção auxiliada por computador. Os métodos tradicionais de medição são lentos e normalmente requerem dispositivos de fixação customizados para suportar medições de peças complexas. Mesmo que a resolução dos scanners 3D ainda não seja comparáveis aos das CMMs, dispositivos digitais sem contato fornecem medições rápidas com alta densidade de pontos coletados (IULIANO *et al.*, 2010).

Babu *et al.* (2019) constatou que estações de inspeções 3D em processos produtivos possuem diversos benefícios, como a redução significativa no tempo médio para detecção de falhas, uma vez que o processo de detecção se torna em tempo real. Isso também elimina todo o processo de medição *offline*, que inclui a movimentação de peça para um laboratório de medição, planejamento e programação de medições e retorno de peças para a produção. Outro ganho é o aumento da frequência de inspeção para 100%, uma vez que medições *offline* exigem medições amostrais devido à seu alto tempo de ciclo.

Desta forma, a tecnologia de análise de tolerância 3D vem se tornando um importante meio para prever a acuracidade e verificação da qualidade de montagem (YI *et al.*, 2022). Além disso, inspeções visuais também são utilizadas para controle de qualidade, o que também causa uma grande perda de produtividade e se tornou um gargalo na produção (ZORRER *et al.*, 2019).

Por meio da implementação de inspeções automáticas via scanner 3D em processos produtivos, reduz-se também os riscos ergonômicos (ganho social) causados por medições através de outros sistemas utilizados na indústria (como braços tridimensionais de medição, que exigem dispositivos, bancadas,

procedimentos e comportamento adequado dos operadores para evitar danos ergonômicos ao longo do tempo).

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho apresentado está dividido em 6 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Capítulo 3 – Metodologia de Pesquisa

Capítulo 4 – Estudo de Caso

Capítulo 5 – Discussão de Resultados

Capítulo 6 – Conclusão

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa da pesquisa foi realizada a busca nas bases em busca dos artigos que abordam o tema em questão.

### 2.1 DEFINIÇÃO DE SCANNER 3D

Muenstermann *et al.* (2017) define os scanners óticos 3D como uma medição sem contato das coordenadas da superfície de um objeto. Embora o termo sugira um tipo de rastreamento em sequência como um laser navegando por toda a superfície, é um termo amplamente usado para vários tipos de equipamentos de medição baseado na coleta de imagens. O exato conhecimento da posição da câmera e ângulos de visualização são fundamentais para a determinação precisa dos pontos do objeto. Além disto, a confiabilidade do sistema de scanner 3D está diretamente ligado à estabilidade mecânica do conjunto de componentes óticos.

Kuhmstedt *et al.* (2005) também explica que através da comparação dos pontos 3D medidos e o modelo CAD é possível detectar os desvios da forma, obtendo a diferença entre a dimensão desejada (CAD) em relação à dimensão atual encontrada (3D).

Sinha *et al.* (2019) constatou que scanners óticos 3D possuem a capacidade de medir nuvens de pontos de alta densidade em uma área relativamente grande em um curto espaço de tempo.

Segundo Kuhmstedt *et al.* (2005), os sistemas de medições óticas 3D atingiram um ponto em que, combinado com ferramentas de softwares para análise de dados, podem realizar diferentes tarefas em um ambiente de produção. Estes sistemas possuem uma auto calibração (sem necessidade de procedimentos de calibração adicionais), que consequentemente torna o sistema independente em relação às influências do ambiente. Isto favorece o fato de ter a medição diretamente integrada ao processo de fabricação, independente do ambiente de medição.

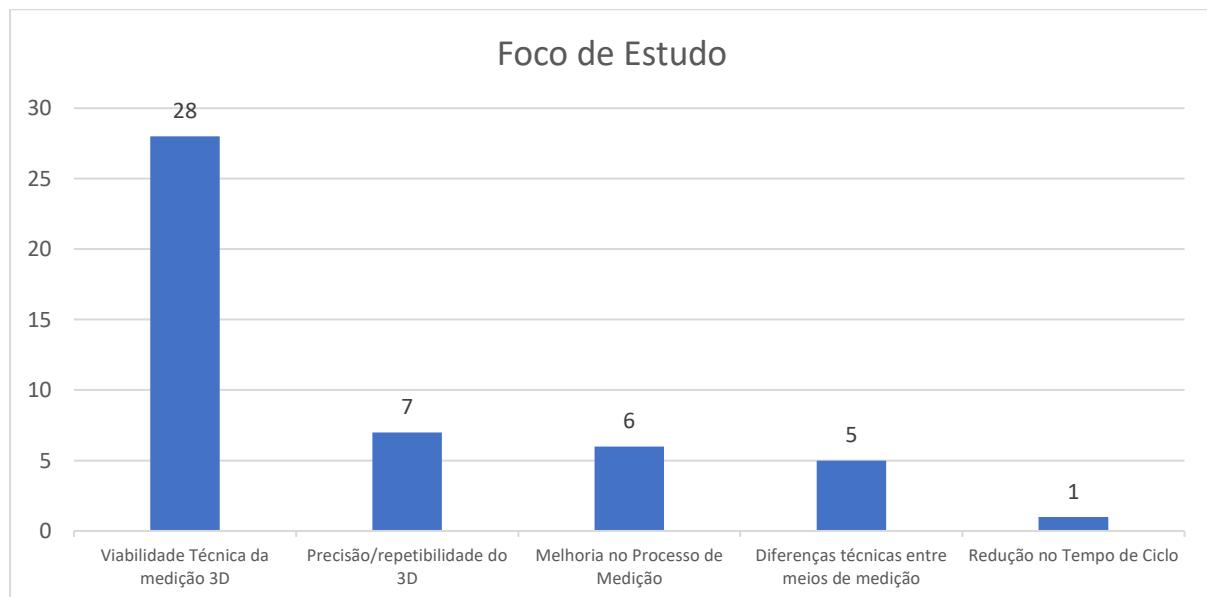
## 2.2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Na fase de planejamento desta pesquisa, foram estabelecidos parâmetros para realizar a busca na literatura dos artigos publicados que abordassem o tema de ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico em relação à medição 3D scanner no ambiente de produção. Desta forma, foram definidas as palavras-chave e suas cognatas, assim como as bases de busca e critério de seleção para a revisão sistemática.

As palavras selecionadas para busca de artigos foram: medição ótica 3D, controle de qualidade, scanner ótico 3D e inspeção. Na sequência, seguem os resultados dos dados biométricos que estão relacionados aos 47 artigos selecionados e que estão alinhados com a medição via scanner 3D no ambiente de produção.

Os artigos selecionados estão concentrados em diferentes focos: vinte e oito estudos focados em viabilidade técnica de medição 3D, sete estudos voltados à precisão e repetibilidade do 3D, seis artigos com foco na melhoria do processo de medição, cinco estudos voltados às diferenças técnicas entre meios de medição e um único artigo focando na redução do tempo de ciclo. A distribuição dos artigos por foco dos estudos é demonstrada no gráfico 1.

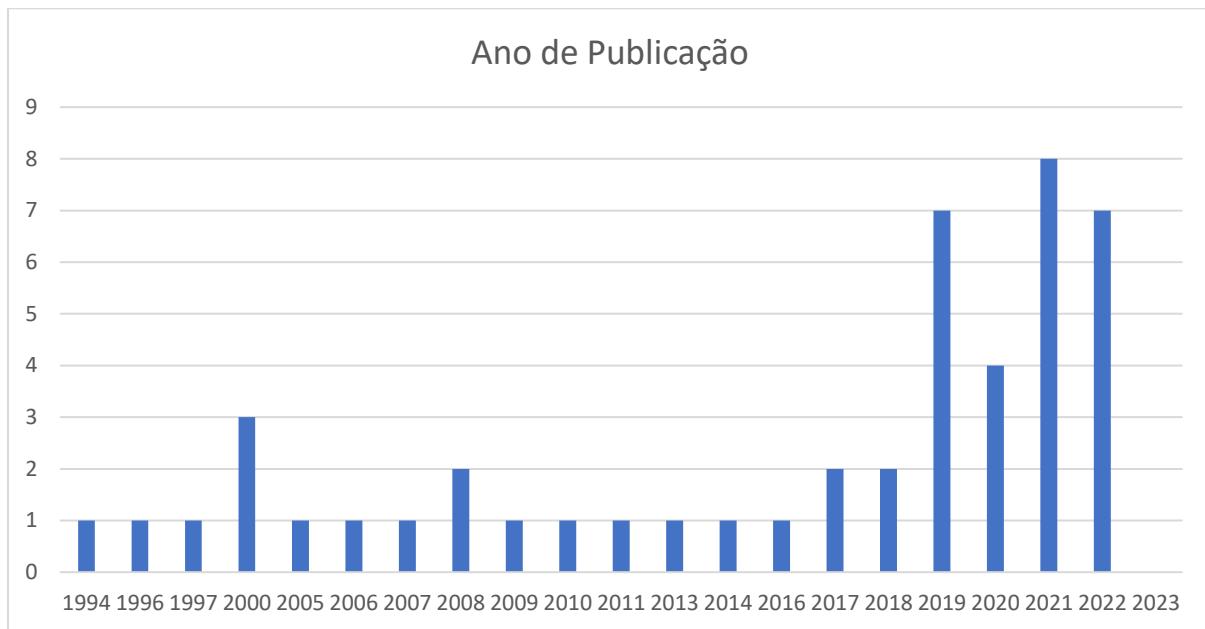
*Gráfico 1 - Quantidade de publicações representadas por foco dos estudos.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não foi definido um período específico para seleção dos artigos. O período de publicação dos artigos foi entre 1994 e 2023, tendo uma maior quantidade entre os anos de 2019 e 2022. A pesquisa nas bases de dados foi concluída em agosto de 2023. A distribuição dos artigos por ano de publicação estão apresentadas no gráfico 2.

Gráfico 2 - *Quantidade de publicações representadas por ano.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na distribuição dos artigos selecionados por país de publicação, nota-se que existe uma maior concentração de artigos publicados na Alemanha. Provavelmente, isso demonstra um maior interesse de estudos no assunto em relação aos outros países. A distribuição das publicações por país é demonstrada no gráfico 3.

Gráfico 3 - Quantidade de publicações representadas por país.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados acima levantados, é possível notar que o foco da grande maioria dos artigos está em viabilizar tecnicamente novos métodos de medição 3D, com o intuito de se descobrir formas mais eficientes, precisas e menos custosas em meio ao cenário atual de alta competitividade entre as empresas.

Também é perceptível o relevante aumento de pesquisas neste campo nos últimos anos. Isso indica que é cada vez mais frequente o interesse do mercado neste tipo de tecnologia, visto os inúmeros benefícios identificados até então.

Por fim, evidencia-se que a Alemanha se destaca por ser o país com mais pesquisas neste campo. Parte deste interesse se justifica por algumas das principais empresas voltadas à meios de medição se localizarem de fato no país.

## 2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão sistemática dos artigos selecionados na literatura possibilitou a construção da base teórica desta dissertação. Nesta seção será apresentado um breve resumo dos artigos encontrados na literatura, nos quais foram agrupados com base no foco de cada um deles.

Dentre os 47 artigos que de fato possuem correlação com o tema proposto, 28 deles tiveram como foco o estudo de Viabilidade Técnica de Medição 3D. Basicamente, os autores buscaram validar um determinado método de medição 3D, muita das vezes realizando um comparativo entre o método proposto versus um método já validado e utilizado na indústria.

Foi proposto por Zhuang *et al.* (2022) um sistema de gestão da qualidade baseado no conceito de gêmeo digital, no qual melhora a eficiência do processo de montagem de produção de pequenos lotes, bem como reduz as anormalidades de qualidade. Yi *et al.* (2022) apresentaram a eficácia e viabilidade de um método de análise de tolerâncias de montagem considerando erros de forma e conexões paralelas parciais com acurácia de montagem e confiabilidade. Yung *et al.* (2022) demonstraram um eficiente sistema de inspeção total que integra um sistema de câmera estéreo montável por robô junto a uma sonda de transdução acústica eletromagnético (EMAT) e um sistema de avaliação não destrutiva (NDE) de aquisição de dados sem fio. Gotlih *et al.* (2022) apresentaram o desenvolvimento e a acuracidade de um software baseado nos gêmeos digitais de uma célula robótica utilizando a inspeção via braço robótico UR5.

Ainda sobre Viabilidade Técnica de Medição 3D, o uso de redes neurais artificiais permitem a produção de peças com uma melhor acuracidade e qualidade com o mínimo número de peças medidas (3D) na linha de produção (Józwik e Dziedzic, 2021). Gurjanov *et al.* (2021) apresentaram um modelo preciso de informação, medição e controle de canais de sistemas ciberfísicos que suporta a tecnologia de visão de máquina para controlar a qualidade dos itens produzidos. Kushwaha *et al.* (2021) descreveram uma abordagem efetiva de estimativa de qualidade em tempo real no corte de metais que eliminar ou reduz o tempo de medição na CMM para peças manufaturadas. Zhang *et al.* (2021) validaram um

método de monitoramento e previsão de qualidade na montagem baseado na tecnologia de gêmeos digitais.

Yamasaki (2020) demonstrou um modelo sustentável focado na manutenção e gestão dos dados de medição 3D utilizando robôs e tecnologia de inteligência artificial. Apesar de ter se demonstrada uma metodologia acurada e útil, ainda há espaço para novas pesquisas e avanços em termos de eficiência. Santolamazza *et al.* (2020) apresentaram um procedimento inovativo para o controle de qualidade baseado na atualização da nominal do modelo CAE (*Computer-aided engineering*) em relação a peça atual manufaturada. Esta metodologia poderia tornar possível a qualificação de peças até mesmo não conforme, mudando-se o foco no atendimento de tolerâncias para atendimento de requerimentos de aplicação e uso. Kurc *et al.* (2019) apresentaram e validaram uma estratégia eficaz de medição de inspeção geométrica assistida por robô.

Segundo Sinha *et al.* (2019), o modelo *PointDevNet* estima a variação dos parâmetros de processo de medição 3D e é capaz de diagnosticar os sistemas de montagem considerando as interações de múltiplas causa raízes e ruídos de medição de forma eficaz. Este modelo é capaz de reduzir o tempo de parada de linha e aumentar a produtividade. Tadeja *et al.* (2021) demonstraram a viabilidade de um sistema de controle imersivo para manipulação e inspeção de modelos fotogramétricos 3D de objetos físicos em realidade virtual. A análise de dados sugeriu novas pesquisas nestes âmbitos para obter-se um melhor refinamento da ferramenta. O artigo de Arvanitis *et al.* (2019) propôs e validou um método de mapeamento de saliências (*saliency mapping method*) idealmente criado para modelos 3D industriais com características geométricas de pequenas escalas.

Também, Soderberg *et al.* (2018) afirmaram que a configuração de gêmeo digital com conceito de simulação soldagem rápida (*SCV-method*) em combinação com atividades de garantia de geometria apresenta um aumento na qualidade do produto sem que seja necessário uma redução nas tolerâncias do produto ou aumento de custo de usinagem. Blake (2018) detalhou um processo existente de verificação de manufatura, no qual utiliza os dados gerados pela tecnologia de inspeção automática para criar uma representação 3D do componente produzido em tempo real. Como resultado, constatou-se desenvolvimentos ainda necessários para

implementação efetiva deste conceito. Felice, Petrillo (2014) apresentou um método voltado para a engenharia reversa dos produtos medidos via sistema ótico 3D, propondo possíveis soluções que aumentam a qualidade do produto, bem como oferece redução de custos substanciais no sistema de produção.

Também, Shortis e Fraser (2013) avaliaram a capacidade e as faixas de aplicação dos sistemas fotogramétricos e não convencionais, prevendo as implicações e impactos da utilização destes métodos no futuro da indústria. Seu trabalho servirá para futuras pesquisas com este foco. O trabalho de Danzl *et al.* (2011) focou em descrever e avaliar um método de variação de foco (*focus variation method*), analisando e validando a eficiência e repetibilidade deste método através do desempenho do mesmo em diversas medições típicas (medição de rugosidade, forma e desgaste). Pochmon *et al.* (2008) definiram o procedimento de cálculo de novos parâmetros de métodos óticos 3D para reduzir o grande erro de medição dos projetores de dados utilizados para pequenos objetos. Luca Iuliano *et al.* (2010) detalhou o comparativo de desempenho de diversos dispositivos digitalizados sem contato, considerando tolerâncias dimensionais e geométricas, bem como diversos critérios quantitativos e quantitativos.

Ainda sobre Viabilidade Técnica de Medição 3D, Munkelt *et al.* (2006) demonstraram resultados promissores em testes utilizando simulações de raios de projeções de faixas, indicando que atualizações interativas deste modelo habilitaria a adaptação de possíveis inconsistências. Kuhmstedt *et al.* (2005) criaram um novo método de auto calibração de sistemas de medição 3D usando uma técnica de projeção de faixas (“*kolibri 1500*”) para ser utilizado em grandes objetos. Boesemann *et al.* (2000) validaram um novo sistema ótico (fotogramétrico) de medição para a avaliação de componentes de chapas de metal em termos de acuracidade de forma. Wolf *et al.* (2000) apresentaram uma abordagem CAQ (*Computer-Aided Quality*) avançada que compara eficientemente objetos de manufatura com dados de referência de modelos CAD (*Computer-Aided Design*).

Segundo Kuhmstedt *et al.* (1997), sistemas de medição 3D que utilizam iluminação de luz estruturada (*structured-light illumination*) tem a capacidade de evitar dificuldades causadas pela iluminação, como sombras, intensidades de luz excessivas (reflexo de luz) e difração na superfície do objeto. Ulmer *et al.* (1996)

apresentaram o desenvolvimento de um sistema baseado em métodos holográficos e processamento de imagens para inspecionar e classificar superfícies metálicas para a avaliação da qualidade de processos especiais de usinagem. Berger e Schmidt (1994) demonstraram a implementação da iluminação estruturada ativa (*active structured lightning*) da medição ótica 3D utilizando projetores LCD, descrevendo e validando o conceito de abordagem de luz codificada (*coded light approach*) e o método de mudança de fase (*phase shifthing method*) para a aquisição de dados 3D.

Outro tema explorado pelos autores de artigos voltados à medição 3D no ambiente produtivo foi a Precisão e Repetibilidade de Medição 3D. Foram ao todo 7 artigos que abordaram este tema, os quais em sua maioria buscaram o comparativo com algum outro meio já validado.

Coetzee e Sonnendecker (2022) desenvolveram um método capaz de rastrear o material através do processo de medição, assegurando a acuracidade de modelos de previsibilidade deste processo através deste tipo de tecnologia. Com este método, houve uma redução do desvio padrão de 1.39% para 1.24% no processo de carvão de coque semi-mole. Zang *et al.* (2021) viabilizaram e demonstraram a medição 3D de alta precisão para furos de resfriamento de lâminas das turbinas através da força e do alto potencial da tecnologia apresentada (*vertical focus probing*). Também, Munkelt *et al.* (2020) afirmaram que sistemas de medição com base no padrão baseado em forma livre (*freeform-based pattern*) aumentam a velocidade da medição 3D contínuas, aumentando a eficiência do padrão de projeção de alta acurácia e realocando uma porção da computação necessária do computador principal para os módulos dos sensores. Anderson *et al.* (2019) abordaram uma técnica de inspeção inovadora que pode definir um novo padrão de como os dados são capturados, armazenados e apresentados. Esta ferramenta apresentada tem o potencial de otimizar a tomada de decisão, prevenir ou reduzir falhas catastróficas, reduzir o impacto ambiental e assegurar a integridade e confiabilidade dos equipamentos.

Também, Fishcer e Petz (2016) exploraram uma abordagem de estimativa de desvios de coordenadas estocáticos, causados pelo ruído de medição da câmera nos sistemas de medição óticos 3D. O erro de precisão desta estimativa apresentada é menor que 10%, o que pode ser vista como viável para aplicações práticas. Tuominen e Ilkka Niini (2008) apresentaram um método de verificação que comprova

a acurácia do sistema de medição ótico 3D, com base em um estudo empírico seguindo as diretrizes da VDI/VDE 2643. Brajlih *et al.* (2007) compararam de forma efetiva a acurácia de três diferentes formas de medição do scanner ótico da marca ATOS™. Para este propósito, a peça de teste foi comparada aos dados de medição coletados pela máquina de medições via coordenadas ZEISS UMC 850™.

Diversos autores buscaram aprofundar sua pesquisas voltando seu foco para encontrar Melhorias no Processo de Medição 3D. No total, foram encontrados 6 artigos abordando este tema.

Bauer *et al.* (2022) desenvolveram uma abordagem para mitigar o tempo necessário de escaneamento de componentes automotivos através de um conceito que customiza a rota de medição de acordo com o objeto em questão. O resultado foi uma redução de aproximadamente 55% do número de projeção requeridas e aumento na qualidade da imagem em aproximadamente 40%. Roveda *et al.* (2021) descreveram e validaram um modelo robusto de otimização do posicionamento da câmera de detecção dos objetos inspecionados. Segundo Tadeja *et al.* (2021), conceitos de medição com interação bimanual com suporte de visão (*gaze-supported bimanual interaction*) são de fato uma modalidade promissora para este tipo de tecnologia.

Ainda sobre Melhorias no Processo de Medição 3D, Zorrer *et al.* (2019) apresentaram um sistema híbrido de suporte à tomada de decisões (DSS) que combina a aplicação do software que visualiza os dados 3D coletados e suporta a execução de decisões de retrabalho através de um painel analítico de negócios alojado na internet. A proposta pode ser facilmente customizada para integrar dados adicionais do costumeiro aumento de dados no setor da indústria. Warmefjord (2017) propôs uma estratégia de inspeção com base no conceito 3D que melhora a gestão dos dados coletados para otimizar a produção (incluindo coleta, armazenamento e disposição dos dados). Acko e Klobucar (2000) desenvolveram um procedimento de calibração com incerteza de medição aprovado e acreditado por uma organização de acreditação nacional. Este procedimento foi criado com base em um artefato de calibração ótico 3D, além de uma esfera tetraédrica padrão e um método de calibração de sistemas de medição óticos 3D.

Uma outra frente explorada pelos autores foi a diferença técnica entre os conceitos meios de medição 3D. Basicamente, a intenção deste autores era realizar um comparativo dentre os conceitos deste tipo de tecnologia.

Kritikos *et al.* (2022) realizaram o estudo de comparação de acuracidade entre o escaneamento obtido do meio de medição ótico GOM ATOS Triple Scan II e o dispositivo CT METROMOM 1500, onde demonstraram que o segundo meio de medição se mostrou mais preciso do que o primeiro citado. Rausch *et al.* (2021) desenvolveram uma estrutura de implantação e comparação de três abordagens distintas de gêmeo digital geométrico (*gDT*) para utilização durante fabricação e montagem na manufatura. O resultado foi a definição de que o conceito *scan-vs-BIM* é a abordagem mais precisa.

Valigi *et al.* (2020) realizaram o comparativo entre um scanner ótico 3D portátil com um método de medição 2D, onde demonstraram que a aplicação do conceito 3D provê resultados consistentes com a tecnologia 2D, porém proporciona informações mais completas e uma visão geral da análise de desgaste de peças. Também, (Muenstermann *et al.* (2017) afirmaram que sistemas baseados em DMD (dispositivos digitais de micro espelhamento) possuem uma clara vantagem frente a outros sistemas devido à sua boa repetibilidade e uso flexível de diferentes cores de projeção. Wan-tao *et al.* (2009) revisaram o método de geração da projeção do padrão senoidal e contrastaram as duas principais abordagens deste conceito baseado na perfilometria da medição. Por fim, foi apresentada algumas sugestões na utilização deste tipo de metodologia.

Dentre os artigos explorados, houve um único que focou na redução do tempo de ciclo no processo de medição 3D. Babu *et al.* (2019) desenvolveram uma metodologia com base no conceito de amostragem adaptativa espaço-temporal que resultou em um erro de 3 sigmas na predição dos desvios de uma peça medindo apenas 33% de sua superfície. Este conceito apresentou uma redução no tempo de ciclo em 42,2%.

O resumo da pesquisa dos artigos pode ser encontrado na Tabela 1:

Tabela 1 - Resumo dos artigos

#	Ano	Título do Artigo	País	Autor	Abordagem
1	2022	Digital Twin-based Quality Management Method for the Assembly Process of Aerospace Products with the Grey-Markov Model and Apriori Algorithm	China	Zhuang et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
2	2022	A novel assembly tolerance analysis method considering form errors and partial parallel connections	China	Yi et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
3	2022	Visually Encoded Contact Inspection System for EMATs	Reino Unido	Yung et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
4	2022	Design of a Digital Twin of a Robotic Cell for Product Quality Control	Eslovênia	Gotlih et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
5	2021	Digital Shape and Geometric Dimension Analysis of Polymer Fuel Tanks	Polônia	Józwik, Dziedzic	Viabilidade Técnica da medição 3D
6	2021	Total quality control of the cyber-physical production using machine vision technologies	Russia	Gurjanov et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
7	2021	Process-parallel quality estimation	Bélgica	Kushwaha et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
8	2021	Spacecraft assembly quality control and prediction technology based on digital twin	China	Zhang et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
9	2021	Measurement and Inspection of Photo-Realistic 3-D VR Models	Reino Unido	Tadeja et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
10	2020	A Digital Shadow cloud-based application to enhance quality control in manufacturing	Itália	Santolamazza et al	Viabilidade Técnica da medição 3D

11	2020	Digital twin technology utilizing robots and deep learning	Japão	Yamasaki	Viabilidade Técnica da medição 3D
12	2019	3D convolutional Neural networks to estimate assembly process parameters using 3D point-clouds	Reino Unido	Sinha et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
13	2019	Saliency mapping for processing 3D Meshes in industrial modeling applications	Grécia	Arvanitis et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
14	2019	Non-contact robotic measurement of jet engine components with 3D optical scanner and UTT method	Polônia	Kurc et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
15	2018	An information and simulation framework for increased quality in welded components	Suíça	Soderberg et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
16	2018	Manufacturing verification and documentation: Catching up with digital design tools	Estados Unidos	Blake, S.	Viabilidade Técnica da medição 3D
17	2014	Shape measurement based on 3d optical scanner: Real case study in the aeronautics industry	Itália	Felice, Petrillo	Viabilidade Técnica da medição 3D
18	2013	Current trends in close-range optical 3D measurement for industrial and engineering applications	Australia	Shortis, Fraser	Viabilidade Técnica da medição 3D
19	2011	Focus variation - A robust technology for high resolution optical 3D surface metrology	Austria	Danzl et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
20	2010	Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers	Itália	Luca Iuliano et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
21	2008	Construction modification of data-projector for optical 3D measurement	República Tcheca	Pochmon et al	Viabilidade Técnica da medição 3D
22	2006	Incorporation of a-priori information in planning the next best view	Alemanha	Munkelt et al	Viabilidade Técnica da medição 3D

23	2005	Optical 3D sensor for large objects in industrial application	Alemanha	Kuhmstedt et al	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
24	2000	Approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology	Alemanha	Wolf et al	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
25	2000	Photogrammetric measurement techniques for quality control in sheet metal forming	Alemanha	Boesemann et al	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
26	1997	Full-hemisphere automatic optical 3D measurement system	Alemanha	Kuhmstedt et al	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
27	1996	Inspection of honed surfaces by conoscopic and image processing methods	Alemanha	Ulmer et al	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
28	1994	Optical system for robot based one-of-a-kind manufacturing	Alemanha	Berger, Schmidt	Viabilidade da medição 3D	Técnica	da
29	2022	Fully automated coal quality control using digital twin material tracking and statistical model predictive control for yield optimization during production of semi soft coking- and station coal	África do Sul	Coetzee, Sonnendecker	Precisão/repetibilidade do 3D		
30	2021	Optical 3D measurement of cooling holes in gas turbine and aircraft engines	Austria	Zangl et al	Precisão/repetibilidade do 3D		
31	2020	Continuous low-latency 3D measurements using efficient freeform GOBO pattern projection and close-to-sensor image rectification	Alemanha	Munkelt et al	Precisão/repetibilidade do 3D		
32	2019	Innovative digital inspection methods	Estados Unidos	Anderson et al	Precisão/repetibilidade do 3D		
33	2016	Model-based noise prediction for fringe projection systems - A tool for the statistical analysis of evaluation algorithms	Alemanha	Fischer, Petz	Precisão/repetibilidade do 3D		
34	2008	Verification of the accuracy of a real-Time optical 3D-measuring system on production line	Finlândia	Tuominen, Ilkka Niini	Precisão/repetibilidade do 3D		
35	2007	Testing the accuracy of atos™ 3D optical scanner measuring volumes	Austria	Brajlih et al	Precisão/repetibilidade do 3D		

36	2022	Practical Part-Specific Trajectory Optimization for Robot-Guided Inspection via Computed Tomography	Alemanha	Bauer et al	Melhoria no Processo de Medição
37	2021	Robot End-Effector Mounted Camera Pose Optimization in Object Detection-Based Tasks	Suíça	Roveda et al	Melhoria no Processo de Medição
38	2021	Exploring gestural input for engineering surveys of real-life structures in virtual reality using photogrammetric 3D models	Reino Unido	Tadeja et al	Melhoria no Processo de Medição
39	2019	Using Business Analytics for Decision Support in Zero Defect Manufacturing of Composite Parts in the Aerospace Industry	Austria	Zorrer et al	Melhoria no Processo de Medição
40	2017	Inspection data to support a Digital Twin for geometry assurance	Suécia	Warmefjord et al	Melhoria no Processo de Medição
41	2000	Metrological approach for testing performance of optical 3D measurement systems	Eslovênia	Acko, Klobucar	Melhoria no Processo de Medição
42	2022	Comparison of Optical Scanner and Computed Tomography Scan Accuracy	Eslováquia	Kritikos et al	Diferenças técnicas entre meios de medição
43	2021	Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing	Canadá	Rausch et al	Diferenças técnicas entre meios de medição
44	2020	Experimental evaluation of tramway track wear by means of 3D metrological optical scanners	Itália	Valigi et al	Diferenças técnicas entre meios de medição
45	2017	Advanced optical 3D scanners using DMD technology	Alemanha	Muenstermann et al	Diferenças técnicas entre meios de medição
46	2009	A contrast of generation sinusoidal fringe pattern method based on phase measurement profilometry	China	Wan-tao et al	Diferenças técnicas entre meios de medição
47	2019	Spatio-Temporal Adaptive Sampling for effective coverage measurement planning during quality inspection of free form surfaces using robotic 3D optical scanner	Reino Unido	Babu et al	Redução no tempo de ciclo

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, a maioria dos artigos encontrados busca viabilizar tecnicamente novos métodos de medição 3D a fim de encontrar ganhos em diversas frentes: eficiência, acurácia de medição, repetibilidade, entre outros. Porém, constatou-se que nenhum dos 47 artigos relacionados ao tema buscou, de forma primária, a avaliação geral dos impactos da implementação (ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico) através do uso de medição via scanner 3D no ambiente de produção. Desta forma, foi identificada uma lacuna de pesquisa na qual será explorada nesta dissertação.

### **3 METODOLOGIA DE PESQUISA**

Toda a pesquisa feita na literatura foi a base teórica para a realização deste trabalho. O método utilizado foi um estudo de caso conduzido em uma indústria de motores diesel e seus componentes. Estudos de casos são utilizados em diversas situações para contribuir ao conhecimento individual, do grupo, organizacional, social, político e fenômeno relacionado (YIN, 2017).

#### **3.1 MÉTODO PARA REVISÃO DA LITERATURA**

A pesquisa na literatura consistiu em 4 etapas: definição do problema, característica da pesquisa, coleta de dados e análise de dados.

A definição do problema é o início de uma pesquisa. É o ponto de partida para as seguintes etapas (YIN, 2017). A questão de pesquisa deve ser definida de forma estruturada, consistente e realista, além de explorar assuntos já abordados anteriormente, porém buscando mudanças significativas que tornem a pesquisa de fato relevante. A partir disto, é possível traçar claramente o objetivo a ser atingido, o qual permite uma investigação precisa e relevante. O problema de pesquisa apresentado resulta-se da seguinte pergunta: a utilização do scanner 3D para medições no ambiente de produção oferece impactos positivos relacionados à ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico no ambiente de produção?

Esta pesquisa possui uma abordagem quantitativa e qualitativa para demonstrar ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico da utilização do scanner 3D no ambiente de produção.

A investigação de um estudo de caso cobre situações que haverá diversas variáveis e que confia em diversas fontes de evidências. Desta forma, há o benefício de proposições teóricas anteriores que guiarão a coleta e análise de dados (YIN, 2017).

Esta etapa consiste em assegurar que todos os elementos relevantes (que inicialmente podem ser negligenciados) foram verificados, e a partir daí buscar a proposição de novos estudos e pesquisas. Neste trabalho, o foco da análise de dados foi em avaliar os ganhos social, de acuracidade de medição, capacidade produtiva e econômico da utilização da medição via scanner 3D no ambiente de produção.

A metodologia de pesquisa inicialmente focou na pesquisa bibliográfica, buscando artigos para se obter referências sobre o tema. Em seguida, foi feita a revisão sistemática da literatura. Para realizar a busca dos artigos publicados, foram utilizadas as seguintes bases de dados: Scopus, Science Direct, Wiley Library e Web of Science.

As palavras-chave utilizadas na busca foram as seguintes: medição ótica 3D (*optical 3D measurement*), scanner óptico 3D (*3D optical scanner*), gêmeo digital (*digital twin*), controle de qualidade (*quality control*) e inspeção (*inspection*). Estas palavras-chave foram divididas entre 2 grupos (Equipamento/Tecnologia e Função/Aplicação) e deram origem a 6 combinações, conforme ilustrado na Tabela 2 abaixo:

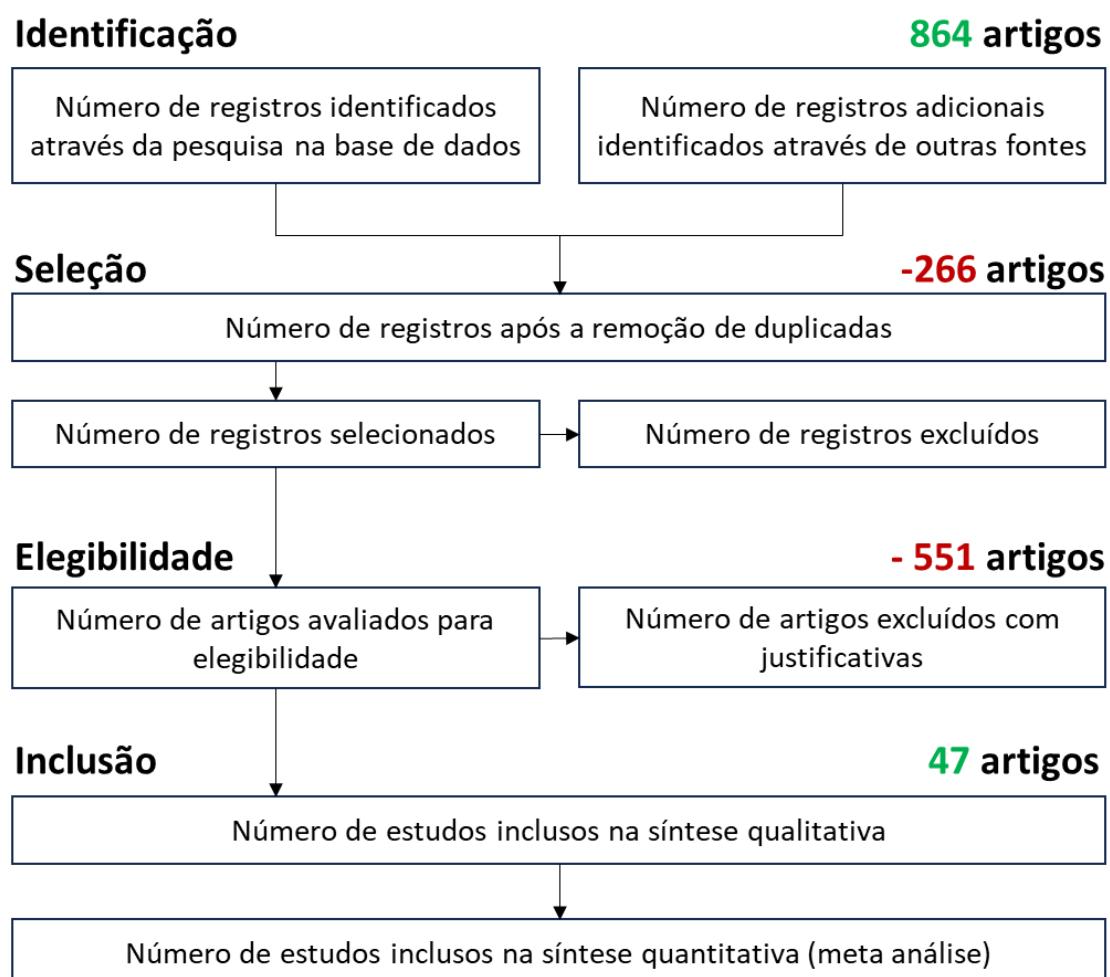
Tabela 2 - Combinação de palavras-chave

COMBINAÇÃO DE PALAVRAS-CHAVE		
Combinação	Equipamento/Tecnologia	Função/Aplicação
1	medição ótica 3D	controle de qualidade
2	scanner óptico 3D	inspeção
3	medição ótica 3D	inspeção
4	scanner óptico 3D	controle de qualidade
5	gêmeo digital	controle de qualidade
6	gêmeo digital	inspeção

Fonte: Elaborado pelo autor

O critério utilizado para buscar os artigos nas bases acadêmicas foram: Palavra-chave, Título e Resumo. Para as buscas, seleção, elegibilidade e definição dos artigos, foi aplicado a técnica PRISMA (MOHER et al., 2010), conforme indicado na Figura 1 abaixo:

Figura 1 - Fluxo de informação das fases de uma revisão sistemática



Na etapa de Identificação, foram encontrados 864 artigos no total (segundo os critérios já citados acima). Na fase de Seleção, 266 artigos encontrados eram duplicados, o que resultou em um total de 598 restantes à serem avaliados. Dentre estes artigos (etapa de Elegibilidade), foram selecionados apenas 47 à serem considerados na pesquisa, uma vez que 551 foram excluídos através do critério de seleção estabelecido. Dentre todo o critério de exclusão, os maiores motivos de eliminação de artigos foram os seguintes:

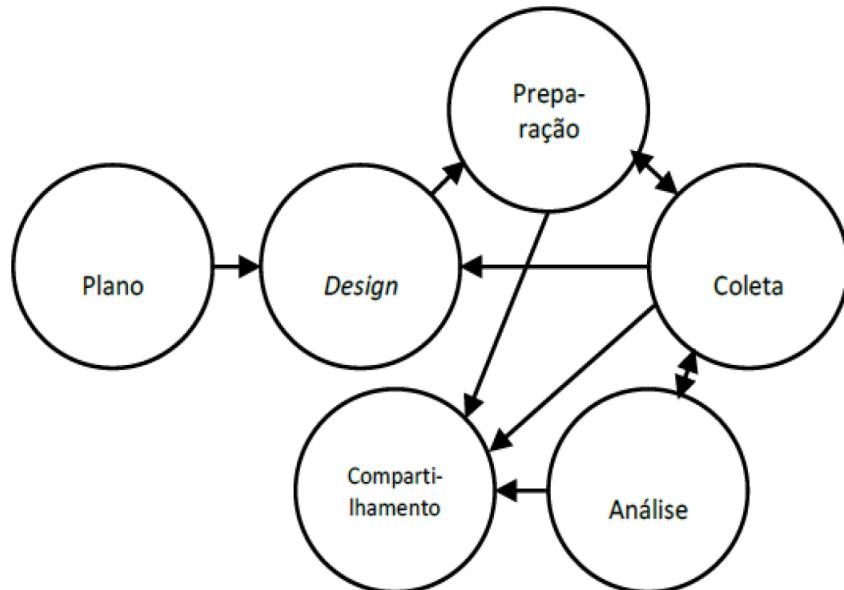
- Aplicação em outros tipos de indústria não aplicáveis: Construção Civil, Medicina, entre outros.

- Fora do escopo do regime de produção (exemplo: protótipos).
- Não relacionado à medição 3D: Análise de fluidos, de desgaste, térmica, entre outros.

### 3.2 MÉTODO DE ESTUDO DE CASO

Um estudo de caso é uma investigação empírica que investiga fenômenos contemporâneos em profundidade e dentro de um contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e contexto não estão claramente evidentes (YIN, 2017). Um estudo de caso é dividido em 6 grandes etapas: plano, *design*, preparação, coleta, compartilhamento e análise. A Figura 2 demonstra como é feita a interação entre cada etapa:

Figura 2 - Etapas do estudo de caso



Fonte: Adaptada de Yin (2017)

O plano se refere à definição das questões de pesquisa. Nesta etapa, definiu-se quais frentes seriam exploradas no estudo tanto de forma primária (principal) quanto secundária: impactos, sociais, de qualidade (acuracidade de medição), capacidade produtiva e econômico.

Já a etapa de *design* define e limita o escopo, possibilitando a preparação da coleta de informações de forma assertiva (YIN, 2017). Nesta fase, definiu-se a seguinte abordagem para cada tipo de impacto avaliado:

- Social: avaliação ergonômica de ambos os meios de medição à serem explorados.
- Qualidade (Acuracidade de Medição): estudo de repetibilidade e reproduzibilidade de ambos os meios de medição.
- Capacidade produtiva: tempo de ciclo e tempo disponível de produção.
- Econômico: custo operacional, custo de energia elétrica, consumo de energia elétrica dos meios de medição avaliados, investimentos necessários, despesas de manutenção dos meios de medição, tempo de ciclo, tempo disponível de produção, depreciação dos equipamentos, margem de contribuição, tributações aplicáveis, custo de capital e alavancagem.

Com as questões de pesquisa definidas e com proposições teóricas estabelecidas, foi dado início à preparação à coleta de dados. Para os impactos sociais planejou-se utilizar a avaliação ergonômica realizada através da ferramenta Humantech. Já para o cálculo de acuracidade de medição planejou-se a medição de 10 peças em ambos os medições, 3 vezes cada uma delas e, para o braço de medição, foi incluída a variável de 3 operadores para realização das medições. A coleta de dados da capacidade produtiva seria feita através da cronoanálise dos tempos de ciclo e da consulta de tempo disponível de produção. Por fim, o levantamento dos dados que seriam avaliados para fins econômicos buscou como fonte de dados os relatórios de despesas e custos operacionais, tempos de ciclo realizados através de cronoanálise, cotações e catálogo de especificações dos meios de medição.

A coleta de dados se tratou da verificação de todos os relatórios, informações e ferramentas mencionadas na preparação da coleta. Os principais pontos nesta etapa foi a observação do novo processo de medição utilizado (via 3D scanner) e do processo anterior realizado com outro método de medição, realizando a comparação entre eles e analisando os dados. As principais ferramentas utilizadas foram a cronoanálise para comparação dos tempos de ciclos, indicadores de performance e

qualidade, levando em conta também os custos de implementação da tecnologia proposta nesta pesquisa. Foi utilizado também um software de análise ergonômica (Humantech) que demonstra os potenciais riscos mitigados com a utilização do 3D scanner, comparando-o com outro método de medição. Tanto a etapa de preparação quanto a coleta de dados propriamente dita foram consultadas e comunicadas as áreas de Finanças, Operações, Manufatura, Manutenção, Laboratório e Qualidade.

A próxima etapa se tratou da análise dos dados, que contou com os cálculos e avaliações para análise social (comparativo do resultado da análise ergonômica de ambos os meios de medição), de acuracidade de medição (estudo de repetibilidade e reproduzibilidade seguindo as diretrizes da Análise do Sistema de Medição), da capacidade produtiva (análise do tempo de ciclo de cada meio de medição e do tempo total disponível de produção) e por fim a econômica (análise cálculo do valor presente líquido).

Por fim, com todas as etapas concluídas, foi feita a comunicação e compartilhamento dos dados com todas as partes interessadas.

## 4 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso aborda a implementação de uma estação de medição via scanner 3D em um ambiente de produção.

O estudo foi realizado em uma empresa multinacional americana de grande porte (aproximadamente 60 mil funcionários no mundo todo) especializada na produção de motores diesel e seus componentes. A planta em questão (localizada no Brasil) conta com quatro grandes unidades de negócios: motores, turbo compressores, sistemas de pós-tratamento e geradores de energia. Esta unidade estudada possui certificações de sistema de gestão da qualidade (IATF 16949 e ISO 9001), sistema de saúde ocupacional e segurança (OHSAS 18001) e gestão ambiental (ISO 14001).

O foco do estudo será a avaliação dos meios de medição que podem ser implementados na introdução da nova linha de alto volume de sistemas de pós tratamento: um braço de medição tridimensional portátil e a tecnologia de medição via scanner 3D. Vale destacar que, por mais que o foco tenha sido nesta linha de produção, é possível aplicar o mesmo conceito em todas as outras linhas de montagem desta e de outras empresas.

### 4.1 ESPECIFICAÇÕES DOS MEIOS DE MEDIÇÃO

Conforme citado acima, os meios de medição avaliados nesta pesquisa serão um braço de medição portátil e um sistema composto de um scanner 3D acoplado à um robô industrial. O primeiro citado é um braço de medição tridimensional FARO Platinum Arm N08 de 6 eixos e alcance de 3 metros. A Figura 3 traz uma ilustração do braço de medição utilizado nesta pesquisa.

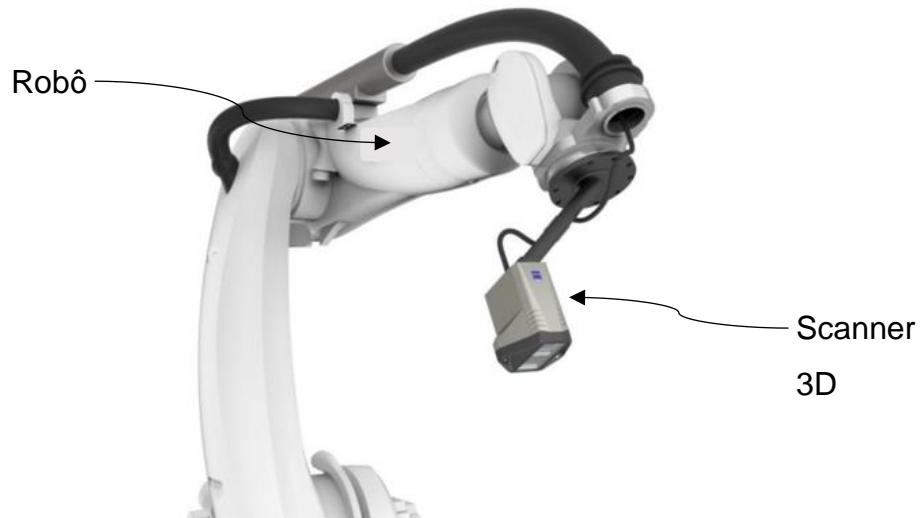
Figura 3 - Imagem ilustrativa do braço de medição tridimensional



Fonte: Empresa pesquisada

Já o outro sistema mencionado é composto de um scanner 3D ZEISS AI Max Cloud com câmera GigE (2048x2048), campo de visão de 80x80x40 mm<sup>3</sup> e iluminação DLP (processamento de luz digital) com espectro de 465 nm. O robô na qual esta tecnologia está acoplada é um FANUC M-710iC/50 com capacidade máxima de carga de 50 kg. A Figura 4 demonstra de forma ilustrativa o sistema de robô com scanner acoplado citado:

Figura 4 - Imagem ilustrativa do sistema de robô com scanner 3D acoplado



Fonte: Empresa pesquisada

## 4.2 ANÁLISE SOCIAL (ERGONÔMICA) DO PROCESSO

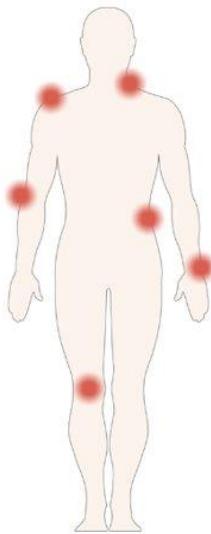
Um dos grandes pilares da companhia em estudo é a Saúde, Segurança e Meio Ambiente de seus funcionários. Neste contexto, a avaliação do impacto social foi feita através da ergonomia dos operadores, a qual possui um importante papel nos processos internos em termos de viabilidade e implementação de um novo projeto e/ou nova tecnologia.

A utilização de um braço tridimensional de medição na linha de baixo volume apresentou grandes problemas ergonômicos, visto que se trata-se de uma operação longa (em torno de 11 minutos) e que havia um grande grau de dificuldade devido à geometria da peça à ser inspecionada. O operador precisa se curvar sobre a peça para que possa medir toda a circunferência do sistema de pós-tratamento. Este fato tornava a operação ergonomicamente inviável à longo prazo, pois possuia um alto fator de risco especialmente nas regiões de mãos/punhos e pescoço/costas (nível 3 na escala de 0-3 da análise), onde utiliza-se a seguinte regra:

- Escala 0 – Sem riscos ergonômicos identificados
- Escala 1 – Baixo risco ergonômico
- Escala 2 – Risco ergonômico moderado
- Escala 3 – Alto risco ergonômico

O software utilizado na empresa para a realização de análises ergonômicas é o sistema Humantech, onde avalia-se os potenciais riscos ergonômicos de mãos, punhos, ombros, cotovelos, pescoço, costas e pernas. A Figura 5 abaixo ilustra os pontos avaliados no software em questão:

Figura 5 - Partes do corpo avaliadas na análise ergonômica



Fonte: Empresa pesquisada

O risco total calculado (*Risk Priority Score – RPS*) para a operação de medição via braço portátil na linha de baixo volume foi de 30 em uma escala de 1 – 50. Este valor é classificado como 'Operação de Alto Risco Ergonômico'. A Figura 6 demonstra de forma detalhada a avaliação deste posto de trabalho:

Figura 6 - Análise ergonômica do posto de trabalho de medição

Job Information from Follow-Up Analysis

Location:	Enterprise > South America > Brazil > Brazil - No State > CES Brazil
Created Date:	October 14, 2021
Shift:	1 <sup>o</sup> e 2 <sup>o</sup>
Ref #:	Linha de baixo volume
Product:	Catalisador

Baseline

Workstation Photos

Manual Analysis

Risk Priority Score (RPS) **30**

Whole-Body Assessment

Hands/Wrists		Elbows		Shoulders		Neck, Back, Legs		
Left	Right	Left	Right	Left	Right	Neck	Back	Legs
2	3	2	2	2	2	3	3	0

Physical Stressors:

Fonte: Empresa pesquisada

Por outro lado, a medição via scanner 3D não possui análise ergonômica visto que não há interação homem-máquina neste posto de trabalho. Desta forma, podemos afirmar que não há riscos ergonômicos com a utilização de um sistema de medição via robô e scanner 3D, ou seja, há um grande benefício social em termos de Saúde e Segurança dos operadores quando opta-se por utilizar este tipo de tecnologia, especialmente em comparação ao braço de medição portátil, onde trata-se da estação de trabalho com maior risco ergonômico desta unidade de negócio.

#### 4.3 ANÁLISE DE ACURACIDADE DO MEIO DE MEDIÇÃO

Além dos ganhos econômicos e sociais, há também um outro ganho significativo identificado com a implementação da tecnologia do scanner 3D: a redução no erro de medição do sistema como um todo. O braço de medição, por ser um processo totalmente dependente da interação homem-máquina, possui uma variação muito maior no que diz respeito a acuracidade dos valores obtidos durante o processo de medição.

A ferramenta mais utilizada no mercado para a avaliação de um sistema de medição é o chamado *MSA* (*Measurement System Analysis*), onde avalia-se todas as principais variáveis em um processo de medição: peça, resolução, operador, ambiente e processo/procedimento. Desta forma, é possível quantificar quão preciso um determinado meio de medição é em relação aos valores obtidos. O conceito *MSA* possui diversas ferramentas que podem ser usadas, mas a principal e mais completa para uma avaliação de medição por variável é o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (AIAG, 2010). Este estudo engloba todas as variáveis já citadas acima e é feito para cada característica medida, utilizando-se o seguinte critério de avaliação:

- $\%R&R < 10\%$  - Sistema de medição capaz (Cor de Identificação na Tabela 3: Verde)
- $\%R&R < 30\%$  e  $> 10\%$  - Sistema de medição condicionalmente capaz (Cor de Identificação na Tabela 3: Amarelo)
- $\%R&R > 30\%$  - Sistema de medição incapaz (Cor de Identificação na Tabela 3: Vermelho)

O estudo foi realizado realizando-se a medição de 10 peças, por 3 vezes repetidas. Para o estudo do braço de medição portátil, foram utilizados 3 operadores. A Tabela 3 abaixo demonstra o comparativo entre os sistemas de medição:

Tabela 3 - Comparativo da análise dos sistemas de medição

Característica	%R&R Scanner 3D	%R&R Braço Portátil
#1 Comprimento	0,43%	24,01%
#2 Diâmetro A1	2,42%	16,76%
#3 Ângulo do Acoplador de Pressão	1,57%	8,95%
#4 Ângulo do Acoplador de Nitrogênio	2,63%	21,36%
#5 Posição Diâmetro B1	1,69%	7,58%
#6 Posição do Diâmetro de Entrada	4,26%	17,75%
#7 Posição do Diâmetro de Saída	1,74%	13,85%
#8 Posição do Pino	1,75%	9,23%

Fonte: Empresa pesquisada

Com base nos resultados da análise, fica evidente a diferença entre a acuracidade entre cada meio de medição. Nenhuma característica medida no scanner 3D obteve uma variação acima de 5%, enquanto que o braço de medição portátil apresentou características em que o meio de medição é apenas condicionalmente capaz, com valores próximos a 30%.

As características do produto avaliadas neste estudo são consideradas críticas, ou seja, possuem um alto impacto ao funcionamento do sistema de pós-tratamento. Desta forma, ter um sistema de medição apenas condicionalmente capaz traz um risco intrínseco ao processo uma vez que um erro de medição pode acarretar no envio de produtos não conforme ao cliente final e, consequentemente, falhas de campo no curto e longo prazo.

É importante destacar também que, por mais que se tenha obtido resultados de certa forma satisfatórios com o braço de medição portátil, foram necessários treinos intensivos e repetitivos com os operadores, além de uma definição clara de processo de medição à ser seguido, a fim de que se houvesse uma repetibilidade minimamente aceitável. Vale destacar que há um risco intrínseco neste tipo de meio de medição, que é justamente uma eventual troca de operadores na operação ao longo do tempo, onde é altamente recomendável uma nova rodada de treinamento

intensa e rígida para que se evite riscos de erros de medição no processo. Esta variável basicamente inexiste no processo automático de medição via scanner 3D.

#### 4.4 CAPACIDADE PRODUTIVA DA MEDIÇÃO VIA ROBÔ COM SCANNER 3D

Além dos ganhos sociais, acuracidade e qualidade do sistema de medição via robô com scanner 3D acoplado, um outro fator considerado durante a avaliação é a visão de longo prazo no que diz respeito à obtenção de novos negócios (novos produtos e clientes). Com o braço de medição tridimensional portátil, a estação de medição da linha possuiria uma capacidade máxima de 20.757 peças ao ano, considerando o tempo de ciclo de 11,1 minutos por peça, operando 8 horas por turno, em 2 turnos por dia, 20 dias úteis por mês, 12 meses ao ano. Já com o sistema de medição via robô com scanner 3D acoplado, esta capacidade aumentaria para 69.189 peças ao ano, considerando o tempo de ciclo de 3,33 minutos por peça, operando 8 horas por turno, em 2 turnos por dia 20 dias úteis por mês, 12 meses ao ano.

Ou seja, o braço de medição tridimensional limitaria a empresa a observer um aumento de demanda ou até mesmo novos clientes, visto que a operação estaria produzindo em capacidade muito próxima da máxima. O scanner 3D permite um aumento considerável no processo produtivo, permitindo a fomentação de novos negócios.

#### 4.5 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROCESSO

A análise econômica deste estudo foi feita com base na comparação do valor presente líquido da implementação do sistema de robô com scanner 3D acoplado *versus* o braço de medição tridimensional portátil. Para isso, foi feita a coleta de diversos dados como os custos operacionais, bem com os investimentos necessários para a implementação de ambos os meios de medição.

Em termos de investimentos, o sistema de robô com scanner 3D acoplado possui um valor substancialmente maior do que o braço de medição tridimensional

portátil: o primeiro citado custa em torno de R\$ 1.666.850,00, enquanto o segundo meio de medição mencionado custa aproximadamente R\$ 103.000,00. Apesar da grande diferença em termos de investimento, o grande ganho econômico da utilização do sistema com scanner 3D vem da eliminação de uma mão de obra necessária para o processo de medição, uma vez que se trata de um processo inteiramente automatizado. O valor aproximado do salário de um operador gira em torno de R\$ 3.500,00 mensais que, considerando os encargos sociais e trabalhistas, custa R\$ 6.650,00 para a empresa (R\$ 79.800,00 ao ano). A Tabela 4 demonstra de forma detalhada o racional descrito acima:

Tabela 4 - Redução do custo operacional

Descrição do Custo	Valor (R\$)
Salário de operador por mês	R\$ 3.500,00
Encargos Sociais e Trabalhistas	90%
Custo de um operador por mês (20 dias/mês)	R\$ 6.650,00
Custo de um operador por ano (12 meses/ano)	R\$ 79.800,00

Fonte: Empresa pesquisada

Um outro custo relevante em relação à comparação dos dois meios de medição é o custo de energia elétrica. Enquanto o braço de medição tridimensional portátil possui um consumo elétrico extremamente baixo (0,030 kW), o sistema de robô com scanner 3D acoplado apresenta um valor substancialmente elevado comparativamente (2,5 kW). Para esta análise em questão, foi levado em conta o tempo necessário de utilização de cada meio de medição para atendimento da demanda anual esperada (20.726 peças produzidas no ano).

O tempo de utilização anual necessário para o braço de medição tridimensional portátil é mais do que 3 vezes maior do que o tempo necessário para o scanner 3D (3.834 horas contra 1.151 horas). Assumindo um custo kWh de R\$ 0,92, temos uma significativa diferença de custo anual: enquanto o sistema de robô com scanner 3D acoplado possui um consumo de R\$ 2.645,00 no ano (1.151 horas multiplicado 2,5 kW vezes R\$ 0,92), o braço de medição tridimensional portátil consome apenas R\$ 106,00/ano (3.834 horas multiplicado por 0,030 kW vezes R\$ 0,92), conforme demonstrado no Tabela 5:

Tabela 5 - Custo total de energia elétrica

Descrição dos custos	Scanner 3D	Braço de Medição
Total de sistemas de pós tratamento produzidos	20.726 peças/ano	
Tempo de utilização do meio de medição por sistema de pós tratamento produzido	3,33 minutos	11,1 minutos
Tempo de utilização do meio de medição por ano (minutos)	69.087 minutos	230.058 minutos
Tempo de utilização do meio de medição por ano (horas)	1.151 horas	3.834 horas
Consumo do meio de medição	2,5 kW	0,030 kW
Custo de eletricidade	R\$ 0,92/kWh	
Custo total de energia elétrica consumida pelo meio de medição (ano)	R\$ 2.645/ano	R\$ 106/ano

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro custo incluso na implementação do scanner 3D é o suporte pós instalação (R\$ 39.895,00). Trata-se de um trabalho especializado da empresa fabricante necessário para configurar a tecnologia contratada. Já o braço de medição tridimensional não possui este custo adicional, uma vez que está incluso no valor da compra do sistema de medição como um todo.

Além deste suporte, a implementação do scanner 3D traz a necessidade de um contrato de manutenção junto ao fabricante, especialmente por se tratar de uma tecnologia nova na qual os técnicos da empresa utilizada no estudo não possuem total domínio sobre ela. Este contrato anual gira em torno de R\$ 56.122,00. Já a manutenção do braço de medição é uma tecnologia já conhecida pelos técnicos internos, não sendo necessário nenhum custo adicional para contratação de manutenção externa.

Por fim, há o treinamento de programação/configuração destas tecnologias. Por se tratar de uma equipe global da empresa fabricante, os custos logísticos e trabalho especializado para treinamento do scanner 3D torna este treinamento (de duração de 2 semanas) consideravelmente mais caro do que o treinamento do braço de medição (R\$ 45.214,00), que conta com uma equipe local do fabricante e consequentemente com um custo muito menor. O treinamento realizado para o braço de medição tridimensional portátil gira em torno de R\$ 4.950,00. Veja o resumo dos

investimentos totais necessários para a implementação de cada tecnologia, conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Custos e investimentos

Categoria	Descrição	Scanner 3D	Braço de Medição
Investimento	Sistema de Medição	R\$ 1.666.850	R\$ 103.000
Investimento	Suporte pós instalação	R\$ 39.895	Incluso
Investimento	Treinamento de programação	R\$ 45.214	R\$ 4.950
Custo	Contrato de manutenção (anual)	R\$ 56.212	N/A
Custo	Energia elétrica anual (anual)	R\$ 2.645	R\$ 106
Custo	Mão de obra (anual)	-	R\$ 79.800,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme observado acima, o investimento inicial para implementação do sistema de medição de um robô com scanner 3D acoplado é de R\$ 1.751.959,00 e custos anuais de R\$ 58.857,00, enquanto que o braço de medição tridimensional portátil possui um investimento de R\$ 107.950,00 e custos anuais de R\$ 79.906,00.

Além destes valores, foram inclusos também na análise a depreciação de cada equipamento (8,33% ao ano), valores de alavancagem (que neste caso é 0%) e as tributações aplicáveis, como: imposto de renda de pessoa jurídica (25%) e contribuição social sobre o lucro líquido de 9%. Além disto, foi incluso também o custo de capital (ou WACC) da empresa, que gira em torno de 12% ao ano. Outro fator econômico importante é a margem de contribuição de cada peça (R\$ 1.980,00 por peça), que será determinante para a viabilidade econômica do sistema de medição do robô com scanner 3D acoplado.

Desta forma, foi feito o cálculo de fluxo de caixa de ambos os meios de medição, a fim de ser ter uma avaliação tanto do investimento do braço de medição tridimensional portátil quanto a uma eventual implementação do scanner 3D. O Tabela 7 ilustra o fluxo de caixa do scanner 3D. O valor do negócio, considerando os 12 anos de vida útil do equipamento é de R\$ 51.920,00 (utilizando-se a fórmula de cálculo do valor presente líquido) contra um investimento de R\$ 1.751.959,00 no Ano 0. Desta forma, o VPL (valor presente líquido) total do projeto do scanner 3D é de - R\$1.700.039,00. Já o braço de medição tridimensional portátil possui o seguinte fluxo de caixa, conforme demonstrado na Tabela 8:

Tabela 7 - Fluxo de caixa do scanner 3D

	Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demonstração do Resultado de Exercício - DRE	Custos de Manutenção		R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212
	Custo de Energia Elétrica		R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645
	Custo de Mão de Obra		R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0
	Depreciação		R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904
	Lucro Operacional		-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761
	Juros		R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0
	Lucro Tributável		-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761	-R\$ 197.761
	IRPJ/CSLL		-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239	-R\$ 67.239
	Lucro Líquido		-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522	-R\$ 130.522
	Depreciação		R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904
Ajustes Fluxo de Caixa	Investimentos		R\$ 1.666.850											
	Treinamento e Suporte		R\$ 85.109											
	Amortização													
	Liberação de Financamentos													
	Fluxo de Caixa		-R\$ 1.751.959,00	R\$ 8.382										

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Fluxo de caixa do braço de medição

	Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demonstração do Resultado de Exercício - DRE	Custos de Manutenção		R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
	Custo de Energia Elétrica		R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106	R\$ 106
	Custo de Mão de Obra		R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800	R\$ 79.800
	Depreciação		R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583
	Lucro Operacional		-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489
	Juros		R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
	Lucro Tributável		-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489	-R\$ 88.489
	IRPJ/CSLL		-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086	-R\$ 30.086
	Lucro Líquido		-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403	-R\$ 58.403
	Depreciação		R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583	R\$ 8.583
Ajustes Fluxo de Caixa	Investimentos		R\$ 103.000											
	Treinamento e Suporte		R\$ 4.950											
	Amortização													
	Liberação de Financamentos													
	Fluxo de Caixa		-R\$ 107.950,00	-R\$ 49.820										

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme demonstrado acima, o valor do negócio da instalação do braço de medição é de -R\$ 308.601,41 ao longo dos 12 anos de vida útil de equipamento, contra um investimento de R\$ 107.950,00. Sendo assim, o VPL total do projeto do braço de medição tridimensional portátil seria de -R\$ 416.551,41. Desta forma, evidencia-se que o projeto de instalação do braço de medição se torna economicamente mais atraente, uma vez que possui um valor presente líquido maior do que o projeto do scanner 3D.

Porém, conforme citado na seção anterior desta dissertação, o scanner 3D possui um tempo de ciclo consideralmente menor do que o processo de medição via braço de medição portátil. Isto consequentemente possibilitaria um eventual aumento de demanda/vendas obtido através de novos negócios ou até mesmo solicitação através dos clientes atuais. Com este fator sendo levado em consideração, foi feita um novo fluxo de caixa do sistema de robô com scanner 3D acoplado, considerando este eventual aumento de vendas. A Tabela 9 abaixo demonstra que, com uma margem de contribuição de R\$ 1.980,00 por peça, seria necessária a venda adicional de 159 sistemas de pós tratamento ao ano para que o scanner 3D se torne economicamente mais atrativo do que o braço de medição portátil:

Tabela 9 - Novo fluxo de caixa do scanner 3D

Ano	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Aumento de Demanda</b>	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820	R\$ 314.820
<b>Demonstração do Resultado de Exercício - DRE</b>													
Custos de Manutenção	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212	R\$ 56.212
Custo de Energia Elétrica	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645	R\$ 2.645
Custo de Mão de Obra	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0
Depreciação	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904
Lucro Operacional	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059
Juros	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0
Lucro Tributável	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059	R\$ 117.059
IRPJ/CSLL	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800	R\$ 39.800
Lucro Líquido	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259	R\$ 77.259
<b>Ajustes Fluxo de Caixa</b>													
Depreciação	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904	R\$ 138.904
Investimentos	R\$ 1.666.850												
Treinamento e Suporte	R\$ 85.109												
Amortização													
Liberação de Financamentos													
Fluxo de Caixa	-R\$ 1.751.959,00	R\$ 216.163											

Fonte: Elaborado pelo autor

Neste novo fluxo de caixa (considerando o aumento de demanda), o valor do negócio do scanner 3D ao longo dos 12 anos saltou para R\$ 1.338.994,50. Com isto, mesmo considerando o alto investimento inicial, o VPL do projeto do scanner 3D com o aumento de 159 peças vendidas ao ano seria de -R\$ 412.964,50 (maior do que o do braço de medição portátil). A Tabela 10 resume toda a análise acima descrita:

Tabela 10 - Comparativo de VPL

	Braço de Medição	Scanner 3D	Scanner 3D + Aumento de Demanda
<b>Valor do Negócio</b>	- R\$ 308.601,41	R\$ 51.920,00	R\$ 1.338.994,50
<b>Investimento Inicial</b>	R\$ 107.950,00	R\$ 1.751.959,00	R\$ 1.751.959,00
<b>Valor Presente Líquido</b>	<b>- R\$ 416.551,41</b>	<b>- R\$ 1.700.039,00</b>	<b>- R\$ 412.964,50</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma resumida, caso tenha-se um aumento das vendas anuais de 159 peças ao ano (aumento de 0,77%), a implementação do scanner 3D torna-se economicamente mais atrativo do que o braço de medição tridimensional portátil.

## 5 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste estudo de caso demonstraram que a implementação de um sistema de medição composto de um robô e a tecnologia de scanner 3D possui diversos benefícios, como: social (ergonomia), acuracidade de medições qualidade e aumento de capacidade produtiva. Entretanto, do ponto de vista econômico, seria necessário um aumento de 0.77% das vendas anuais para que a implementação do scanner 3D torne-se economicamente mais atrativo do que o braço de medição tridimensional. Os resultados de modo geral estão alinhados com o trabalho de Anderson *et al.* (2019), que confirmou que a utilização deste tipo de tecnologia suporta as decisões operacionais e de manutenção em busca da segurança e disponibilidade (capacidade) das operações, bem como prever e prevenir problemas e falhas de manufatura, reduzindo os riscos de qualidade.

Conforme mencionado acima, o sistema de medição proposto elimina o alto risco ergonômico proveniente da outra alternativa estudada pela empresa (braço de medição tridimensional portátil), no qual apresenta um risco de 30 pontos (em uma escala de 1-50 no sistema Humantech). Como não há interação homem-máquina na operação do scanner 3D, o risco é completamente eliminado. Não houveram referência encontradas na literatura que explorassem os benefícios sociais (ergonômicos) na utilização de sistemas de robôs com scanners 3D óticos. Isto reforça a importância deste trabalho em apresentar os potenciais impactos positivos que este tipo de tecnologia pode trazer às empresas que decidam aderí-la.

Outro benefício mensurado e comprovado está relacionado à acuracidade nas medições via scanner 3D. Todas as medições das características críticas do produto possuem uma precisão classificada como 'Capaz' (abaixo de 10% de variação no estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade). Já no braço de medição tridimensional portátil, boa parte das mesma características foram classificadas apenas como 'Marginalmente Capaz' (entre 10-30% de variação no estudo de R&R). Esta variação traz um risco no que diz respeito à qualidade do produto, visto que qualquer variação na medição de uma peça que esteja próxima aos limites de especificação de engenharia pode acarretar no envio de uma peça não conforme ao cliente final. Esta avaliação de acuracidade via scanner 3D corrobora o estudo de Tuominen e Ilkka

Niini (2008), que apresentaram um método de verificação que comprova a acurácia do sistema de medição ótico 3D, com base em um estudo empírico seguindo as diretrizes da VDI/VDE 2643.

Por fim, há um claro ganho de capacidade produtiva na utilização do scanner 3D, visto que há uma drástica redução no tempo de ciclo em comparação ao braço de medição tridimensional (de 11,1 minutos para 3,33 minutos). A capacidade do scanner 3D é aproximadamente três vezes maior do que o braço de medição tridimensional. Isso possibilita a companhia à buscar novas demandas e produtos ou até mesmo atuar no balanceamento de linha para obter maior produtividade. Esta busca por novos negócios foi um dos fatores determinantes para a decisão de aquisição desta tecnologia, visto que se trata da implementação de uma nova linha. Este ganho de capacidade produtiva corrobora com o estudo de Babu *et al.* (2019), no qual demonstrou que a utilização de scanners óticos 3D proporcionam a oportunidade de reduzir o tempo médio de detecção de defeitos de qualidade do produto.

O ponto de atenção desta implementação se dá pela condição de um aumento de vendas anuais de 159 peças/ano para que o scanner 3D se torne viável economicamente (em comparação ao braço de medição tridimensional portátil). Assim como a questão social (ergonômica), não foram encontradas referências na literatura que explorassem os benefícios econômicos na implementação de sistemas de robôs com scanners 3D óticos, o que justifica a lacuna de pesquisa abordada neste trabalho.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo alcançou o objetivo inicialmente definido, o qual buscava explorar e analisar os impactos da utilização de medições via scanner 3D no ambiente de produção. Os resultados observados indicam um claro benefício do ponto de vista social, visto que o meio de medição comparado (braço de medição tridimensional) oferece um alto risco de ergonomia aos operadores. Além disso, o scanner 3D se mostrou muito mais preciso em termos de medição (acuracidade), bem como um significativo tempo de ciclo menor do que o braço de medição tridimensional, proporcionando uma capacidade produtiva significativamente maior (em aproximadamente três vezes), que permite a empresa à buscar novas demandas e clientes no curto, médio e longo prazo. Contudo, do ponto de vista econômico, há uma questão condicional em relação à um aumento de vendas necessário para que o scanner 3D se torne viável economicamente em relação ao braço de medição tridimensional. Vale destacar que este aumento de vendas seria do produto de maior volume da companhia, o que de certa forma não torna um aumento tão desafiador para a empresa.

A contribuição teórica desta pesquisa foi explorar um tema ainda não encontrado na literatura sobre todos os impactos e ganhos obtidos com a utilização deste tipo de tecnologia. Com isso, os aspectos explorados neste estudo contribui com a literatura voltada à este tema. Como uma contribuição para o mundo corporativo, este estudo busca incentivar gestores à avaliarem este tipo de tecnologia como alternativa em seus processos produtivos. É importante que se tenha uma visão de longo prazo para que este tipo de meio de medição se torne viável em todos os aspectos: não só o social, de qualidade e de produtividade, mas também o econômico.

O propósito geral desta pesquisa limitou as conclusões à empresa abordada no estudo e os meios de medições explorados. Desta forma, o resultados e metodologia utilizada não podem ser generalizados para outros fins. Como sugestão de pesquisas futuras, entende-se que deve-se explorar economicamente o scanner 3D em relação à outros meios de medições utilizados no mercado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKO, B.; KLOBUCAR, R. Metrological approach for testing performance of optical 3D measurements systems. **Lecture Notes in Mechanical Engineering**, p. 47-61, 2019.
- ANDERSON, S.; BARVIK, S.; RABITOY, C. Innovative Digital Inspection Methods. **Offshore Technology Conference**, 2019.
- ARVANITIS, G.; LALOS, A.; MOUSTAKAS, K. **Saliency Mapping for Processing 3D Meshes in Industrial Modeling Applications**, 2019.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP – AIAG. **Measurement Systems Analysis MSA. 4a ed.** Detroit: Chrysler Corporation; Ford Motor Company and General Motors Corporation, 2010.
- BABU, M.; FRANCIOSA, P.; CEGLAREK, D. Spatio-Temporal Adaptive Sampling for effective coverage measurement planning during quality inspection of free form surface using robotic 3D optical scanner. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 53, p. 93-108, 2019.
- BAUER, F. *et al.* Practical Part-Specific Trajectory Optimization for Robot-Guided Inspection via Computed Tomography. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 2022.
- BERGER, U.; WOLF, H. **Optical system for robot based one-of-a-kind manufacturing**, 1994.
- BLAKE, S. Manufacturing verification and documentation: Catching up with digital design tools. **CAMX**, 2018.
- BOESEMANN, W.; GODDING, R.; HUETTE, H. Photogrammetric measurement techniques for quality control in sheet metal forming. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, 2000.
- BRAJLIH, *et al.* Testing the accuracy of atos™ 3D optical scanner measuring volumes. **Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium**, p. 111-112, 2007.

COETZEE, B.; SONNENDECKER, P. Fully automated coal quality control using digital twin material tracking and statistical model predictive control for yield optimization during production of semi soft coking- and power station coal. **Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 122, n. 8, p 429-436, 2022.

DANZL, R.; HELMLI, F.; SCHERER, S. Focus Variation – a Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology. **Journal of Mechanical Engineering**, 2011.

FELICE, F.; PETRILLO, A.; CARLOMUSTO, A. Shape Measurement Based on 3D Optical Scanner: Real Case Study in the Aeronautics Industry. **Applied Mechanics and Materials**, v. 656, p 378-387, 2014.

FISCHER, M.; PETZ, M.; TUTSCH, R. **Model-based noise estimation for fringe projection systems**, 2016

GAHA, R.; DURUPT, A.; EYNARD, B. Towards the implementation of the Digital Twin in CMM inspection process: opportunities, challenges and proposals. **Procedia Manufacturing**, 2021.

GOTLIH, *et al.* Design of a Digital Twin of a Robotic Cell for Product Quality Control. **Lecture Notes in Network and Systems**, v. 472, 2022.

GURJANOV, A. *et al.* Total quality control of the cyber-physical production using machine vision technologies. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021.

IULIANO, L.; MINETOLA, P.; SALMI, A. Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers. **Measurement Science and Technology**, 2010.

JÓZWIK, J.; DZIEDZIC, K. Digital Shape and Geometric Dimension Analysis of Polymer Fuel Tanks. **Advances in Science and Technology Research Journal**, 2021.

KOSSE, S. *et al.* Digital Twin Framework for Enabling Serial Construction. **Frontiers**, 2022.

KRITIKOS, M.; URMINSKY, J.; BURANSKY, I. **Comparison of Optical Scanner and Computed Tomography Scan Accuracy**, 2022.

KUHMSTEDT, P. *et al.* Full-hemisphere automatical optical 3D measurement system. **SPIE**, 1997.

KUHMSTEDT, P. *et al.* Optical 3D sensor for large objects in industrial application. **Proceedings of SPIE**, 2005.

KURC, Krzysztof et al. Non-contact robotic measurement of jet engine components with 3D optical scanner and UTT method. In: **International Workshop on Modeling Social Media**. Cham: Springer International Publishing, p. 151-164, 2018.

KUSHWAHA, S.; QIAN, J.; REYNAERTS, D. Process-parallel quality estimation. **Euspen**, 2021.

MOHER, D. *et al.* Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, v.8, n. 5, p. 336-341, 2010.

MOURTZIS, D.; VLACHOU, A.; ZOGOPOULOS, V. Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: A product-service system approach. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 139, n. 6, p. 1-11, 2017.

MUENSTERMANN, P.; GODDING, R.; HERMSTEIN, M. Advanced optical 3D scanner using DMD technology. **Proceedings of SPIE**, 2017.

MUNKELT, C. *et al.* Continuous low-latency 3D measurements using efficient freeform GOBO pattern projection and close-to-sensor image rectification, **Proceedings of SPIE**, 2020.

MUNKELT, C.; KUHMSTEDT, P.; DENZLER, J. **Incorporation of A-Priori information in planning the next best view**, 2006.

POCHMON, M.; PRAVDOVÁ, L.; ROSSLER, T. Construction modification of data-projector for optical 3D measurement. **EAN**, 2008.

RAUSCH C.; LU, R.; TALEBI S.; HAAS, C. Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. **International Journal of Construction Management**, 2021.

ROVEDA, L. *et al.* Robot End-Effector Mounted Camera Pose Optimization in Object Detection-Based Tasks. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, 2021.

SANTOLAMAZZA, A., *et al.* A Digital Shadow cloud-based application to enhance quality control in manufacturing, **IFAC Papers Online**, 2020.

SHORTIS, M.; FRASER, C. **Current trends in close-range optical 3D measurement for industrial and engineering applications**, 2013.

SINHA, S. *et al.* 3D convolutional neural networks to estimate assembly process parameters using 3D point-clouds. **Proceedings of SPIE**, 2019.

SODERBERG, R. *et al.* An information and simulation framework for increased quality in welded components. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, 2018.

TADEJA, S. *et al.* Exploring gestural input for engineering surveys of real-life structures in virtual reality using photogrammetric 3D models. **Multimedia Tools and Applications**, 2021.

TADEJA, S. *et al.* **Measurement and Inspection of Photo-Realistic 3D VR Models**, 2021.

TUOMINEN, V.; NIIMI, I. **Verification of the accuracy of a real-time optical 3D-measuring system of production line**, 2008.

ULMER, G.; SIRAT, G.; BEYERER, J. Inspection of honed surfaces by conoscopic and image processing methods. **SPIE**, v. 2786, 1996.

VALIGI, M. *et al.* Experimental evaluation of tramway track wear by means of 3D metrological optical scanner. **Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces**, 2020.

WAN-TAO, H. *et al.* A Contrast of Generation sinusoidal fringe pattern method based on Phase Measurement Profilometry. **Trans Tech Publications**, v. 419-4210, p. 145-148, 2009.

WARMEFJORD, K. *et al.* Inspection data to support a digital twin for geometry assurance. **IMECE**, 2017.

WOLF, K.; ROLLER, D.; SCHAFER, D. An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000.

YAMASAKI, F. Utilizing Robots and Deep Learning. **ISARC**, 2020.

YI, Y., *et al.* A novel assembly tolerance analysis method considering form errors and partial parallel connections. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2022.

YIN ROBERT K. Case study research: Design and methods. Thousand Oaks, CA: **Sage Publications**, v.24, 2017.

YUNG, K. *et al.* Visually Encoded Contact Inspection System for EMATs. **Journal of Nondestructive Evaluation**, 2022.

ZANGL, K. *et al.* Optical 3d measurement of cooling holes in gas turbine and aircraft engines. **Laser Metrology and Machine Performance XIV**, 2021.

ZHANG, J. *et al.* Spacecraft assembly quality control and prediction technology based on digital twin. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, v. 27, n. 2, p. 605-616, 2021.

ZHUANG, C. *et al.* Digital Twin-based Quality Management Method for the Assembly Process of Aerospace Products with the Grey-Markov Model and Apriori Algorithm. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2022.

ZORRER, H. *et al.* Using Business Analytics for Decision Support in Zero Defect Manufacturing of Composite Parts in the Aerospace Industry. **IFAC Papers Online**, 2019.