

**UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

***DIAGNÓSTICO DE FATORES DE PRONTIDÃO PARA A  
QUALIDADE 4.0 EM ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS***

**SAULO FERRAZ JUNIOR**

**SÃO PAULO**

**2025**

**SAULO FERRAZ JUNIOR**

***DIAGNÓSTICO DE FATORES DE PRONTIDÃO PARA A  
QUALIDADE 4.0 EM ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves.

**SÃO PAULO**  
**2025**

Ferraz Junior, Saulo.

Diagnóstico de fatores de prontidão para a Qualidade 4.0 em organizações industriais / Saulo Ferraz Junior. – 2025.  
109 f. : il. color.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação.  
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves.

- 1. Qualidade 4.0. 2. Indústria 4.0. 3. Indústria 5.0.
- 4. Diagnóstico de prontidão. 5. Transformação digital. 6. Desafios e benefícios. 7. Sistema de gestão da qualidade. I. Gonçalves, Rodrigo Franco (orientador). II. Título.

Ficha elaborada pelo Bibliotecário Rodney Eloy CRB8-6450

# **SAULO FERRAZ JUNIOR**

## ***DIAGNÓSTICO DE FATORES DE PRONTIDÃO PARA A QUALIDADE 4.0 EM ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS***

Tese apresentada ao Programa de Doutorado  
em Engenharia de Produção da Universidade  
Paulista – UNIP.

Aprovado(a) em: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves - Orientador  
Universidade Paulista - UNIP

---

Prof. Dr. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto  
Universidade - UNIP

---

Prof. Dr. Marcelo Tsugui Okano  
Universidade Paulista - UNIP

---

Prof. Dr. João Batista Turrioni  
Universidade Federal de Itajubá

---

Prof. Dr. Walter Cardoso Sátyro  
Universidade Nove de Julho

## AGRADECIMENTOS

Escrever a tese é um trabalho solitário, minucioso, preciso. O ato demanda disciplina e resiliência, fato somente possível com o apoio de pessoas especiais.

Por isto, meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves, incansável trabalhador de ideias e sugestões, sempre atencioso e disponível, o que tornou essa jornada mais produtiva e leve e contribuiu para o resultado deste trabalho.

Agradeço ainda aos Professores e Doutores Marcelo Tsugui Okano, João Batista Turrioni e Walter Cardoso Sátyro por aceitarem o convite para participação na minha Banca Examinadora.

Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Luíz de Oliveira Costa Neto pela reconhecida dedicação e grande experiência profissional, o que me inspirou a prosseguir pesquisa no apaixonante tema da qualidade.

Agradeço à Profa. Dra. Irenilza de Alencar Nääs e ao Prof. Dr. Gincarlo Medeiros pelos comentários e sugestões ao artigo que compõe a tese.

Agradeço aos meus colegas de curso, Prof. Dr. Marcos Antônio Campos Benvenga, pela construção do artefato, e ao Prof. Dr. Euclides Serafim Silva, pela contribuição à estrutura do artefato.

Agradeço ainda a Lucilene de Moraes, a Michel Jemael, a Vitor Ferraz Jemael, a Isabelle Gonçalves Vasconcelos e a Daniel Bayerlein pela disponibilidade e pelo apoio à pesquisa.

Agradeço à Profa. Nilza Aparecida dos Santos por motivar-me a iniciar essa trajetória acadêmica.

Agradeço sempre à minha querida esposa Rosangela, cujo apoio deu forma ao trabalho. Ela foi presença em todos os momentos, ouvinte gentil de minhas dúvidas, anseios e infinita compreensão sobre as limitações do nosso convívio em função do tempo disponibilizado para este trabalho.

Agradeço com especial afeto aos meus filhos Rene e Laís, incentivadores de meus planos presentes e futuros, afirmação de que, com disciplina e perseverança, se chega a bom resultado.

Agradeço a meus pais, Saulo Ferraz (*in memorian*) e Maria Boscolo Ferraz, que sempre incentivaram meus estudos em qualquer tempo.

Agradeço à minha irmã, Silmara Ferraz, e ao meu irmão, Sílvio Ferraz, pela

atenção em manter unida nossa família, no ajuste do que eu não pude fazer no tempo de duração deste trabalho.

Agradeço imenso aos colegas da UNIP que, no apoio mútuo, tornaram mais leve essa boa, mas exigente caminhada.

Agradeço o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

## RESUMO

A intensa competitividade do mercado e as crescentes expectativas dos clientes impulsionam as organizações à busca contínua por vantagem competitiva, fato que exige a adoção de novos métodos de trabalho e tecnologias. Neste contexto de transformação digital, emerge a Indústria 4.0 e, como sua consequência direta, a Qualidade 4.0 – uma evolução da gestão da qualidade viabilizada pelas tecnologias habilitadoras. A ausência de ferramentas que avaliem o nível de preparo das organizações para essa transição representa uma lacuna crítica. Este trabalho, estruturado como uma Tese por Publicação, teve como objetivo geral construir um instrumento de diagnóstico dos fatores de prontidão, condição necessária em preparação à transformação digital. Ele visou a comparar o sistema de gestão da qualidade (SGQ) atual com os requisitos esperados da Qualidade 4.0 em organizações industriais. Para o alcance desse propósito, empregou-se uma abordagem de pesquisa de natureza qualitativa. Inicialmente, utilizou-se a Análise Bibliométrica e a Revisão Sistemática da Literatura (SLR), o que resultou no Artigo 1, para explorar o conceito da Qualidade 4.0, identificar seus requisitos, desafios, benefícios e lacunas de pesquisa, além de discutir os desdobramentos da Indústria 5.0. Posteriormente, a estratégia de *Design Science Research* (DSR) foi aplicada para a construção e a validação do artefato. Como principais contribuições, a tese propõe uma conceituação prática da Qualidade 4.0 e o uso original do conceito de *Targeted Data* (dados direcionados) no gerenciamento da qualidade, na mitigação da sobrecarga de informação decorrente da facilidade de coleta de dados digitais. O resultado central da pesquisa é o desenvolvimento de um artefato (*software*), que determina o grau de aderência aos requisitos da Qualidade 4.0. Este instrumento oferece aos gestores e às organizações industriais conhecimento para a melhor compreensão do conceito e para o planejamento estratégico de ações de implementação da Qualidade 4.0.

Palavras-chave: Qualidade 4.0; Indústria 4.0; Indústria 5.0; diagnóstico de prontidão; transformação digital; desafios e benefícios; sistema de gestão da qualidade.

## ABSTRACT

The intense market competitiveness and growing customer expectations drive organizations to continuously seek a competitive advantage, demanding the adoption of new work methods and technologies. In this context of digital transformation, Industry 4.0 emerges, and as its direct consequence, Quality 4.0—an evolution of quality management enabled by key technologies. The lack of tools to assess the organizations' preparedness level for this transition represents a critical gap. This thesis, structured as a Thesis by Publication, had the general objective of developing a diagnostic instrument for readiness factors, a necessary condition in preparation for digital transformation. This instrument aims to compare the current quality management system (QMS) with the expected requirements of Quality 4.0 in industrial organizations. To achieve this purpose, a qualitative and mixed research approach was employed. Initially, Bibliometric Analysis and a Systematic Literature Review (SLR) were used, resulting in Article 1, to explore the Quality 4.0 concept, identify its requirements, challenges, benefits, and research gaps, as well as discuss the developments of Industry 5.0. Subsequently, the Design Science Research (DSR) strategy was applied for the construction and validation of the artifact. As main contributions, the thesis proposes a practical conceptualization of Quality 4.0 and the original use of the *Targeted Data* concept in quality management, mitigating the information overload stemming from the ease of digital data collection. The central result of the research is the development of an artifact (software) that determines the degree of adherence to Quality 4.0 requirements. This instrument provides managers and industrial organizations with the necessary knowledge for a better understanding of the concept and for the strategic planning of Quality 4.0 implementation actions.

**Keywords:** Quality 4.0; Industry 4.0; Industry 5.0; readiness assessment; digital transformation; challenges and benefits; quality system management.

## UTILIDADE

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS, propostos pela Organização das Nações Unidas – ONU em 2015, se apresentam como um modelo que visa a estabelecer à sociedade um futuro melhor e sustentável. Composto por 17 objetivos, os países membros declararam compromisso para sua implantação até o ano de 2030 (ONU, 2015).

Esta tese está relacionada aos seguintes ODS:



- a) **ODS 8 – Trabalho decente e Crescimento econômico:** tem por finalidade a promoção sustentável do emprego, do trabalho produtivo e seguro com crescimento econômico. Esta pesquisa, ao propor um modelo à implementação da Qualidade 4.0 (Q4.0) em apoio à Indústria 4.0 (I4.0), contribui para o alcance do objetivo devido ao seu caráter preventivo e proativo para redução ou eliminação de erros e falhas nos processos das organizações industriais, o que melhora sua capacidade produtiva e impulsiona novas competências ao pessoal.



- b) **ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura:** o objetivo busca proporcionar infraestrutura capaz de proporcionar sustentabilidade à industrialização apoiada pelo progresso tecnológico. Esta tese está alinhada ao objetivo de aplicação da inovação tecnológica aos processos produtivos, ao disponibilizar ferramental adequado para incrementar a produtividade, o que gera novas oportunidades e otimiza o uso dos recursos disponíveis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações nas bases <i>Scopus</i> e <i>WoS</i> : termo de pesquisa “ <i>Quality 4.0</i> ” .....	20
Figura 2 – Planejamento da tese alinhado aos objetivos de pesquisa .....	21
Figura 3 - Relação entre a Revolução Industrial e a Qualidade .....	25
Figura 4 – Publicações na base <i>Scopus</i> com termo de pesquisa “ <i>Industry 5.0</i> ” .....	29
Figura 5 – Linha do tempo da qualidade .....	33
Figura 6 – Contribuições dos ‘Gurus da Qualidade’ .....	34
Figura 7 – Estrutura do trabalho .....	46
Figura 8 – Método de fases de pesquisa DSR .....	49
Figura 9 – Vínculos entre as fases da pesquisa DSR e o desenvolvimento do artefato .....	51
Figura 10 – Categorias de lacunas relacionadas à implementação da Qualidade 4.0 .....	54
Figura 11 – Desafios para a implementação da Qualidade 4.0 .....	55
Figura 12 – Detalhamento do projeto de construção do artefato .....	58
Figura 13 – Temas abordados para a definição das Seções do artefato .....	59
Figura 14 – ‘Quadro de pontuação das Afirmativas’ .....	61
Figura 15 – Escala de priorização de ações em atendimento aos requisitos esperados da Qualidade 4.0 .....	62
Figura 16 – Índice DQ <sup>+</sup> por Seção e Índice DQ <sup>+</sup> Geral .....	63
Figura 17 – Informação sobre priorização de planos de ação por Seção .....	63
Figura 18 – Resultados da aplicação do artefato (1) .....	68
Figura 19 – Resultados da aplicação do artefato (2) .....	69
Figura 20 – Esquema da aplicação do <i>Targeted Data</i> no gerenciamento da Q4.0 ...	86

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 .....	31
Quadro 2 - Conceitos da Qualidade 4.0 .....	41
Quadro 3 - Síntese dos Artigos de pesquisa que compõem a tese .....	45
Quadro 4 - Detalhamento das fases do método DSR .....	50
Quadro 5 - Pré-requisitos para aplicação do artefato .....	51
Quadro 6 - Seções estruturadas das questões do artefato .....	60
Quadro 7 - Dados gerais das empresas e datas de aplicação do artefato .....	67
Quadro 8 - Desempenho geral do artefato .....	80
Quadro 9 - Questões livres para avaliação e validação do artefato .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas / Siglas	Descrição
AGV	<i>Automated Guide Vehicle</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AR	<i>Augmented Reality</i>
ASQ	<i>American Society for Quality</i>
BDA	<i>Big data analytics</i>
CCQ	Círculos de Controle da Qualidade
CEP	Controle Estatístico de Processo
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CPS	<i>Cyber-Physical System</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
I4.0	Indústria 4.0
I5.0	Indústria 5.0
I6.0	Indústria 6.0
IA	Inteligência Artificial
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
Q4.0	Qualidade 4.0
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realidade Virtual)
TBP	<i>Thesis by Publication</i>
TQC	<i>Total Quality Control</i>
TQM	<i>Total Quality Management</i>
UNIP	Universidade Paulista
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>

## SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	15
1.1 Introdução .....	15
1.2 Problematização.....	17
1.3 Objetivos .....	18
1.3.1 Objetivo Geral .....	19
1.3.2 Objetivos específicos .....	19
1.4 Justificativa.....	19
1.5 Metodologia resumida .....	21
1.6 Organização da estrutura da Tese .....	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	23
2.1 Transformação digital nas organizações e impactos .....	23
2.1.1 Importância da informação na transformação digital.....	23
2.2 Contexto evolutivo da indústria .....	24
2.2.1 Indústria 1.0 .....	25
2.2.2 Indústria 2.0 .....	26
2.2.3 Indústria 3.0 .....	26
2.2.4 Indústria 4.0 .....	27
2.2.5 Indústria 5.0 (I5.0).....	28
2.2.6 Indústria 6.0 (I6.0) .....	29
2.3 Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.....	30
2.4 Evolução da Qualidade .....	33
2.4.1 Era da inspeção e do controle .....	35
2.4.2 Era do controle estatístico do processo .....	35
2.4.3 Era do gerenciamento da qualidade total e normatização do SGQ .....	36
2.4.4 Era da tecnologia digital na qualidade .....	37
2.5 Qualidade 4.0 (Q4.0).....	38
2.5.1 Conceitos da Qualidade 4.0.....	40
2.6 Fatores de prontidão .....	42
3 MÉTODOS DE PESQUISA.....	44
3.1 Estrutura do método de pesquisa.....	44
3.2 Análise bibliométrica.....	46
3.3 Revisão sistemática da literatura – RSL.....	47
3.4 <i>Design Science Research – DSR</i> .....	48
3.4.1 Fundamentos do DSR.....	48
3.4.2 Método das fases de pesquisa da construção do artefato .....	49

3.5 Pré-requisitos para aplicação do artefato .....	51
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1 Artigo 1 .....	52
4.1.1 Resumo Expandido – artigo 1 .....	52
4.2 Sistema de diagnóstico de prontidão .....	56
4.2.1 Confidencialidade da informação .....	56
4.2.2 O Artefato .....	56
4.2.3 Detalhamento do projeto de construção do artefato .....	57
4.2.4 Estrutura do artefato .....	58
4.2.5 Questionário do artefato – Seções estruturadas .....	59
4.2.6 Indicador DQ <sup>+</sup> por Seção e Indicador DQ <sup>+</sup> Geral .....	62
4.2.7 Comunicação dos resultados de pesquisa – Diretriz DSR.....	64
4.2.8 Aplicação do artefato.....	64
4.2.9 Dados coletados pelo artefato .....	66
4.2.10 Preparação à implementação da Qualidade 4.0 .....	70
4.2.11 Transição digital da qualidade .....	71
4.2.12 Análise de dados baseada em dados .....	72
4.2.13 O papel da liderança e dos colaboradores.....	72
4.2.14 Ferramentas tradicionais da Qualidade e a Qualidade 4.0 .....	73
4.2.15 Prontidão e maturidade da organização .....	73
4.2.16 <i>Big data</i> para SGQ.....	74
4.2.17 Infraestrutura e tecnologias habilitadoras aplicadas .....	75
4.2.18 Transformação digital e a cultura da qualidade.....	76
4.2.19 Integração com conceitos sociais e sustentabilidade.....	76
4.2.20 Gerenciamento de riscos e de mudanças.....	77
4.2.21 Custos e investimentos direcionados à qualidade digital .....	79
4.2.22 Validação do artefato .....	79
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
5.1 Contribuições práticas e teóricas .....	85
5.2 Limitações e estudos futuros.....	87
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
APÊNDICE A – Questionário de avaliação e validação do artefato.....	102
APÊNDICE B – Comitê de ética .....	103
APÊNDICE C – Certificado de registro de programa de computador .....	109

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem por finalidade apresentar o contexto em que as organizações industriais estão inseridas em meio à aplicação de estratégias inovadoras da qualidade e aos impactos que enfrentam no cenário competitivo ao qual estão submetidas. Nele, são apresentados a pergunta de pesquisa que norteia esta tese, o objetivo geral e os objetivos específicos, a metodologia resumida e a justificativa sobre sua relevância e seu interesse.

### 1.1 Introdução

Os dias atuais têm sido marcados por acirrada competição nos mercados nacional e internacional. Esse cenário não aparenta tendência de se modificar no longo prazo. Atividades relacionadas ao gerenciamento das empresas são impactadas devido aos efeitos da globalização, da customização de produto na modalidade de fabricação em massa e à constante exposição à competição (Bielecki *et al.*, 2024). A situação requer atenção das empresas com atualização constante e sistemática de métodos, processos, infraestrutura, pessoal, tecnologia, para a manutenção da sobrevivência do negócio no decorrer do tempo, um sinônimo para lucratividade.

A implementação de novas tecnologias por meio da inovação tem sido uma resposta das organizações como medida de enfrentamento à concorrência. Essa prática na forma de aplicação da automação e da robótica, presentes na Indústria 4.0 (Mehta *et al.* 2024; Mahin *et al.*, 2024), tem como efeito o estabelecimento de mudanças para melhoria, por exemplo, dos atributos da produção relacionados à precisão operacional, à velocidade, à flexibilidade e à customização. Paralelamente, outras inovações de apoio no campo da gestão de processos, tais como a manufatura enxuta, promovem o aprimoramento operacional, ao propor técnicas e ferramental para eliminação de desperdícios, falhas e erros nos processos (Mehta *et al.* 2024), com vistas ao aumento da capacidade e da satisfação do cliente — o que apresenta requisitos cada vez mais exigentes e complexos quanto ao atendimento de suas expectativas e necessidades (Liu *et al.* 2023). As organizações inseridas num cenário

desafiador têm na Indústria 4.0 uma oportunidade para tomada de decisão estratégica (Vlad; Severin, 2022), o que visa a impulsionar o negócio a um nível superior de desempenho.

Dessa forma, estimula-se a constante busca por aprimoramento, principalmente pela via da aplicação da inovação em várias frentes, segundo Blichfeldt e Faullant (2021), associada à obtenção de vantagem competitiva, à excelência e à melhoria contínua dos processos e da qualidade dos produtos e serviços. Cabe que as empresas avaliem esse estado de coisas e, se possível, antecipem resposta adequada. O avanço das tecnologias exige mudanças na velocidade da produção em atendimento às demandas mais complexas dos clientes (Efimova *et al.*, 2021). Exige ainda que as organizações que se adaptaram às mudanças tendam a apresentar crescimento produtivo, vantagem competitiva e oportunidades de ampliação dos negócios (Santhi; Muthuswamy, 2023). O desafio colocado é responder rapidamente, oferecer à concorrência razão para reação, sob pena de defasagem quanto ao atendimento aos desejos do cliente.

Como resultado há a nova e rápida demanda de busca da excelência operacional com aplicação prática da inovação nas operações, suportada pela tecnologia digital, o que conduz a diferenciadas soluções de natureza disruptiva (Ali; Johl, 2022). Assim é que, em 2011, na Alemanha, foi lançado o conceito da Indústria 4.0 (I4.0) - uma linha estratégica para capacitar as indústrias daquele país às necessidades emergentes de atendimento ao cliente e à geração de vantagem competitiva (Chiarini, 2020). A I4.0 é identificada como uma nova revolução industrial, movimento natural direcionado a lidar com a realidade do mercado, com o uso de tecnologias digitais – denominadas tecnologias habilitadoras da I4.0. Uso de sensores inteligentes, *IoT* (*Internet das Coisas*), computação em nuvem, análise de dados e *big data*, simulação digital, robótica e automação, IA (Inteligência Artificial), realidade aumentada e manufatura aditiva estão entre estas tecnologias (Martin-Gomez; Agote-Garrido; Lama-Ruiz, 2024). É expectativa que a aplicação dessas tecnologias habilitadoras da I4.0 nas organizações tragam resultados que supram as demandas dos clientes e, por conseguinte, fortaleçam o alcance da vantagem competitiva das organizações.

Historicamente, a qualidade se transforma constantemente com a aplicação de novos modelos e práticas: inspeção e controle, métodos estatísticos, garantia da qualidade, gestão da qualidade (Zonnenshain; Kenett, 2020). Promove-se, assim, a

melhoria dos processos e dos produtos em atendimento aos desejos dos clientes. Para esse propósito, são identificados os fatores de prontidão, considerados pré-requisitos que servem à avaliação do preparo da organização à implementação da Qualidade 4.0 (Sony *et al.*, 2021).

Apontam Gunasekaran; Subramanian; Ngai (2019) que a atuação próxima da qualidade nos processos organizacionais fornece percepção clara de que os gestores da qualidade são desafiados cotidianamente a responder a questões relacionadas à melhoria e à excelência dos processos, dos produtos e dos serviços, com o intuito de se ser mais assertivo, mais rápido e mais eficiente.

## 1.2 Problematização

O mercado globalizado aliado à emergência das necessidades do cliente que se apresenta em uma frequência e complexidade crescentes, além da pressão competitiva têm demandado das indústrias constantes mudanças em sua forma de conduzir o negócio. O atual contexto em que as organizações industriais estão inseridas implica adotar práticas inovadoras e tecnológicas, aplicadas a produtos, a processos, a pessoas, por meio da introdução de novas e diversas estratégias (Adsiz; Ozturkoglu, 2025). A melhoria contínua de produtos, associada ao resultado da gestão da qualidade, pode atender expectativas e desejos dos clientes, o que conduz a organização a uma situação vantajosa para enfrentar a concorrência (Atmaja *et al.*, 2025).

Assim, a indústria, para continuar a satisfazer o cliente, desenvolve e implementa novas tecnologias de natureza disruptiva em ondas evolutivas, o que se convencionou denominar Revolução Industrial, e desempenha papel importante na expansão industrial (Markatos; Mousavi, 2023). Atualmente, encontramo-nos na Quarta Revolução Industrial, fato que habilita as organizações a produzir com mais eficiência, a utilizar menos recursos, a ter maior produtividade, a oferecer oportunidade à geração de vantagem competitiva. Segundo Zonnenshain e Kenett (2020), a quarta revolução industrial é ocasião para a qualidade alcançar uma posição de destaque nessa passagem. A qualidade por sua própria natureza também atende a circunstância de acompanhar a transformação da indústria, em apoio à solução de problemas com o uso da evolução tecnológica para a execução de análises em tempo real e para o crescimento da competitividade, da satisfação do cliente e da lucratividade (Javaid *et al.*, 2021; Antony *et al.* 2023a).

Rico *et al.* (2024) argumentam que a I4.0 originou um novo formato de gestão da qualidade, o que se denominou Qualidade 4.0 (Q4.0), em apoio aos processos produtivos para gerar vantagem competitiva num mercado global, uma ação disponível para busca da excelência da operação (Zonnenshain; Kennet, 2020). Acrescentam Escobar, Cantoral-Ceballos e Morales-Menendez (2024), que se deve examinar suas limitações e conceber potenciais soluções que atendam o novo contexto à altura da complexidade industrial. Como ação integrada, a Q4.0 busca incorporar as tecnologias habilitadoras inicialmente desenvolvidas para a I4.0. A implementação efetiva da Q4.0 passa pela avaliação dos fatores de prontidão — o grau de preparação das empresas para adotar as tecnologias habilitadoras (Antony *et al.*, 2023a).

Sarker e Dunston (2024) consideram a Q4.0 em uma abordagem que complementa os sistemas de gestão da qualidade tradicionais, também denominados sistemas legados. Os autores mencionam que, além da aplicação do ferramental tecnológico representado pelas tecnologias habilitadoras da I4.0, a implementação da Q4.0 implica transformação da cultura organizacional e do preparo das lideranças para o alcance de melhor desempenho operacional.

Entretanto, por se tratar de um conceito novo e, por isto, carente de padronização do conceito (Sarker; Dunston, 2024; Sony *et al.*, 2021; Antony *et al.*, 2023b), ainda está longe de ser uma realidade de fato implantada nas organizações industriais. Assim, o presente trabalho tem como questões de pesquisa:

- Q1) Qual o conceito de Qualidade 4.0? Está suficientemente maduro?
- Q2) Quais os benefícios e desafios da implantação da Qualidade 4.0?
- Q3) Como relacionar as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 às necessidades para a implementação da Qualidade 4.0 em organizações industriais?
- Q4) Como saber se as organizações industriais estão prontas para a Qualidade 4.0?

### **1.3 Objetivos**

Esta pesquisa se propõe o alcance dos seguintes objetivos:

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é desenvolver uma sistemática para diagnóstico dos fatores de prontidão para implantação da Qualidade 4.0 em organizações industriais.

### 1.3.2 Objetivos específicos

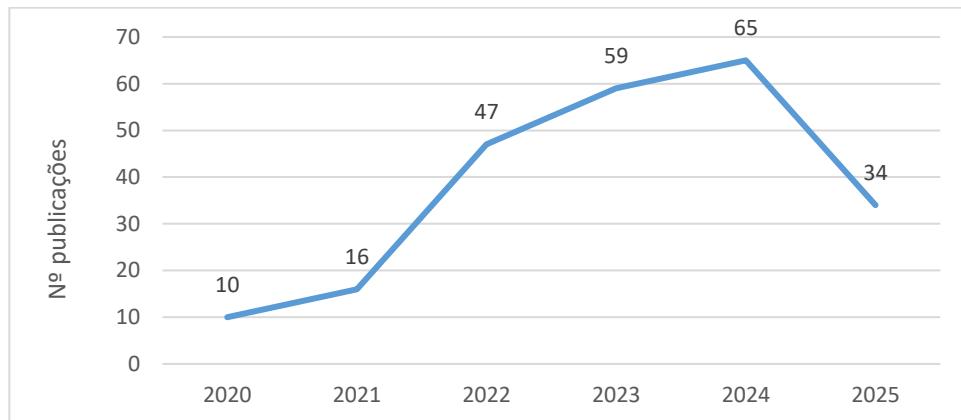
Os objetivos específicos no desenvolvimento deste trabalho são:

1. Explorar o conceito de Qualidade 4.0 e eventuais desdobramentos no contexto da Indústria 5.0, com vistas a uma eventual evolução para Qualidade 5.0;
2. Identificar os requisitos da Qualidade 4.0 e sua relação com os sistemas de gestão da qualidade tradicionais (sistemas legados);
3. Identificar desafios e benefícios da Qualidade 4.0 para as organizações;
4. Desenvolver e validar um instrumento de diagnóstico por meio de especialistas de organizações industriais, analisar os resultados com fins a gerar conhecimento aos gestores da qualidade para implementação da Qualidade 4.0.

## 1.4 Justificativa

A avaliação do interesse acadêmico sobre o tema foi realizada por meio de pesquisa em maio de 2025, nas bases *Scopus* e *Web of Science (WoS)*. Abrangeu-se o período de 05 anos, com a utilização do termo de pesquisa “*Quality 4.0*”, em documentos como artigos e revisão de artigos. Aplicados esses critérios foram encontrados um total de 231 artigos, conforme apresentado na Figura 1. Observa-se que se trata de tema que emerge, já de interesse na academia.

Figura 1 – Número de publicações nas bases Scopus e WoS: termo de pesquisa “Quality 4.0”



Fonte: Elaborado pelo autor

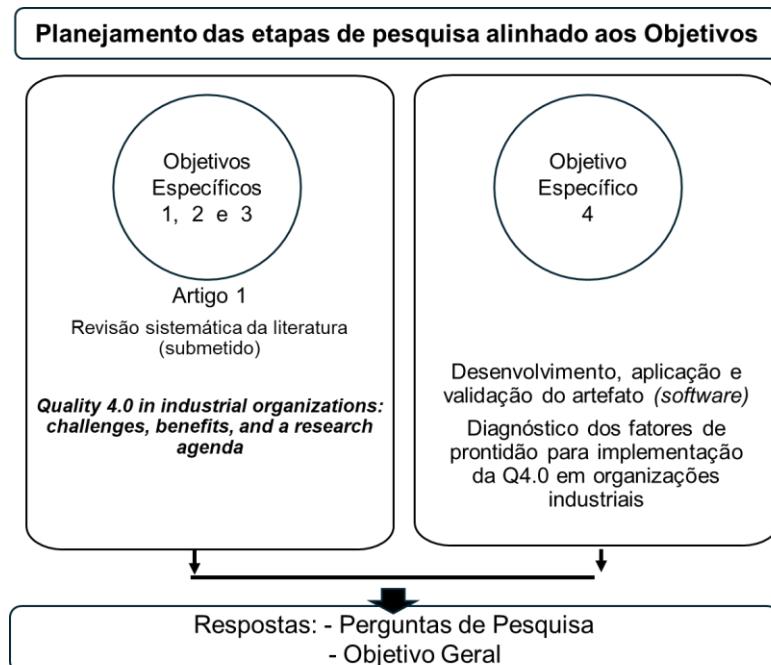
Esta pesquisa se justifica em função da oportunidade de se poder desenvolver, gerar conhecimento às empresas e aos gestores da qualidade que estão pouco atendidos de estudos relacionados à implementação da Qualidade 4.0. Pretende-se contribuir para a compreensão atual do tema, com a identificação de fatores de prontidão e proposição de um instrumento de diagnóstico à implementação da Qualidade 4.0 nas organizações industriais.

A implementação da Indústria 4.0 nas organizações justifica o desenvolvimento das práticas da Qualidade 4.0. Entendido o conceito da Indústria 4.0, Jokovic *et al.* (2023) consideram a mesma Qualidade como um elemento associado fundamental. A Qualidade 4.0 absorve os recursos e as tecnologias melhoradas do novo modelo industrial; trabalha harmônica e integrada no formato digital. Souza *et al.* (2022) argumentam que as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, ao serem adaptadas ao Sistema de Gestão da Qualidade – SGQ, apoiam as integrações técnicas, da qualidade e da manufatura. Os autores reforçam que, nesse contexto de mudanças, as adequações tecnológicas fornecem o direcionamento à Qualidade 4.0. A Qualidade 4.0, conforme apontam Avilés-Sacoto *et al.* (2024), deriva da Indústria 4.0 e suporta — por meio do uso da tecnologia digital disponibilizada pela indústria — a manutenção da qualidade de processos e produtos.

## 1.5 Metodología resumida

A Figura 2 mostra a metodologia resumida, com o planejamento das etapas da pesquisa, para responder à pergunta de pesquisa e ao alinhamento com os objetivos geral e específicos.

Figura 2– Planejamento da tese alinhado aos objetivos de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

O artigo 1 ‘*Quality 4.0 in industrial organizations: challenges, benefits, and research agenda*’ é uma revisão sistemática da literatura que identifica e analisa a literatura referente ao tema Qualidade 4.0 em alinhamento com os Objetivos Específicos 1, 2 e 3. Nessa etapa, foram levantados 66 artigos relevantes que ampliam o conhecimento sobre benefícios e desafios à implementação da Q4.0, a identificação de lacunas para futuras pesquisas, a elaboração de propostas de conceituação da Q4.0 e *Targeted Data*, que é abordagem para evitar a sobrecarga de informação e para efetuar a respectiva análise para fins do gerenciamento da qualidade.

O Objetivo Específico 4 refere-se ao desenvolvimento, à aplicação e à validação de um artefato (*software*) com a intenção de apontar o grau de aderência do atual sistema de gestão da qualidade, relacionado aos parâmetros esperados da Qualidade 4.0, o que gera conhecimento aos gestores para fins de implementação da Qualidade 4.0.

A etapa final consiste em atender o Objetivo Geral e responder às questões

de pesquisa propostas nesta tese.

## **1.6 Organização da estrutura da Tese**

Esta tese está estruturada em 5 Capítulos, cujas funções específicas são apresentadas como segue.

O Capítulo 1 apresenta o contexto da pesquisa com análise do cenário no qual o tema está inserido, o escopo e a delimitação da pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, as questões de pesquisa, a problematização, a justificativa sobre o tema da pesquisa e a metodologia resumida.

No Capítulo 2 – Fundamentação teórica, é apresentada revisão da literatura relevante para melhor entendimento das implicações da Qualidade 4.0 em apoio à Indústria 4.0; nele, também se expõem as bases teóricas relacionadas à proposta da pesquisa.

Temos no Capítulo 3 – Métodos o detalhamento do método de pesquisa adotado na tese de forma a assegurar o rigor científico e a repetibilidade dos resultados encontrados.

O Capítulo 4 – Análise e discussão dos resultados mostra a análise e a discussão dos resultados obtidos na pesquisa, parte deles apresentados no formato de artigo e de produto técnico: (a) Artigo 1: aprovado para publicação em periódico; (b) Produto técnico: artefato (*software*). Dessa forma, evidencia-se o alinhamento dos resultados aos objetivos e a pergunta de pesquisa, com contribuição à geração de conhecimento sobre a Qualidade 4.0.

Por fim, no Capítulo 5 – Conclusão, são apresentadas as conclusões da pesquisa, suas limitações e suas contribuições ao corpo do conhecimento.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta um levantamento da literatura relevante ao objeto desta pesquisa, relacionada ao contexto histórico da indústria e da qualidade, a Indústria 4.0, a Qualidade 4.0 e seus pontos de aderência.

### 2.1 Transformação digital nas organizações e impactos

Uma das formas encontradas pelas organizações para atender a crescente demanda por excelência operacional está representada pela introdução da transformação digital em seus processos. Apontam Verhoef *et al.* (2021) que sua implementação requer o estabelecimento de estratégia organizacional que inclua disponibilidade de tecnologia e recursos digitais. O impacto direto dessas tecnologias integradas ao cenário industrial, definidas por estratégias que modificam o formato do gerenciamento da qualidade, promove o alcance de melhor eficiência, de precisão e de monitoramento de processos críticos (Verma; Sangle, 2024), e isto agrega valor ao negócio com o emprego da Qualidade 4.0. Mencionam El Manzani, Belahouaoui e Tajouri (2025) que a transformação digital relacionada à Qualidade 4.0 integra as tecnologias em um amplo campo de aplicações referentes à detecção de problemas, à alavancagem de novas oportunidades. O objetivo é a tomada de decisão estratégica rápida, que acompanhe a velocidade requerida pelo dinamismo próprio dos processos em que se empregam componentes digitais.

#### 2.1.1 Importância da informação na transformação digital

Afirma Kumar (2022) que a transformação digital é o caminho para a Indústria 4.0 e a Qualidade 4.0. Nesse contexto, a liderança orientada ao conhecimento permite a incorporação do novo na organização da forma de novos modelos, funções e comportamentos, o que desempenha importante papel no processo de transformação digital (Kumar, 2022; Sony *et al.*, 2020).

O avanço tecnológico proporciona às organizações alta velocidade para coleta de dados, fato que aumenta a capacidade de geração de dados, algo impensável há pouco tempo (Hor; Crossley, 2005). Sensores inteligentes (*big data*,

armazenamento em nuvem, manufatura aditiva, softwares com funções de controle e operação, IoT, integração de sistemas produtivos com IA, dispositivos eletrônicos diversos e contribuições de outras tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0) (Prashar, 2023; Santhi; Muthuswamy, 2023) podem ser encontrados em pontos críticos dos processos industriais, na captura de dados em tempo real, muitas vezes produto a produto.

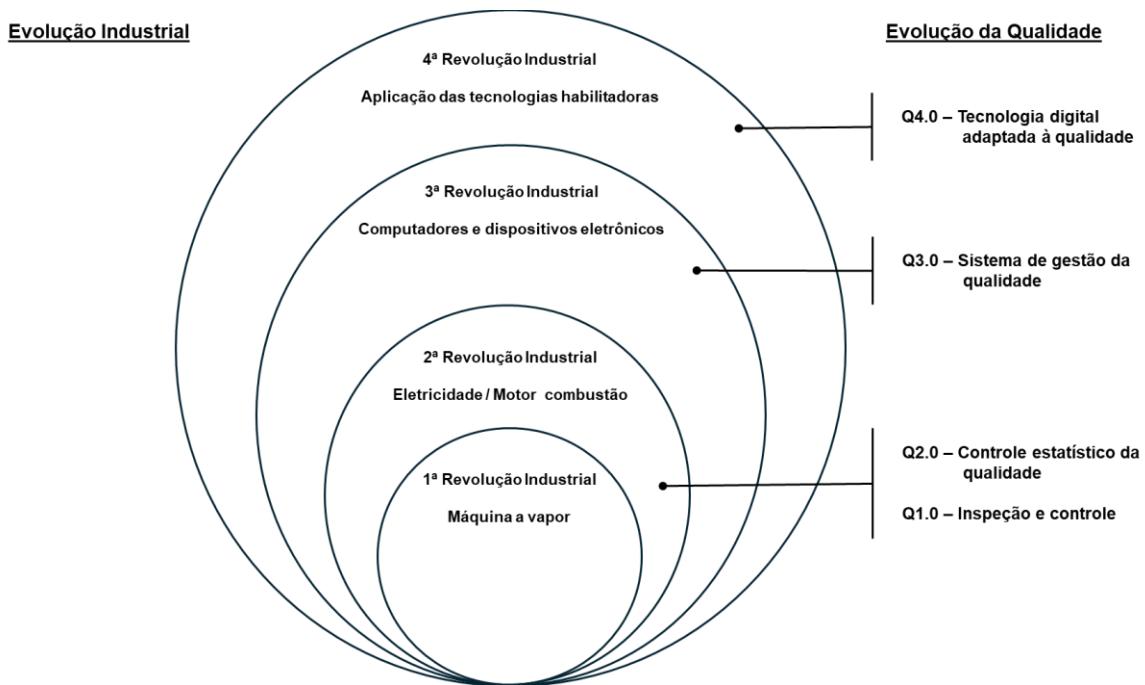
O monitoramento próximo das variáveis de processos, com acompanhamento em tempo real, permite a tomada de ação de reparação, como a de prevenção baseada na análise de dados (Dias *et al.*, 2022), uma característica da qualidade com maior força em ambiente de Indústria 4.0 e da Qualidade 4.0. A facilidade para extrair de diferentes fontes – com alta velocidade e armazenamento de grande volume de dados (*big data*), incluindo o respectivo processamento / gerenciamento (*big data analytics*) – sem dúvida concorre para aumento da produtividade, da qualidade e otimização dos recursos de processos (Aceto; Persico; Pescapé, 2020; Khan *et al.*, 2025). Também argumentam Pandey, Chaudhary e Tóth (2025) que volume exponencial de dados gerados e processados por meio da tecnologia digital tem impulsionado a busca pela eficácia dos processos, o que resulta melhorias significativas e maior flexibilidade operacional.

## 2.2 Contexto evolutivo da indústria

O cenário industrial se altera constantemente, fruto da manifestação do cliente por novas necessidades, desejos e expectativas relacionados aos produtos e aos serviços que ele consome (Gunasekaran *et al.*, 2019). Com o propósito de atender esses movimentos do mercado, em parte se antecipando à explicitação do cliente, são desenvolvidas novas tecnologias para serem aplicadas aos meios produtivos. A dinâmica de saltos tecnológicos importantes se convencionou denominar de Revoluções Industriais. A cada salto tecnológico relevante, uma nova onda de revolução industrial substituiu a anterior (Liu *et al.*, 2023). Simultaneamente, ao avanço experimentado pelos processos da produção, a qualidade acompanha essa evolução e configura uma relação direta de apoio entre esses processos, o que altera práticas relacionadas ao produto, aos processos, às pessoas, aos envolvimentos com clientes e fornecedores (Kushwara; Talib, 2025). Liu *et al.* (2023) traçam esse paralelo

entre os processos evolutivos da produção e da qualidade conforme são incorporados os desenvolvimentos tecnológicos. A Figura 3 mostra a relação entre as ondas evolutivas correspondentes entre a indústria e a qualidade.

Figura 3 - Relação entre a Revolução Industrial e a Qualidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo a *American Society for Quality* - ASQ (2025), a Quarta Revolução Industrial, em que nos encontramos atualmente, está alicerçada no rápido desenvolvimento tecnológico, o que altera o formato da realização do trabalho, das pessoas, dos negócios e das organizações.

#### 2.2.1 Indústria 1.0

A transição da produção manual e artesanal para a mecanizada, com a introdução da máquina a vapor, inicialmente na manufatura têxtil, alterou a produção pela força de trabalho braçal para o enfoque em capital investido em máquinas (Markatos; Mousavi, 2023). A diferença fundamental reside na transição para a energia a vapor, em contraposição às energias humana, animal e hídrica até então utilizadas. O desenvolvimento de máquinas impulsionou a produção em larga escala, o que resulta uma reorganização social de uma vida predominantemente rural para urbana. Por esse tempo, a qualidade era definida como a apresentação de

uniformidade do produto no decorrer da produção.

### 2.2.2 Indústria 2.0

O início do século XX caracterizou-se pela aplicação do avanço da tecnologia, representado pelo uso da eletricidade e do motor de combustão, da gestão de processos e da produção em massa (Markatos; Mousavi, 2023). Surge o Sistema Taylor que determinou um modelo de produção em massa. Ele foi desenhado com novas técnicas relacionadas a estudos de movimentos e de tempo, tarefas definidas em postos de trabalho e estabelecimento de cotas de produtividade (Zonnenshain; Kennet, 2020). A Indústria 2.0 foi marcada pelo enfoque dado à eficiência e ao fluxo dos processos, abertura à experimentação para o desenvolvimento da linha de montagem. A elaboração de sistemas administrativos foi importante para compreender e desenvolver a linha de montagem, uma aplicação conjunta de inovações empresariais e novas técnicas produtivas — uma perspectiva da prática associada ao abstrato (McKinlay; Wilson, 2012).

### 2.2.3 Indústria 3.0

Nos anos 1980, a tecnologia impulsionada pelo uso de computadores ofereceu oportunidade a uma nova mudança com o interesse de sua aplicação na automação do processo produtivo (Alarcón; Alarcón, 2025; Markatos; Mousavi, 2023). A Indústria 3.0 está baseada no uso da automação de processos iniciada na década de 1960 (Lynn *et al.*, 2020), principalmente com controladores lógicos programáveis - CLPs (dispositivos eletrônicos que controlam sistemas de automação industrial). Ela baseia-se ainda em controladores numéricos computadorizados - CNCs (automação com uso de comandos programados que controlam movimentos de máquinas e equipamentos) para garantir maiores flexibilidade e eficiência na manufatura, no armazenamento, na inspeção (Martell *et al.*, 2023). Em acréscimo, há os benefícios relacionados à mitigação de defeitos e de falhas, maiores rapidez e flexibilidade dos processos, maior redução de custos operacionais.

A escala de produção com sistema de fluxo contínuo, apoiado pelo ferramental tecnológico, permitiu a personalização em massa (Zonnenshain; Kennet, 2020). Adicionalmente, outros processos da organização se reestruturam, como a manutenção que se atualiza com a introdução de novas técnicas. Seriam elas

manutenção planejada, preventiva, monitoramentos para evitar parada ou quebra de máquina, manutenção produtiva total. O que se quer é eliminar ou mitigar paradas de máquinas; busca-se, consequentemente, contribuir para o aumento de produtividade (Mohan *et al.*, 2021).

#### 2.2.4 Indústria 4.0

Em 2011, surge na Alemanha o conceito Indústria 4.0 (I4.0). Uma estratégia inovadora e apoiada para impulsionar a geração de competitividade. De modo geral, o conceito emprega sistemas ciber-físicos conectados à *Internet das Coisas* - IoT (Virmani *et al.* 2023; Chiarini, 2020), orientado para os processos da manufatura. Esse conjunto de tecnologias inovadoras e disruptivas oferece oportunidade para modificar o padrão atual da manufatura. Ele melhora os processos produtivos, proporciona aos clientes e às empresas maior valor agregado (Schmidt *et al.*, 2023; Castelo-Branco *et al.* 2023).

O avanço tecnológico disponibilizou aos processos produtivos uma maior autonomia (Zonnenshain; Kennet, 2020), evidenciada pela transformação acelerada, de natureza disruptiva. Os exemplos disto se encontram na aplicação de sensores em pontos críticos do processo, na coleta de grande quantidade de dados, no armazenamento em nuvem, na simulação de processo em ambiente virtual. Assim, como afirmam Singh *et al.* (2021), a Indústria 4.0 proporcionou operação com uso de sistemas mais complexos, autônomos, inteligentes, com alto grau de conexão entre processos e equipamentos. O fato gera grande quantidade de informações em tempo real, canalizadas a melhorar a operação, os serviços de manutenção, a troca de ferramentas e a busca de novas competências digitais direcionadas ao pessoal envolvido.

A atenção, antes direcionada ao produto e aos processos, agora é voltada à análise substancial de dados e à tomada de decisão em tempo real (Bousdekis *et al.* 2023). A Indústria 4.0 possui como peculiaridade distinguir-se pela automação empregada, associada à flexibilidade dos processos produtivos, o que permite operar em escala de produção de massa com características de customização e de obtenção de melhor qualidade (Zhong *et al.*, 2017).

Mencionam Martell *et al.* (2023) que algumas tecnologias da Indústria 3.0 são consideradas básicas numa relação de precedência à implantação da Indústria 4.0.

Benslimane *et al.* (2024) confirmam essa relação com a interação entre a Manufatura Enxuta e as tecnologias da Indústria 4.0. Consideram que a produção *just-in-time* se ajusta aos princípios de fabricação orientados pela demanda e por dados, como os preconizados pela Indústria 4.0.

A indústria 4.0 emprega maior nível de automação, além de agregar digitalização, análise de grande quantidade de dados em tempo real, aplicação de IA entre outras inovações digitais, desenvolvidas para permitir o alcance de melhores níveis de desempenho operacional por meio do uso de ferramentas digitais. Há a implementação de diferentes aplicativos por meio dos quais se espera maior velocidade, melhor flexibilidade associada à manufatura e ao gerenciamento das atividades da Indústria 4.0. Tudo vem alicerçado na coleta e na análise de grande produção de dados dos processos na própria organização e mesmo na cadeia produtiva (Govardhan *et al.*, 2025; Khasawneh; Dweiri, 2024).

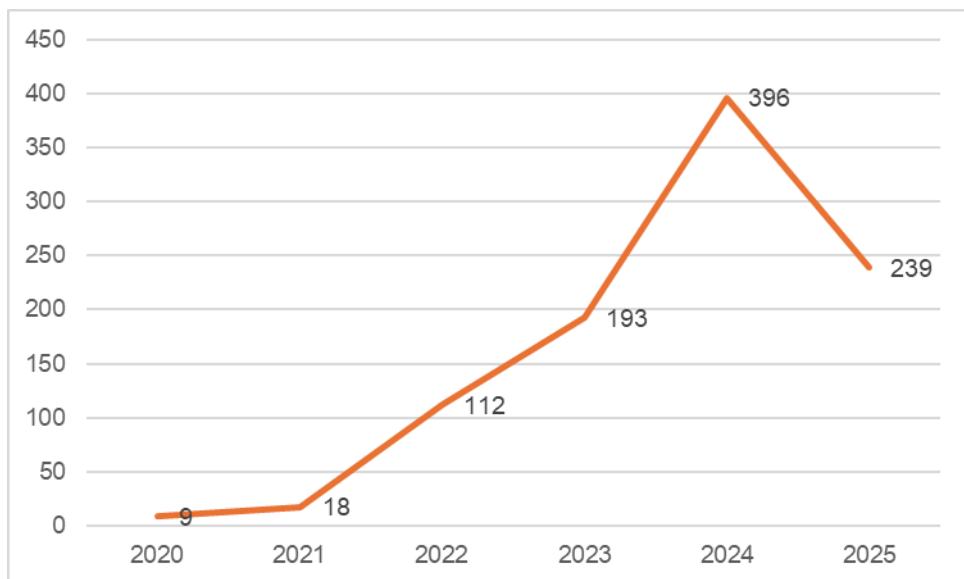
A disponibilização das tecnologias habilitadoras, como mencionam Rifqi *et al.* (2021), impulsionou, como resposta à transformação digital, o surgimento de novos conceitos em apoio à Indústria 4.0. Alguns deles seriam, na extensão, *Lean Six Sigma* 4.0, *Lean* 4.0, Sustentabilidade 4.0, Ágil 4.0, Manutenção 4.0, *Supply Chain Management* 4.0 e Qualidade 4.0. São esperados benefícios advindos da Indústria 4.0, tais como os identificados na literatura por Masood e Sonntag (2020): redução de custos, melhorias na qualidade e na produtividade, maiores eficiência, flexibilidade da operação e potencial de geração competitiva.

## 2.2.5 Indústria 5.0 (I5.0)

Embora a transformação digital da Indústria 4.0 ainda se encontre em fase de pesquisa e transição, pendente de solução em várias frentes de sua implantação, já é possível se deparar com trabalhos acadêmicos relacionados ao conceito da Indústria 5.0, conforme comentam Longo, Padovano e Umbrello (2020). Acompanhando a tendência aberta pelo desenvolvimento tecnológico já à disposição da Indústria 4.0, surgiu a intenção de integrar novos requisitos ao debate, relacionados à sustentabilidade de forma geral, à centralização no ser humano e na resiliência da cadeia produtiva (Martin-Gomez; Agote-Garrido; Lama-Ruiz, 2024; Piccarozzi *et al.*, 2024, conforme o proposto pela Comissão Europeia em 2020 (European Commission, 2021).

A proposta de incorporação desses itens à Indústria 4.0 tem por base a admissão de aspectos tecnológicos, humanos, de sustentabilidade e éticos à transformação digital das indústrias (Maljugic *et al.*, 2024). Pesquisa na base *Scopus*, com a utilização do termo de pesquisa “*Industry 5.0*”, entre artigos e revisões de artigos, na área da Engenharia, publicados nos últimos 05 anos, encontrou 967 referências. Com isto demonstra-se que o tema despertou a disposição de pesquisa sobre o assunto da parte do público acadêmico, conforme mostrado na Figura 4. Observa-se interesse crescente em publicações científicas sobre Indústria 5.0, com pico registrado no ano de 2024, com tendência a ultrapassar aquela marca em 2025.

Figura 4 – Publicações na base *Scopus* com termo de pesquisa “*Industry 5.0*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Salimbeni, Redchukb e Rousserie (2023) destacam que o conceito da Indústria 5.0 ainda é recente e está em construção. Piccarozzi *et al.* (2024) entendem que a Indústria 5.0 pode ser considerada complementar ou extensão da Indústria 4.0.

## 2.2.6 Indústria 6.0 (I6.0)

Deliu e Oliu (2024) descrevem um quadro evolutivo futuro da indústria: a Indústria 4.0 enfatiza a automação com conectividade inteligente; a indústria 5.0, a produção colaborativa homem-máquina no preparo da indústria 6.0. O fato utilizará

tecnologia avançada, o que determinará um equilíbrio entre a tecnologia e a sustentabilidade do negócio em um mundo digitalizado que fixa mudanças nas profissões existentes. A Indústria 5.0 está centrada na colaboração homem-máquina como desafio tecnológico para aumentar a capacidade humana na produção. A Indústria 6.0 estará interessada na combinação homem-máquina para o atingimento de nível mais elevado de inteligência e de desempenho (Fernández-Miguel; García-Muiña; Settembre-Blundo, 2024).

Pesquisa na base *Scopus* pelo termo de busca “*Industry 6.0*”, na área da Engenharia, em artigo e artigos de revisão, resultou apenas 09 artigos, o que evidencia o interesse acadêmico muito recente pelo tema. Segundo Maljugic *et al.* (2024), a Indústria 6.0 ainda é conceitual e, provavelmente, evoluirá dos fundamentos da Indústria 5.0. Prevê-se que haverá uma conexão maior entre máquina e humanos, numa relação de alto nível de automação com hegemonia da IA. Corroboram Fernández-Miguel, García-Muiña e Settembre-Blundo (2024) que o conceito ainda é teórico e suas tecnologias e aplicações ainda não foram definidas ou concebidas. Duggall *et al.* (2022) mencionam que a tecnologia da Indústria 6.0 ainda não está disponível e prevê seu avanço por volta do ano 2050.

### **2.3 Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0**

A Indústria 4.0 possui a característica de estabelecer conexão entre diversos e diferentes dispositivos físicos e eletrônicos. Ela faz uso das tecnologias habilitadoras, tal qual sensores, atuadores, etiquetas *Radio-Frequency Identification* - RFID e tecnologias digitais. As digitais, na extensão, seriam robótica, prototipagem e simulação, realidade aumentada e virtual, cibersegurança, potências que interagem entre si e com pessoas de forma controlada e inteligente (Virmani *et al.*, 2023; Kamble *et al.*, 2018; Wan *et al.*, 2016)

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 impactam a flexibilidade da produção, a redundância, a visibilidade, a agilidade, a colaboração, a robustez, o compartilhamento de informação em tempo real e a colaboração para melhoria dos Indicadores Chave de Desempenho (*Key Performance Indicator – KPI*), métricas para avaliar e monitorar processos, conforme relatam Marinagi *et al.* (2023). Entre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 incluem-se as apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0

Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0	Definição
Automação e robótica	Robôs controlam movimentos e manipulações em operações de apoio aos humanos. Servem à melhoria do desempenho operacional, da qualidade, da segurança e à redução de prazo de produção (Li <i>et al.</i> , 2023).
<i>Automated Guided Vehicle - AGV</i>	Veículos guiados automaticamente aumentam a eficiência do sistema de transporte logístico e do custo operacional (Chang; Jia; Hu, 2025). Isto favorece a agilidade do transporte conforme recomendado pela Indústria 4.0 (Rick; Versteyhe; Debrouwere, 2020).
<i>Big data</i> e análise de dados ( <i>Big Data Analytics - BDA</i> )	Tecnologia associada a extrair valor pela captura em alta velocidade de grandes volumes de dados de diferentes fontes. Caracteriza-se por volume, velocidade, variedade, veracidade e valor dos dados capturados (Aceto; Persico; Pescapé, 2020).  Processamento e análise de grande quantidade de dados complexos coletados de diversas fontes dos processos. Destina-se à identificação de tendências e de apoio à tomada de decisão. Uma abordagem estatística que detecta relações ocultas nos dados, com a finalidade de aumentar a produtividade, reconhecer gargalos e sintetizar observações para otimizar, por exemplo, a produção, a qualidade e a manutenção. (Zhong <i>et al.</i> 2017; Khan <i>et al.</i> , 2025).
<i>Blockchain</i>	Registro inalterável e garantido para o aumento da transparência, da integridade dos dados. Permite a rastreabilidade da informação (Khan <i>et al.</i> , 2025; Yousef <i>et al.</i> , 2025).
Ciberfísicos ( <i>Cyber-physical Systems - CPS</i> )	Sistemas com troca de comunicação entre computadores e equipamentos. Permite monitorar e integrar máquinas, sistemas e produtos em tempo real (Oks <i>et al.</i> , 2024).
Cibersegurança ( <i>Cybersecurity</i> )	Protege o ambiente virtual — informações e infraestrutura — de ameaça ou ataque à comunicação ou a sistemas digitais (Lezi; Lazoi; Corallo, 2018).
Computação em nuvem	Sistemas de serviços digitais interligados: rede de servidores remotos não visíveis ao usuário final. Fornecem recursos, como bancos de dados e infraestrutura de suporte (Khan <i>et al.</i> , 2020).
<i>Deep Learning</i>	Campo relacionado à análise de dados e de aprendizado de máquina (Fuller <i>et al.</i> , 2020).  Redes capazes de aprender automaticamente, com captura de padrões, por exemplo, para

	processamento de dados, de fala, de reconhecimento de imagens (Saeed <i>et al.</i> , 2025).
Impressão 3D – Manufatura aditiva	Tecnologia que permite a produção de modelos, protótipos e produtos com diferentes materiais, como metais e plásticos (Nascimento <i>et al.</i> , 2019).  Impressão 3D constrói produtos pela aplicação de camadas sucessivas de materiais (Kamble; Gunasekaran; Gawankar, 2018).
Inteligência Artificial (IA)	Elemento da transformação digital que realiza e auto monitora atividades autonomamente; interpreta, diagnostica e analisa dados (Ahmed; Jeon; Piccialli, 2022).
<i>Internet das coisas</i> ( <i>Internet of Things - IoT</i> )	Infraestrutura com capacidade e conectividade para compartilhar dados e realizar a comunicação entre objetos físicos, sistemas e serviços (Zhong <i>et al.</i> , 2017).
<i>Machine Learning</i>	Aprendizado automático, aprimorado por treinamento por meio de experiências ou dados coletados ao invés de instruções fornecidas (Ahmed; Jeon; Piccialli, 2022).
Realidade Aumentada ( <i>Augmented Reality – AR</i> )	Fornece informação virtual ao ambiente físico (Mihai <i>et al.</i> , 2022).  Suas aplicações interligam visões virtuais/digitais e reais; aumenta a capacidade do usuário para agir no ambiente de trabalho (Longo; Nicoletti; Padovano, 2017).
Realidade virtual ( <i>Virtual Reality – RV</i> ) -	Facilita a visualização de funções e de atividades antes de as implementar no mundo real, o que contribui para a redução de tempos e paradas (Khan <i>et al.</i> , 2020).
Sensores inteligentes ( <i>Smart Sensors</i> )	Avaliam e diagnosticam dispositivos, máquinas, equipamentos instrumentos de medição em uma fábrica inteligente (Perch; Vrchota; Bednár, 2021).
Simulação e prototipagem rápida ( <i>Rapid Prototyping - RP</i> )	A prototipagem rápida elabora um objeto com o auxílio de um modelo computacional (Gobena; Woldeyohannes, 2024). Permite testes de ideias, de funcionalidade e de segurança no início do desenvolvimento ou projeto.
Gêmeos Digitais ( <i>Digital Twin</i> )	Integração de dados entre máquinas e processos físico e virtual em qualquer direção; permite análises precisas para fins de tomada de decisão em tempo real (Fuller <i>et al.</i> , 2020).

Fonte: Elaborado pelo autor

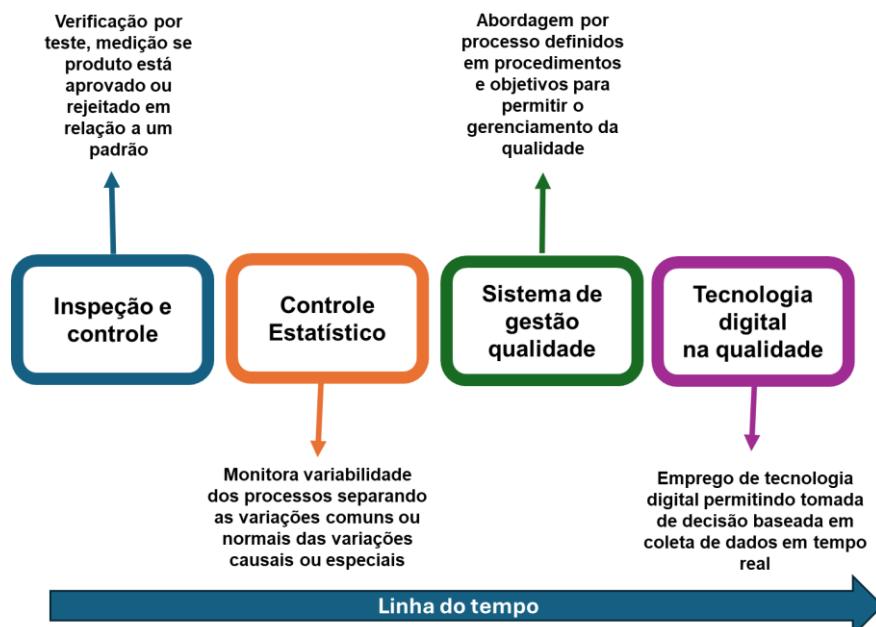
O conjunto de ferramentas digitais já desenvolvidas, ou em aprimoramento,

para atender a demanda exigida pela Indústria 4.0, é base também para outros processos industriais, é de interesse à Qualidade 4.0.

## 2.4 Evolução da Qualidade

Em decorrência da evolução da Indústria 4.0 em busca da excelência operacional produtiva, outros sistemas da organização em apoio a essa tendência passam igualmente por mudanças inovadoras por meio da transformação digital (Mahin *et al.*, 2024). Entre eles, encontra-se historicamente interligado à manufatura o processo da qualidade. Com cada avanço das revoluções industriais, a qualidade tem progredido em paralelo, consolida-se como um dos seus pilares fundamentais (Liu *et al.*, 2023; Zonnenshain; Kenett, 2020). Dessa forma, conforme os métodos industriais para fabricação de produtos e serviços se modificavam para melhor o atendimento das demandas direcionadas ao aumento da satisfação do cliente, a qualidade se ajustava à nova realidade. A Figura 5 apresenta a evolução da qualidade e seus principais desenvolvimentos na busca para alcançar patamares mais elevados de excelência com foco no cliente.

Figura 5 – Linha do tempo da qualidade

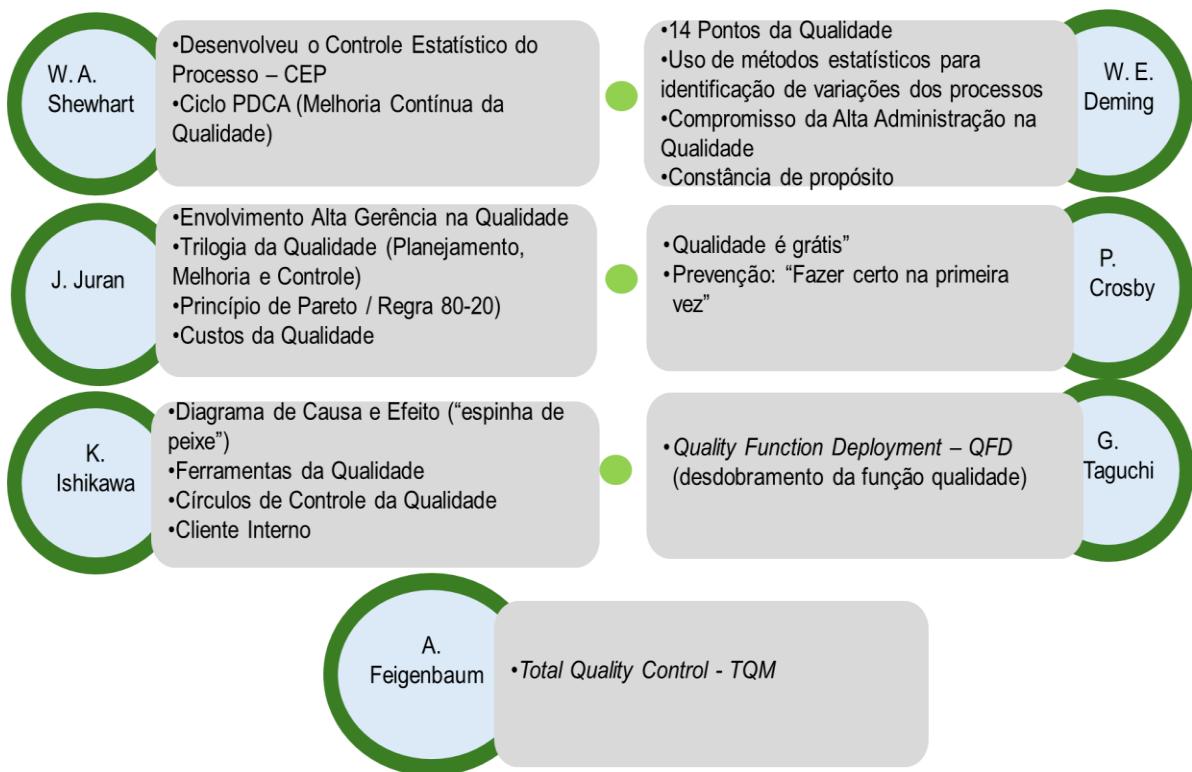


Fonte: Elaborado pelo autor

Significativas contribuições, desenvolvidas por pessoas dedicadas ao

aprofundamento da qualidade e da sua melhoria contínua, criaram e disseminaram novas técnicas e ferramentas inovadoras. O foco está em abordagem por processo, por uso de práticas para a prevenção de problemas, para a eliminação de desperdícios e erros, para a redução de custos operacionais em contraposição à mera constatação e à separação de produtos aprovados e rejeitados (Fonseca, 2015). As contribuições têm sido aplicadas desde a década de 30 do século passado até os dias atuais. Por seus trabalhos em prol da qualidade, estas pessoas são reconhecidas globalmente como ‘Gurus da Qualidade’ (Bousdekis, 2023; Mtotywa, 2022). Sua ajuda é apresentada na Figura 6.

Figura 6– Contribuições dos ‘Gurus da Qualidade’



Fonte: Adaptado de Fonseca (2015)

O conjunto das colaborações dos ‘Gurus da Qualidade’ em diferentes épocas amplificou o escopo da qualidade por toda organização (Benzaquen; Charles, 2020). Foi motivo de crescimento econômico, como se deu no Japão pós-guerra, com disponibilização de novos conceitos relacionados à solução e à prevenção de problemas. Tornou-se razão ainda de identificação da causa e do efeito de um evento adverso. Foi causa de criação de ferramental para uso dos gestores e dos colaboradores comuns, de aplicação de técnicas preventivas para evitar ou reduzir

erros, falhas, desperdícios e, como resultado, houve sempre redução do custo da operação. Esses estudiosos traçaram caminhos direcionados à passagem para novas eras da qualidade.

#### 2.4.1 Era da inspeção e do controle

A inspeção e o controle de qualidade representaram a primeira contribuição significativa da área da qualidade como resposta aos desafios impostos pela produção em massa (Liu *et al.* 2023). A inspeção da qualidade pode ser definida como um processo organizado que envolve o exame por um indivíduo — o inspetor da qualidade — com o propósito de realizar medição, avaliação sensorial, teste ou comparação.

Essa análise visa a verificar se o produto está aprovado ou rejeitado em relação a um padrão ou a uma referência preestabelecidos (Sundaram; Zeid, 2023). Da mesma forma que os princípios de Taylor foram aplicados à produção, o que delimitou e fracionou os processos ao máximo de sua simplicidade — como meio de torná-lo mais rápido, mais preciso e mais econômico —, o mesmo critério foi adotado e implantado na administração empresarial. Definiu-se a organização por setores com responsabilidades claras e específicas, fato que queria assegurar o cumprimento de suas atividades e objetivos. Assim, surgiu o setor do Controle da Qualidade com a função única de inspecionar produtos para garantir sua qualidade, conforme o especificado.

#### 2.4.2 Era do controle estatístico do processo

No contexto da qualidade, o período foi denominado ‘era do controle estatístico’ devido à aplicação à produção de técnicas estatísticas. A referência nos remete ao Controle Estatístico do Processo – CEP, implementado por W. A. Shewhart em 1924, para fins de controle da variabilidade dos processos (Broday, 2022). Ele monitora mudanças observadas na fabricação e identifica dois tipos de variações do processo em intervalos planejados (Udo; Muhammad, 2021):

- a) Variações comuns ou aleatórias: consideradas como ocorrência natural de um processo. Elas identificam o processo como estável, previsível, ‘sob controle estatístico’.

- b) Variações causais ou especiais: ocorrem devido ao efeito de uma causa determinada. Representam um processo instável, imprevisível, ‘fora de controle estatístico’. A causa da variação deve ser identificada o mais rápido possível para tomada de uma ação eliminatória, para que o processo possa retornar à estabilidade.

O controle estatístico de processo foi implantado com relevantes resultados obtidos em empresas japonesas no pós-guerra. Juran (1979), por sua vez, chamou a atenção à aplicação do planejamento, da melhoria e do controle para a qualidade e para os custos da qualidade. A implementação das ideias desses dois ‘Gurus da Qualidade’ abriu caminho à mudança do foco da inspeção de produto, para o monitoramento do desempenho do processo e para o controle de sua variabilidade (Zonnenshain; Kennet, 2020).

#### 2.4.3 Era do gerenciamento da qualidade total e normatização do SGQ

Após a implementação das técnicas da qualidade, introduzidas por Deming e Juran no Japão, o esforço da qualidade japonês revelou seus próprios gurus. Kaoru Ishikawa criou o ‘Diagrama de Causa e Efeito’, ou ‘Diagrama de Iskikawa’, ou ‘Espinha de Peixe’, ou ‘Diagrama 5Ms’, com o intuito de clarificar a relação de causa-efeito de determinado problema para fins de sua eliminação. Ele foi ainda grande divulgador dos Círculos de Controle da Qualidade – CCQs (Ishikawa, 1986).

O conceito da prevenção aplicado à qualidade, reforçado pelo slogan ‘fazer certo na primeira vez’, foi elaborado por Crosby (1988). A Gestão da Qualidade Total, delineada por Feigenbaum (1961), transformou o modo de operar, ao estabelecer que cada processo e cada colaborador são responsáveis diretos pelo resultado da qualidade da atividade que executa (Chiarini; Kumar, 2022).

Portanto, reduziu-se a importância do binômio ‘controle da qualidade’ e ‘inspetor da qualidade’, tal como o idealizado na ‘Era da inspeção e do controle’, quando o binômio era considerado responsável por assegurar sua manutenção. Assim, conseguia-se uma mudança do foco de garantia do produto em atendimento às especificações, para uma visão sistêmica da organização em busca da excelência e da satisfação do cliente.

Em consequência disso, não se trata mais de apenas separar produto aprovado/rejeitado no processo produtivo, mas assegurar a excelência em todos os processos, um cuidado que está além da manufatura em si (Glogovac; Russo; Maricic, 2022). Estabelece-se o Sistema de Gestão da Qualidade – SGQ, com abrangência por toda organização, com a definição de procedimentos operacionais e objetivos claros a serem alcançados pelos processos, por meio do gerenciamento das suas interações e dos recursos necessários para o atendimento das partes interessadas no negócio (ABNT, 2025). O fato exige atuação com definição de responsabilidade e de autonomia dos colaboradores em sua totalidade, níveis e funções para responder-se diretamente pela qualidade da atividade que desempenham (Liu *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, confirmam Chiarini e Kumar (2022) que importantes impulsos à qualidade foram realizados com o *Total Quality Control*, com o *Total Quality Management*, com o *Lean Manufacturing*, com o 6 Sigma e com a norma ISO 9000, cuja publicação foi iniciada em 1987 (Fonseca, 2015).

Rogala e Wawak (2022) afirmam que os gestores da qualidade aceitaram a norma ISO 9000, sua estrutura e componentes para definirem o SGQ. Psarommatis e Azamfirei (2024) mencionam que a série ISO 9000 provê uma estrutura lógica de requisitos para a implementação de um SGQ robusto. A norma fornece conceitos, requisitos, princípios e vocabulário para implementação do SGQ (ABNT, 2015a). Acrescente-se ao cenário que essa normatização proporcionou às organizações oportunidade para conceber a gestão da qualidade com perspectiva de abordagem sistêmica para o planejamento e a conexão entre processos, com a incorporação de gerenciamento de riscos e a aplicação do ciclo de melhoria contínua no modelo PDCA (ABNT, 2015b).

Segundo Fonseca (2015) a globalização dos negócios tornou necessária a padronização e a normalização do SGQ como forma de atender requisitos da qualidade. A norma ISO 9000 incentivou as organizações a implementar uma estratégia de gestão da qualidade idônea e de reconhecimento internacional.

#### 2.4.4 Era da tecnologia digital na qualidade

A transformação digital proporciona a integração dos diversos processos e a otimização dos recursos; ela garante a fluidez da informação por toda a empresa. Paralelamente, colabora no aprimoramento das capacidades e na relação com o

desempenho empresarial, ao evitar informações redundantes coletadas nos processos produtivos. Assegura-se, assim, o uso daquelas consideradas relevantes. A transformação digital disponibiliza conjunto de ferramentas à tomada de decisão no caminho à melhoria da qualidade e da sustentabilidade (Wei; Shen, 2025).

Nos tempos atuais, por meio do desenvolvimento e da aplicação da tecnologia digital na Indústria 4.0, nos encontramos, simultaneamente, em fase de conceituação e de transição para a Qualidade 4.0. Uma inovadora abordagem da gestão da qualidade, que considera o uso das tecnologias digitais desenvolvidas para a Indústria 4.0, oferece excelência na qualidade do produto. Insere ainda o conceito de práticas preditivas com medição e monitoramento dos processos críticos por sensores inteligentes, IA e toda gama disponível de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. A implementação da Qualidade 4.0 permite a otimização da tomada de decisão, fundamentada na facilidade de coleta e na análise de dados em tempo real dos processos produtivos (Sony *et al.*, 2021).

## 2.5 Qualidade 4.0 (Q4.0)

Mudanças de cenários ocorridas devido a novas e a contínuas demandas do mercado implicam adaptação e inovação tanto dos processos da manufatura, quanto da qualidade. Muito embora a qualidade seja um conceito intrinsecamente subjetivo e suscetível às percepções individuais do cliente, sua importância à sustentabilidade e à longevidade de um empreendimento é inegável.

Ainda é relevante pela capacidade de atração do cliente quando da tomada de decisão para aquisição de um produto, pela experiência de seu uso, pela percepção de atributos relacionados à segurança, pela funcionalidade, pelo sabor, pela beleza, pelo atendimento às expectativas explícitas e implícitas do cliente. Garvin (1984) em sua publicação seminal define qualidade do produto em 8 dimensões: desempenho, recursos, confiabilidade, conformidade, durabilidade, facilidade de manutenção, estética e qualidade percebida.

Liu *et al.* (2023) mencionam que a eficácia da Qualidade 4.0 pode ser medida pela satisfação do cliente ao incrementá-la, ao melhorar a eficiência da inovação e a competitividade da organização. Nesse contexto, Oliveira *et al.* (2025) confirmam que a Qualidade 4.0 pode produzir benefícios às organizações relacionadas à melhoria da

satisfação do cliente, ao aumento da produtividade, à redução de tempo e dos custos operacionais. O objetivo da qualidade reside em sua capacidade de poder contribuir significativamente como fonte sustentável para geração de vantagem competitiva ao negócio (El Manzani *et al.*, 2025; Asif, 2020).

O mesmo objetivo, na sua vez, é alcançado por meio de uma abordagem multifacetada que engloba a satisfação das necessidades e das demandas do cliente, o suporte aos processos produtivos na resolução de problemas e na busca contínua pela excelência e eficácia operacionais. A implementação efetiva das práticas da Qualidade 4.0 assegura entrega de produtos de qualidade com redução de custos operacionais, o que evita superprodução e não-conformidades (Nguyen *et al.*, 2024).

A qualidade é um conceito dinâmico, que se adapta continuamente às necessidades mutáveis do cliente; ela configura um processo evolutivo de aprimoramento constante. Nessa circunstância, a Qualidade 4.0, ao combinar a tecnologia digital ao SGQ tradicional, cria condições de melhorias operacionais (Mahin *et al.*, 2024). Atualmente, as organizações têm dedicado esforços significativos para compreender a amplitude e as metodologias de implementação da Qualidade 4.0.

Segundo Johnson (2019), o termo ‘Qualidade 4.0’ foi mencionado pela primeira vez em 2017 por Dan Jacob da empresa *LNS Research*. O termo põe-se como nova referência para gerenciamento da qualidade ao conectar tecnologias digitais às técnicas existentes ou tradicionais. O fato é mencionado por Oliveira *et al.* (2025) e confirmado por Broday (2022), ao comentar sobre ganhos provenientes de atividades mais rápidas e inteligentes com o uso das tecnologias digitais combinadas aos procedimentos tradicionais em uso pela qualidade.

Esses ganhos são expandidos com uso de IA e da *Machine Learning* ao se utilizar IoT e ao se transformar o controle de processos, tal como inicialmente idealizado (Pandey *et al.*, 2025). Essa abordagem, mais do que integrar tecnologias digitais nos processos, representa uma mudança de paradigma no SGQ (Fadilasari *et al.*, 2024). Ela otimiza, por exemplo, o processo de tratamento de reclamações com a tomada de decisão em tempo real (Silva *et al.*, 2024).

Dessa forma, a Qualidade 4.0 representa uma mudança paradigmática: vai do controle de processos à aplicação de metodologias digitais em busca das metas zero desperdício, zero defeitos, zero não-conformidades (Psarommatis; Azamfirei, 2024). *American Society for Quality - ASQ* (2025). Ela confirma esse contexto de mudança, ao afirmar que essa transição é viabilizada pela aplicação da tecnologia digital a

processos e a máquinas, o que as capacita a aprender, a se ajustar para gerenciar a qualidade e a produtividade de forma autônoma.

A transição referida constitui um avanço significativo no sistema de gestão da qualidade; aprimora-o por meio da integração de tecnologias digitais e inovadoras; fornece informações em tempo real; melhora a eficácia dos processos e dos produtos; reduz custos operacionais e permite monitoramento dos resultados relacionados à qualidade (Bisht *et al.*, 2025). Kumar *et al.* (2022) chamam a atenção na realização da Indústria 4.0 para a importância da Qualidade 4.0 que tem por característica integrar tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como *IoT*, IA e análise de *big data* com intenção de promover melhoria na eficiência dos processos e dos produtos (Navarro; Bayona, 2024).

Muito embora a tecnologia esteja associada à Qualidade 4.0, ela não é considerada seu único propulsor, como mencionado por Rowlands e Milligan (2021). O sistema de gestão da qualidade, independente da tecnologia, pode ser foco para a Indústria 4.0, o que exige certa mudança de estratégia direcionada à Qualidade 4.0. Também argumentam Dias *et al.* (2022) em sua pesquisa que a Qualidade 4.0, interessada na melhoria da qualidade e no resultado alcançado por seus objetivos em um ambiente de constante mudança, é parte da transformação digital direcionada à transição à Indústria 4.0.

Relatam, todavia, Kumar *et al.* (2022) que, apesar do avanço da automatização, a presença humana permanece indispensável em muitos processos da Qualidade 4.0. A automatização não é capaz de abranger a totalidade das tarefas repetitivas, o que significa que a substituição integral dos humanos nos processos produtivos não é viável. Antony *et al.* (2022) identificaram que os principais fatores em preparação à implementação da Qualidade 4.0 são os representados pelo comprometimento da alta direção, das lideranças, dos colaboradores e da cultura organizacional. Isso se torna ainda mais evidente quando se considera a complexidade da Qualidade 4.0.

### 2.5.1 Conceitos da Qualidade 4.0

O conceito da Qualidade 4.0 é relativamente recente; está em desenvolvimento, ainda sem uma definição padronizada reconhecida pela academia ou empresas, o que tende a dificultar sua completa extensão para compreensão e

implementação (Oliveira *et al.*, 2025; Hassoun *et al.*, 2023; Sony *et al.*, 2021; Efimova; Bris, 2021; Escobar; McGovern; Morales-Menendez, 2021). A falta de conceituação aceita e padronizada gera incertezas, mal-entendidos e interpretações variadas (Nenadál *et al.* 2022).

Apontaram Chiarini e Kumar (2022) em sua pesquisa sugestão de entrevistados, para que a ISO elaborasse uma norma estruturada para facilitar a implementação da tecnologia digital integrada ao sistema de gestão da qualidade preconizada pela Qualidade 4.0. Várias propostas de conceito da Qualidade 4.0 (ver Quadro 2) foram formuladas por pesquisadores. Ainda não está disponível, porém, um conceito padronizado e reconhecido pela academia ou organizações empresariais.

Quadro 2 – Conceitos da Qualidade 4.0

Autores	Conceitos Q4.0
Javaid <i>et al.</i> (2021, p. 2)	“A Qualidade 4.0 integra tecnologia emergente com abordagens convencionais de qualidade, que permitem a eficiência organizacional e a criatividade para alcançar novos ideais.”
Tambare <i>et al.</i> (2022, p.13)	“Qualidade 4.0 corresponde à crescente digitalização da indústria, que utiliza tecnologias avançadas para melhorar a qualidade da produção e dos serviços.”
Liu <i>et al.</i> (2023, p. 199)	“A Qualidade 4.0 trata do alinhamento das práticas de gestão da qualidade com as tecnologias da Indústria 4.0, como a inteligência artificial (IA) e a digitalização, para alcançar a eficiência e o desempenho empresarial da inovação”.  “Qualidade 4.0 é uma técnica centrada no cliente e habilitada digitalmente para integrar pessoas com processos e tecnologia para tomar decisões baseadas em evidências em cooperação com partes interessadas internas e externas na cadeia de valor.”
Dias, Carvalho e Sampaio (2022, p. 1328)	“Qualidade 4.0 como o uso de tecnologia moderna para apoiar o desenvolvimento das pessoas e expandir o potencial de ferramentas de qualidade em busca de resultados organizacionais superiores.”
Sader, Husti e Daróczi (2022, p. 1164)	“Qualidade 4.0 é uma abordagem estendida à gestão da qualidade; nela, tecnologias recentes estão sendo integradas com práticas tradicionais de qualidade (CQ, GQ, TQM) para expandir o escopo da gestão da qualidade e melhorar as atividades de qualidade.”
Sony, Antony e Douglas (2020, p. 781)	“Qualidade 4.0 é, portanto, a digitalização da qualidade de design, qualidade de conformidade e qualidade de desempenho com a utilização de tecnologias modernas.”
Antony, McDermott e Sony (2021)	“Qualidade 4.0 pode, portanto, ser pensada como a combinação de novas tecnologias e ferramentas e métodos

	<p>de qualidade padrão para alcançar um desempenho superior, maior excelência operacional e inovação ideal.”</p> <p>“Qualidade 4.0 como o uso de tecnologias avançadas como IoT, CPS, computação em nuvem para projetar, operar e manter sistemas de qualidade adaptativos, preditivos, autocorretivos e automatizados, juntamente com melhorias interação humana através do planejamento da qualidade, garantia da qualidade, controle da qualidade e melhoria da qualidade para alcançar novos níveis ótimos de desempenho, excelência operacional e inovação para atender à visão, à missão e aos objetivos de uma organização.”</p>
Zonnenshain e Kenett (2020, p. 624)	“Qualidade 4.0 é uma estrutura para implementar e alcançar Qualidade em organizações e empresas.”
ASQ (2025)	“Qualidade 4.0 é um termo que se refere ao futuro da qualidade e da excelência organizacional no contexto das necessidades e das expectativas de desempenho da Indústria 4.0.”
El Manzani <i>et al.</i> (2025)	“O processo de planejar, realizar, controlar e melhorar a qualidade dos processos organizacionais e seus resultados, utiliza-se de tecnologias digitais avançadas para atingir os objetivos estratégicos da organização e para criar valor para seus <i>stakeholders</i> .”

Fonte: Elaborado pelo autor

## 2.6 Fatores de prontidão

Os fatores de prontidão são utilizados como indicadores ou pré-requisitos para avaliar se as organizações estão prontas à implementação da Qualidade 4.0; eles atuam como auxiliar à compreensão dos gestores à preparação e à aceleração da inovação para fins da transição digital (Antony *et al.*, 2022; Sony *et al.*, 2021). Os autores mencionam que, os fatores de prontidão são relevantes num processo de mudança.

Há destaque àqueles relacionados ao comprometimento da alta direção, à visão estratégica, à liderança, à cultura organizacional, ao foco no cliente e no fornecedor. Sader *et al.* (2022) sugerem a importância de uma ferramenta de avaliação dos fatores de prontidão como suporte à transformação digital à Qualidade 4.0. Apontam também a importância de avaliar os desafios tecnológicos e de infraestrutura envolvidos e disponíveis, assim como a relevância de examinar o aproveitamento de técnicas tradicionais da gestão da qualidade rumo à Qualidade 4.0.

Antony *et al.* (2022) pesquisaram o tema de fatores de prontidão, em sua maioria em países europeus. Alguns resultados obtidos servem de apoio às

organizações interessadas na implementação da Qualidade 4.0. *Big data* aparenta ser tecnologia importante da transição digital da qualidade e não está relacionado ao porte ou à natureza da empresa. Ele refere-se à formação e à competência de pessoas. O fator de prontidão é considerado para a implementação da Qualidade 4.0, pois entende-se sua importância em todos os níveis para o sucesso.

Ainda Antony *et al.* (2022) constataram diferença no tocante ao porte das empresas, quando se trata de reconhecimento e de recompensas. As pequenas e médias organizações não possuem orçamento direcionado à implementação da Qualidade 4.0 ou sistema estabelecido de reconhecimento associado a atividade dessa natureza. Outro resultado observado pela mesma pesquisa se relaciona a diferenças entre os aspectos de liderança, treinamento e sistema de reconhecimento e recompensa praticados entre empresas de manufatura e de serviços devido às características culturais entre as formas de negócio. Por fim, os autores constataram distinção de resultados entre os três continentes pesquisados (Ásia, Europa ou América do Norte), quando se avaliam os fatores de prontidão relativos à visão, à estratégia da Qualidade 4.0 e à liderança.

### 3 MÉTODOS DE PESQUISA

Este capítulo detalha os métodos e as estratégias de pesquisa empregados no presente trabalho. A escolha e a aplicação dessas abordagens visam a assegurar a transparência, a clareza e o rigor da investigação, elementos fundamentais para a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

#### 3.1 Estrutura do método de pesquisa

O método denominado *Thesis by Publication – TBP* (Tese por Publicação), tem sido aceito em diversos países e instituições, conforme afirmam Mason *et al.* (2025). Trata-se de uma prática que tem crescido nos últimos 20 anos. O método agrupa uma coleção de artigos independentes dos autores que fazem parte da tese e a explicam. Segundo os autores, esse formato tomou diferentes rumos; é pouco utilizado nos Estados Unidos e no Reino Unido, ao contrário da aceitação que tem nos países Escandinavos e da consideração de válido na Austrália e na Nova Zelândia. Critério da aplicação dessa prática, a pesquisa considerou a condição mandatória de que o pesquisador candidato ao doutorado deve ser o autor principal.

A tese foi elaborada com a utilização do método qualitativo de pesquisa. O Quadro 3 mostra o alinhamento dos objetivos específicos com as respectivas estratégias de pesquisas adotadas. Foram empregadas três distintas estratégias de pesquisa: análise bibliométrica, revisão sistemática da literatura (artigo 1) e *Design Science Research* para o desenvolvimento e a aplicação do artefato.

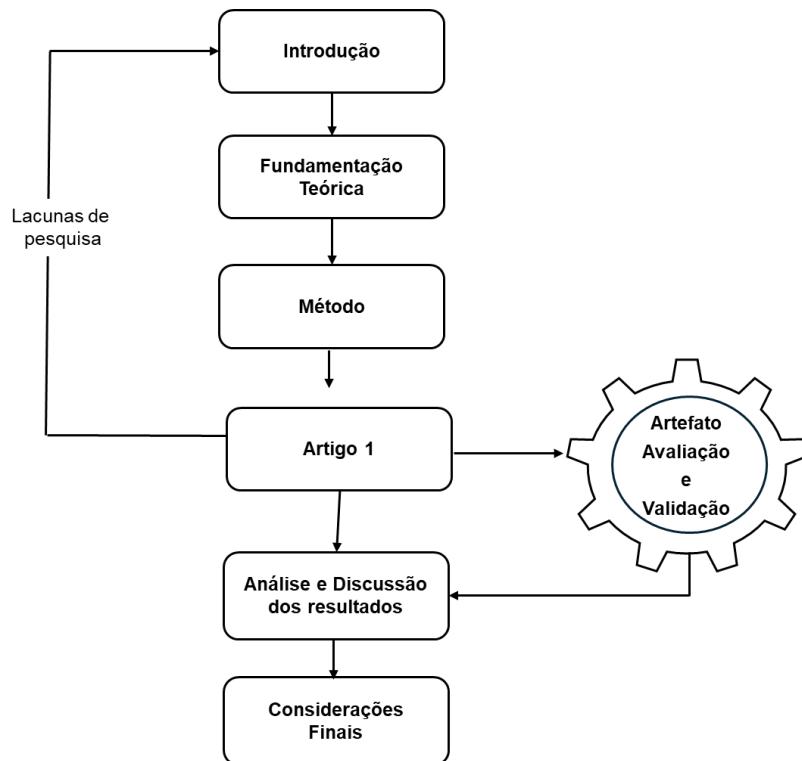
Quadro 3– Síntese dos Artigos de pesquisa que compõem a tese

Item	Tipo	Alinhamento com objetivos específicos	Descrição	Estratégia de pesquisa
1	<b>Artigo:</b> <i>Quality 4.0 in industrial organizations: challenges, benefits, and a research agenda</i>	1, 2 e 3	Identifica desafios e benefícios relacionados à implementação da Q4.0 em apoio à I4.0. Apresenta os estudos iniciais relacionados à I5.0 e à I6.0. Propõe conceito prático à Q4.0 e a utilização de <i>Targeted Data</i> (Dados Direcionados) em gerenciamento da qualidade como forma de evitar sobrecarga de informação. Adicionalmente, identifica e categoriza lacunas de pesquisa para futuras investigações.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Análise Bibliométrica</li> <li>• Revisão Sistemática da Literatura (RSL)</li> </ul>
2	<b>Artefato</b> <i>(produto técnico)</i>	4	Identifica por meio de um artefato o grau de aderência aos requisitos considerados à implementação da Q4.0 em uma organização industrial.  Analisa os resultados para auxílio dos gestores na implementação da Q4.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Design Science Research (DSR)</i></li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 7 proporciona uma visão abrangente e clara com detalhamento da estrutura do método de pesquisa adotado nesta tese.

Figura 7 - Estrutura do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2 Análise bibliométrica

A análise bibliométrica inclui no trabalho objetividade na avaliação científica, de modo a introduzir rigor à pesquisa. Agrega comentários, descobertas de outros acadêmicos por meio de publicação própria ou de citações de interessados no mesmo tema de pesquisa. Essa prática permite avaliar o desempenho referente à quantidade de publicações num período específico, identificar periódicos que dispensaram maior atenção a determinado assunto ou instituição acadêmica com maiores contribuições (Zupic; Cater, 2015).

A análise bibliométrica, detalhada no artigo 1, foi elaborada para conhecer o interesse dos acadêmicos e dos periódicos sobre o tema da pesquisa. Os critérios adotados foram os seguintes: (i) pesquisa nas bases Scopus e WoS; (ii) termo de pesquisa “*Quality 4.0*”; (iii) buscas em título, resumo e palavras-chave; (iv) de artigos e artigos de revisão e (v) no período compreendido entre 2020 e 2024. Foram explorados os seguintes resultados da análise bibliométrica:

- a) Quantidade de publicações/ano;
- b) Identificação dos periódicos com duas ou mais publicações sobre “*Quality 4.0*”;
- c) Quantidade de publicações/periódico, com tema “*Quality 4.0*”;
- d) Determinação da área geográfica/países das publicações, em consideração à afiliação da entidade acadêmica à qual pertence o primeiro autor do artigo.

### **3.3 Revisão sistemática da literatura – RSL**

A revisão sistemática da literatura possui como característica a elaboração de um protocolo que propicie um método padrão, replicável, claro, imparcial e objetivo, além da manutenção do rigor científico. Por meio dos critérios estabelecidos no protocolo de pesquisa, a literatura pertinente é identificada — considerada sua relevância — analisada e sintetizada, conforme mencionado por Boell; Cecez-Kecmanovic (2015). Dentre os protocolos RSL disponíveis aos pesquisadores, esse trabalho optou pelo modelo PRISMA (2025), devido sua praticidade, relevância e idoneidade no meio acadêmico. O resultado da RSL está detalhado no artigo 1.

A aplicação do RSL atendeu aos seguintes critérios: (i) termo de pesquisa “*Quality 4.0*”; (ii) nas bases *Scopus* e *WoS*; (iii) buscas em título, resumo e palavras-chave; (iv) de artigos e artigos de revisão e, (v) publicados nos últimos 5 anos. De modo abrangente, a análise crítica da RSL resultou em:

- a. Identificação dos autores atuais e relevantes;
- b. Compreensão em profundidade sobre a situação do assunto investigado;
- c. Levantamento de artigos sobre os conceitos de Indústria 5.0 e Qualidade 5.0;
- d. Identificação das lacunas de pesquisa e,
- e. Propostas para futuras investigações.

### 3.4 Design Science Research – DSR

#### 3.4.1 Fundamentos do DSR

Objetivando a resolução de problemas por meio da análise e da construção de artefatos, o que Simon, em 1969, denominou de ciências do artificial (Hevner *et al.*, 2004; Van Aken, 2004), é a base do *Design Science* um paradigma à condução da pesquisa. Trata-se de um método de pesquisa que garante a uniformidade e o rigor da pesquisa para fins de produção de conhecimento, método que pode resultar vantagens com o uso dele por profissionais nas organizações (Dresch *et al.*, 2015a; Dresch *et al.*, 2015b).

O DSR visa a estreitar a distância existente entre a academia e a prática ao manter o rigor científico e a confiança no resultado encontrado na pesquisa (Dresch *et al.*, 2015). Ele tem como fundamento conhecer e compreender o problema e a sua respectiva solução com a construção e a aplicação de um artefato (Hevner; Chatterjee, 2010), o que se atrela à busca por explorar alternativas e melhorias para resolução de problemas (Holmstrom; Ketokivi; Hameri, 2009). Portanto, ao conduzir uma pesquisa com DSR, é importante estar ciente do problema que se quer resolver, como de sua solução (Hevner *et al.*, 2004). A estratégia se justifica com o apoio da teoria e pela aplicação do resultado da pesquisa encontrado no uso do artefato, com potencial de benefícios práticos (Dresch *et al.*, 2015b).

O DSR baseia-se na construção e na avaliação de artefatos desenvolvidos para a solução de problemas não resolvidos ou abordados. Segundo Hevner *et al.* (2004), os artefatos são classificados nos seguintes tipos:

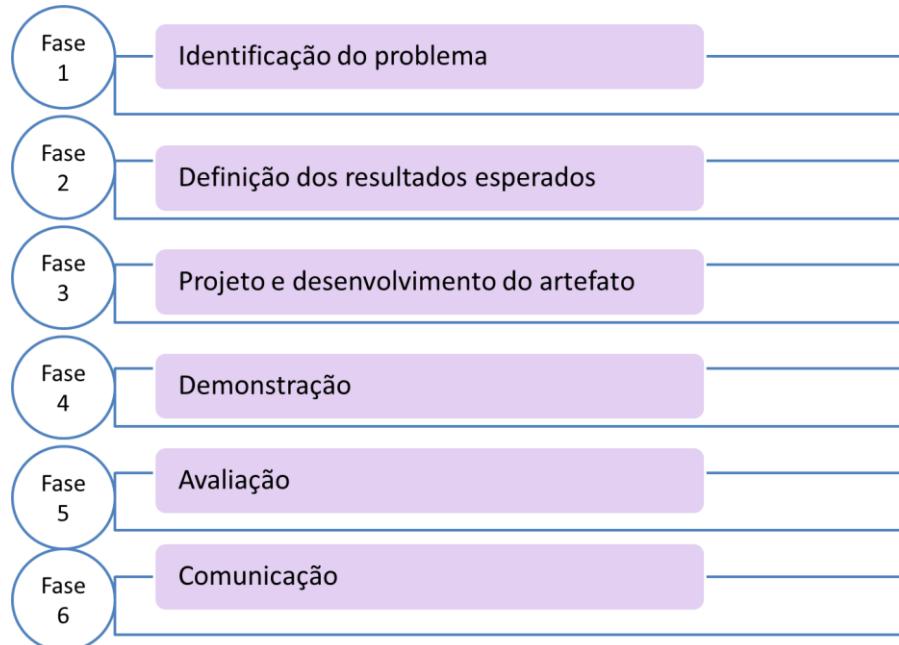
- a) Construtos: vocabulário e símbolos (elementos conceituais utilizados para descrever um problema e especificar soluções);
- b) Modelos: abstrações e representações (descrição de como as coisas são; representação da realidade com foco na utilidade);
- c) Métodos: algoritmos e práticas (passos necessários para o desempenho de uma atividade ou tarefa);
- d) Instanciações: sistemas implementados e prototipados (execução do artefato no ambiente real).

### 3.4.2 Método das fases de pesquisa da construção do artefato

Segundo Hevner *et al.* (2004), o processo de *Design Science Research* - DSR é caracterizado por uma sequência estruturada de atividades, cujo objetivo primordial é a concepção e a produção de um artefato inovador. Ele pode ser avaliado por meio de diferentes atributos, como funcionalidade, completude, consistência, precisão, desempenho, confiabilidade, usabilidade. O artefato visa a solucionar ou a mitigar um problema prático; ele contribui para o avanço do conhecimento tanto no domínio da teoria, quanto da prática. As fases da pesquisa DSR acompanham os diferentes períodos distintos relacionados aos ciclos de desenvolvimento do artefato.

Este trabalho optou pelo método proposto por Peffers *et al.* (2007), mostrado na Figura 8. Esse método assegura que a aplicação do artefato pode resolver problemas de mesma natureza e contribua para geração de conhecimento.

Figura 8 – Método de fases de pesquisa DSR



Fonte: Adaptado de Peffers *et al.* (2007)

O detalhamento de cada fase do método adotado neste trabalho está apresentado no Quadro 4.

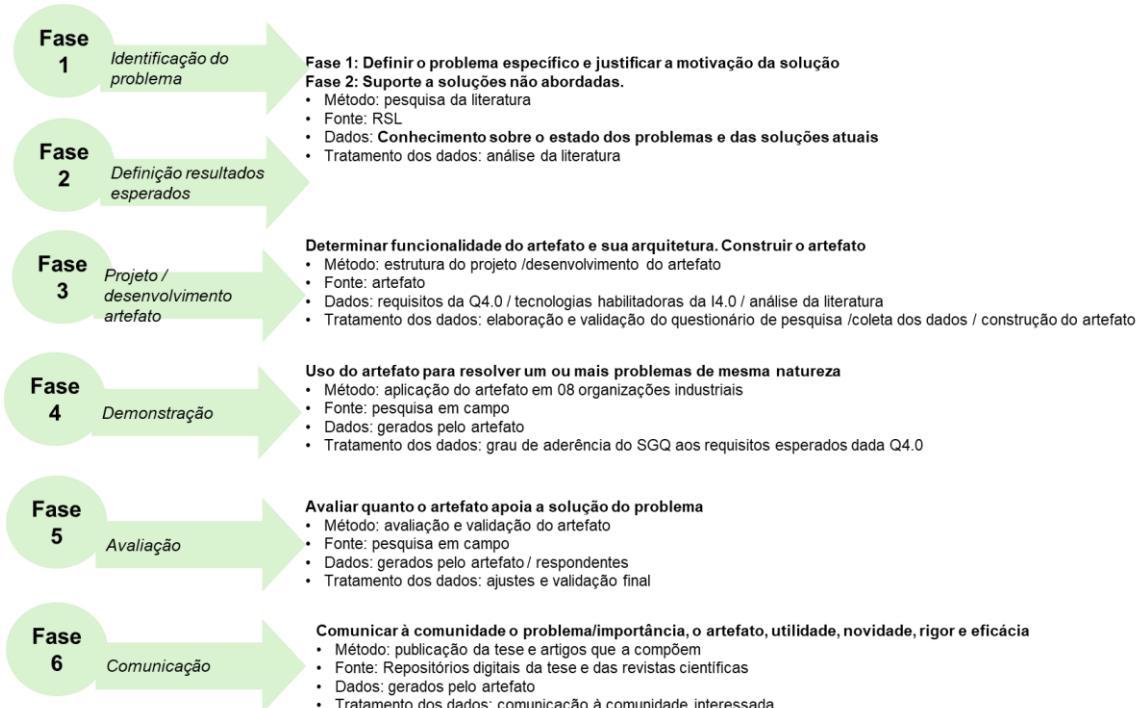
Quadro 4– Detalhamento das fases do método DSR

Fase nº	Descrição	Detalhamento
1	Identificação do problema	Definição e compreensão do problema, com a justificativa da relevância de sua solução
2	Definição dos resultados esperados	Definição dos objetivos que possam suportar a solução na consideração ao problema ainda não abordado. Os resultados podem ser quantitativos ou qualitativos
3	Projeto e desenvolvimento do artefato	Definição da arquitetura do artefato, com funcionalidade que resolva o problema, com desenvolvimento e fácil construção
4	Demonstração	Demonstração de que o artefato resolve o problema por meio de experimento, de prova, de simulação, de estudo de caso
5	Avaliação	Comparação entre os resultados esperados na Fase 2 e os resultados reais, a fim de avaliar como o artefato suporta a solução ao problema
6	Comunicação	Comunicação sobre a importância do problema, do artefato, sobre sua utilidade e seu rigor científico ao público interessado

Fonte: Adaptado de Peffers *et al.* (2007)

Para cada fase do método de Peffers *et al.* (2007), identificaram-se conexões ou vínculos relacionados a atividades necessárias para o bom desenvolvimento da construção do artefato. Essas atividades são representadas pelos seguintes elementos constitutivos mostrados na Figura 9:

Figura 9 – Vínculos entre as fases da pesquisa DSR e o desenvolvimento do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5 Pré-requisitos para aplicação do artefato

O detalhamento dos pré-requisitos da aplicação do artefato está apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Pré-requisitos para aplicação do artefato

Pré-requisitos	Descrição
1	Aplicação em 04 organizações industriais
2	Público-alvo: Cargo ou função de gestão (Coordenação, Gerência, Diretoria, Sócio Proprietário) de processos industriais, como produção, qualidade, automação, melhoria, inovação, tecnologia da informação.
3	A aplicação do artefato em reunião virtual agendada no <i>Google Meet</i> ou <i>TEAMS</i> . Compartilhamento da tela do <i>software</i> pelo pesquisador, que preenche em seu equipamento as informações e as escolhas do respondente (estratégia adotada devido à potencial restrição das organizações em instalar programas ou acessar <i>links</i> externos). Essa prática mantém o rigor da pesquisa, ao possibilitar que o pesquisador possa esclarecer, em tempo real, dúvidas ou interpretações sobre questões relacionadas ao artefato.
4	Tempo estimado para a aplicação do artefato = 15 minutos
5	Organizações industriais que tenham implementado em seu processo qualquer tecnologia habilitadora da Indústria 4.0.

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, são mostrados os resultados da análise e a discussão dos dados obtidos nesta pesquisa, estruturados como segue: (a) seção 4.1 que apresenta o Resumo Expandido do artigo 1 e (b) seção 4.2 que mostra o sistema de diagnóstico de prontidão, conforme a aplicação do artefato.

### 4.1 Artigo 1

O artigo 1 — publicado em 19 de setembro de 2025 no periódico *The TQM Journal*, sob o título '*Quality 4.0 in industrial organizations: challenges, benefits, and a research agenda*', DOI:10.1108/TQM-01-2025-0034 — analisa o contexto da Qualidade 4.0, os desafios e os benefícios da sua implementação. Propõe ainda conceito de Qualidade 4.0 e uso do *Targeted Data* no gerenciamento da qualidade.

#### 4.1.1 Resumo Expandido – artigo 1

### QUALIDADE 4.0 EM ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS: DESAFIOS, BENEFÍCIOS E UMA AGENDA DE PESQUISA

**CONTEXTUALIZAÇÃO:** Atualmente, as organizações industriais estão inseridas num cenário de constante mudança apoiada pelo acelerado aperfeiçoamento tecnológico e pela inovação (Ali; Johl, 2022). São características dessa nova realidade a coleta e a contínua fluidez dos dados associados à tomada de decisão em tempo real (Antony *et al.*, 2023; Efimova; Bris, 2021). Avanços sob a forma de ondas tecnológicas são absorvidos pelas empresas para aumentar seu desempenho, para melhorar resultados e gerar vantagem competitiva.

Nesse contexto, menciona Chiarini (2020) que, em 2011, na Alemanha, surge o conceito da Indústria 4.0 apoiado pelas tecnologias habilitadoras, cuja aplicação se expande pelos processos manufatureiros e, por consequência, estabelece uma nova abordagem da gestão da qualidade orientada por dados, a Qualidade 4.0 (Zonnenshain; Kenett, 2020). As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 geram a necessidade de compreensão dos impactos e das influências à Qualidade 4.0

(Efimova; Bris, 2021; Karbekova *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2022). Técnicas digitais, como os sensores inteligentes coletam enormes quantidades de dados que definem o *big data*. Consideradas relevantes ao processo da Qualidade 4.0, conforme apontam (Sony *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023), elas (técnicas digitais) implicam necessidades de armazenamento e análise aprofundada dos dados para uso.

Nesse cenário de *big data*, pode ocorrer problema relacionado à sobrecarga de informação (Wan; Liu, 2025; He, 2022). Fatores de prontidão são considerados pré-requisitos em preparação à Qualidade 4.0. Digitalização, integração digital entre equipamentos e a cadeia produtiva na busca da melhoria operacional são importantes nesse processo (Javaid *et al.*, 2021; Chiarini; Kumar, 2022). No contexto de mudanças frequentes, novas habilidades e competências digitais são necessárias; destaca-se a adoção da postura de previsão, em complemento à prevenção, base dos SGQs tradicionais (Liu *et al.*, 2023).

Muito embora, o conceito da Qualidade 4.0 ainda esteja não totalmente concluído (Zulfiqar *et al.*, 2023), a Comissão Europeia (*European Commission*, 2021) divulgou nova proposta denominada Indústria 5.0. Ela integra à Indústria 4.0 elementos de sustentabilidade em geral, centrada no ser humano e na resiliência da cadeia produtiva. Consideram Piccarozzi *et al.* (2024) o conceito Indústria 5.0 como complemento ou extensão da Indústria 4.0. Diante do cenário da nova propositura, surge o termo Qualidade 5.0 baseado no conceito de Sociedade 5.0 (Salimbeni *et al.*, 2023), ainda carente de pesquisa e fundamento acadêmico.

**OBJETIVO:** Investigar desafios e benefícios da implementação da Qualidade 4.0 em organizações industriais, a influência do conceito da Indústria 5.0 e a emergência da Qualidade 5.0, o potencial problema de sobrecarga de informação na Qualidade 4.0 devido à facilidade de coleta de dados por intermédio das técnicas digitais; propor uma agenda de pesquisa.

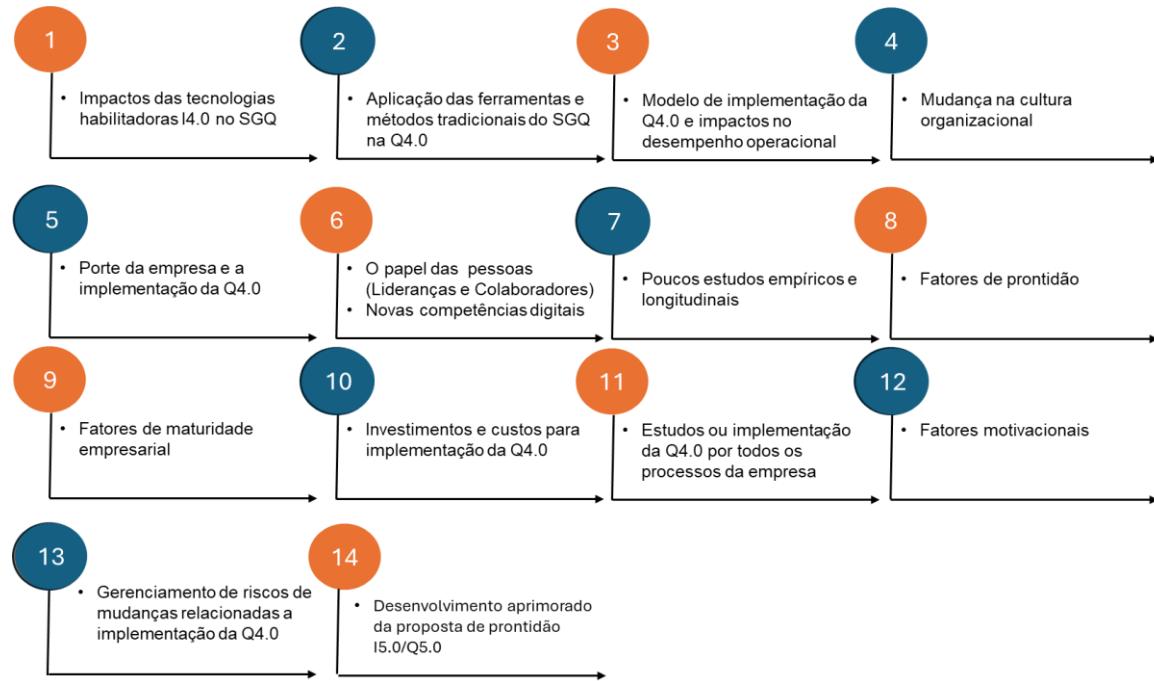
**MÉTODO:** O artigo utilizou análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura – RSL pelo modelo PRISMA, com pesquisa sobre Qualidade 4.0 e Qualidade 5.0.

## **DISCUSSÕES:**

**Síntese das lacunas de pesquisa:** A RSL revelou que a maioria dos estudos acadêmicos publicados se baseia em aspectos teóricos, entrevistas ou questionários;

ressalta a necessidade de pesquisa longitudinal e empírica (Chiarini; Kumar, 2022; Antony *et al.*, 2023). O artigo identificou 14 categorias de lacunas de pesquisa que ele considera amplos aspectos relacionados a questões ainda não respondidas sobre a implementação da Qualidade 4.0, conforme apresentado na Figura 10.

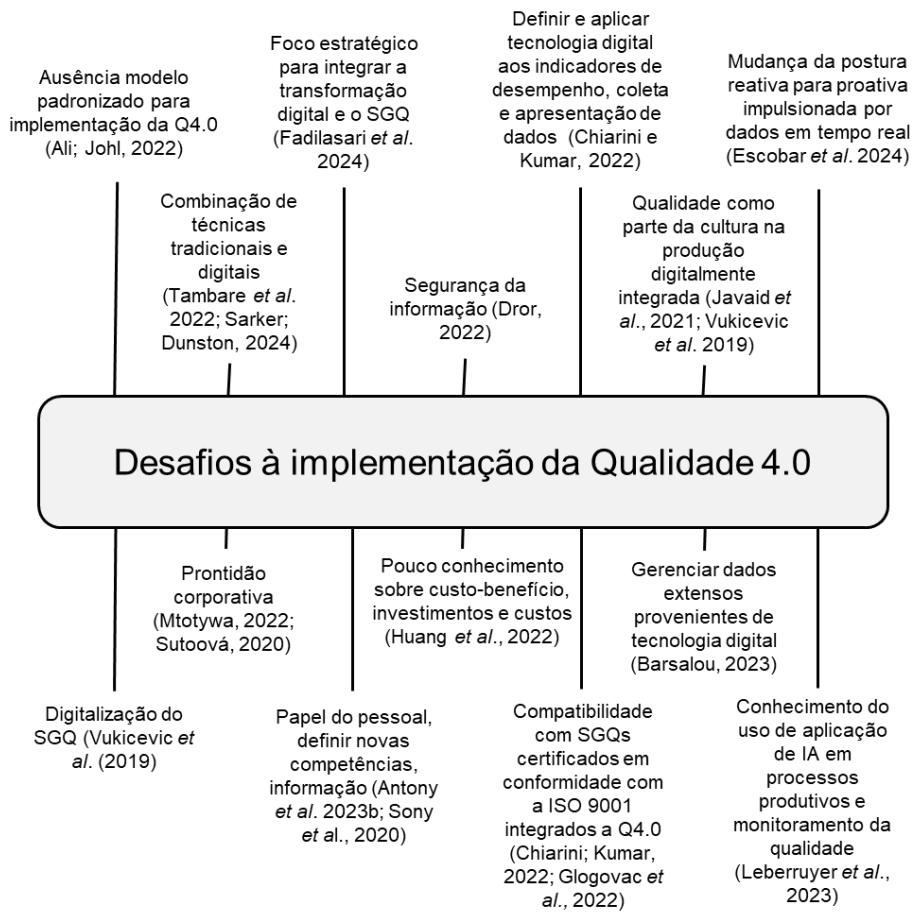
Figura 10 – Categorias de lacunas relacionadas à implementação da Qualidade 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

**Desafios à Implementação da Qualidade 4.0:** Um processo inovador e disruptivo num ambiente de transformação digital, como o representado pela Qualidade 4.0, implica inúmeras dificuldades ou desafios a serem enfrentados. A Figura 11 detalha desafios à implementação da Qualidade 4.0 encontrados na RSL.

Figura 11 – Desafios para a implementação da Qualidade 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

**Benefícios esperados com a implementação da Qualidade 4.0:** A transformação digital representada pela Qualidade 4.0 oferece oportunidade de benefícios. Nela, se destacam: (a) predição dos processos em complemento à previsão, o que antecipa, por meio de monitoramento, adventos não planejados (Silva *et al.*, 2024; Escobar *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023); (b) compartilhamento de técnicas digitais e tradicionais (Sarker; Dunston, 2024; Tambare *et al.*, 2022); (c) acompanhamento de *KPIs* em tempo real por conexão digital a instrumentos, equipamentos e processos (Chiarini; Kumar, 2022); emprego da realidade aumentada (Ho *et al.*, 2022); (d) digitalização das operações produtivas (Jokovic *et al.*, 2023); (e) melhor capacitação das pessoas pelo uso de técnicas digitais (Antony *et al.*; 2023; Sony *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2023).

**CONSIDERAÇÕES FINAIS:** Como contribuição ao corpo do conhecimento, devido à ausência de um conceito padronizado, o artigo sugere uma definição para Qualidade

4.0, cujo diferencial está em sua natureza prática e integrada à tecnologia digital: 'A *Qualidade 4.0* agrega tecnologia digital às práticas do sistema de gestão da qualidade para tomada de decisão e melhoria operacional'. Foram identificadas e classificadas 14 categorias de lacunas e elaboradas questões de pesquisa a cada uma delas com vista à elaboração de agenda futura. Outras contribuições do artigo incluem a proposição do 'Targeted Data' para evitar a sobrecarga de informação, de discussão sobre a Qualidade 4.0 no cenário da Indústria 5.0 e uma análise crítica do conceito da Qualidade 5.0.

**PALAVRAS-CHAVE DOS AUTORES:** Qualidade 4.0, Qualidade 5.0, Indústria 5.0, *Targeted Data*, sobrecarga de informação.

**PALAVRAS-CHAVE DO EDITOR:** Indústria 4.0, Qualidade do produto, Conceitos de Qualidade, Gerenciamento da Qualidade, Requisitos do cliente, Gerenciamento da informação.

## 4.2 Sistema de diagnóstico de prontidão

Esse subitem apresenta o artefato, a aplicação em organizações industriais e resultados.

### 4.2.1 Confidencialidade da informação

Com a finalidade de manter confidencialidade de informação, conforme disposto na documento apresentado e aprovado pelo Comitê de Ética da Universidade Paulista – UNIP (Apêndice B), as empresas participantes da pesquisa, a partir desse ponto, são denominadas 'Empresa A', 'Empresa B', 'Empresa C' e 'Empresa D'. Pelo mesmo motivo, apenas o cargo dos respondentes está identificado.

### 4.2.2 O Artefato

Segundo Van Aken (2004), artefatos são construídos para problemas reais e para serem usados para promover melhoria. Hevner *et al.* (2004) mencionam que são consideradas artefatos as formas estruturadas que possam resolver uma mesma natureza de problema, por exemplo, as que abrangem *softwares*, normas e métodos.

O artefato desta tese é um *software* construído para gerar um indicador da qualidade, denominado DQ<sup>+</sup>, cujas finalidades são (a) comparar o atual sistema de gestão da organização com os requisitos esperados da Qualidade 4.0; (b) indicar priorização dos requisitos para a implementação da Qualidade 4.0.

O artefato foi elaborado em *MS Excel*; utilizaram-se para isto macros e planilhas e *Visual Basic for Applications* – VBA. O artefato gera relatórios gráficos gerenciais, como auxílio à implementação da Qualidade 4.0.

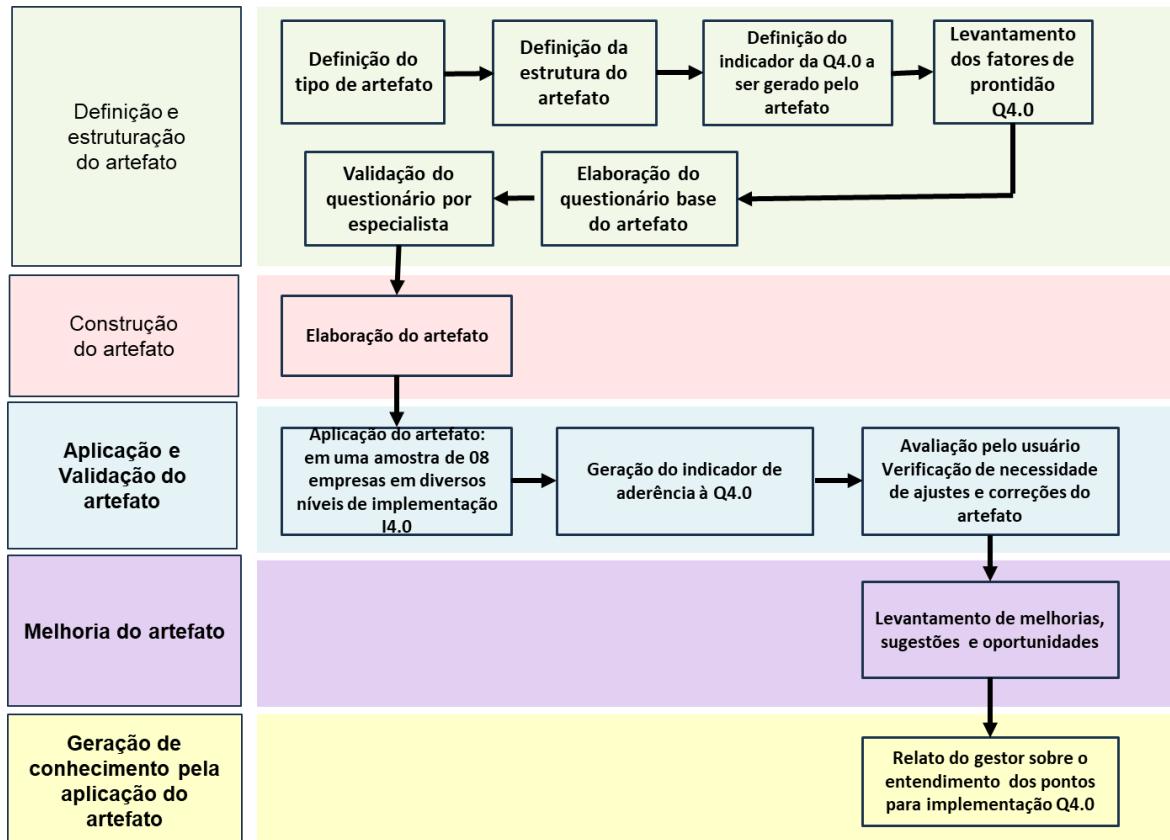
A estratégia de pesquisa DSR adotada nesta pesquisa, de acordo com o modelo definido por Peffers *et al.* (2007), estabelece na ‘Fase 5 - Avaliação’ (ver Figura 8), ocasião em que se comparam os resultados esperados com os reais, para avaliar como o artefato suporta a solução do problema. Um questionário foi oferecido aos respondentes (ver Apêndice A), após a aplicação do artefato para avaliação e validação do artefato. Um total de 10 questões (Q1 a Q10), estruturadas em escala *Likert*, variando de 1 (‘Discordo Totalmente’) a 5 (‘Concordo Totalmente’).

Completa o questionário um espaço composto por três ‘Questões Livres’ para que o respondente registre comentários destinados a possíveis ajustes ou propostas de melhorias ao desempenho do artefato, além de percepções não capturadas nas questões anteriores do artefato. Outra finalidade das ‘Questões Livres’ é obter informação sobre geração, aumento ou melhoria da compreensão sobre Qualidade 4.0. Ele objetiva saber se o respondente adquiriu conhecimento sobre o tema ao preencher as alternativas do artefato.

#### 4.2.3 Detalhamento do projeto de construção do artefato

O detalhamento do projeto apresenta as etapas e a lógica da construção do artefato. O desenvolvimento das etapas do artefato contempla as atividades para sua concepção conceitual, a construção propriamente dita, a aplicação, a validação, a melhoria do artefato e a constatação de geração de conhecimento ao final de sua aplicação na organização, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Detalhamento do projeto de construção do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.4 Estrutura do artefato

A estrutura do artefato está concebida em sequência lógica de questões elaboradas a partir da análise crítica realizada nas publicações pesquisadas da literatura relevante sobre a Qualidade 4.0, conforme detalhado no artigo 1. A perspectiva permite comparar a situação atual do sistema de gestão da qualidade de uma organização industrial com os requisitos esperados, levantados na literatura, à implementação da Qualidade 4.0. Baseado nesse resultado comparativo entre o real e o esperado, o artefato apresenta indicadores por ‘seção’ temática e ‘geral total’ da organização. Adicionalmente, oferece informações sobre priorização dos requisitos a serem desenvolvidos ou mais bem trabalhados, o que gera conhecimento aos gestores responsáveis na finalidade de apoiar a implementação da Qualidade 4.0.

Quando do preenchimento das questões referentes à Qualidade 4.0 por meio do artefato, ao serem analisadas, a ação conduz ao exercício de reflexão pormenorizada e detalhada acerca do assunto; oferece potencial de geração de

conhecimento aos respondentes / gestores e à própria organização. Finalmente, uma seção de perguntas é usada para validar o artefato, com avaliação de sua facilidade de uso, da clareza das suas questões, de seu desempenho geral sobre a interpretação dos indicadores e se ele – o artefato – atende as expectativas do usuário.

#### 4.2.5 Questionário do artefato – Seções estruturadas

Segundo informam Antony *et al.* (2022), identificar os fatores de prontidão e buscar sua melhor compreensão é um processo importante para o sucesso da implementação da Qualidade 4.0. O questionário que compõe o artefato foi elaborado a partir da análise crítica dos fatores de prontidão discutidos nas publicações relevantes identificadas na RSL, conforme detalhado no artigo 1. Uma vez identificados esses fatores de prontidão (na consideração de sua importância para orientar ações e, por conseguinte, gerar conhecimentos aos gestores), eles foram examinados e categorizados por temas, cuja abordagem permite obter uma visão abrangente, com vistas à preparação e à implementação da Qualidade 4.0, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Temas abordados para a definição das Seções do artefato



Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em conta, a identificação dos temas orientativos à implementação da

Qualidade 4.0, foi definido um total de 18 Seções estruturadas na construção do questionário que compõe o artefato, conforme mostrado no Quadro 6. As questões elaboradas como base da construção do artefato foram analisadas e validadas por especialista acadêmico / consultor da qualidade quanto à sua abrangência, à sua clareza e à sua interpretação pelo respondente.

Quadro 6 - Seções estruturadas das questões do artefato

Seção	Descrição
1	Dados demográficos: identificação do perfil do respondente e dados gerais da empresa
2	Integração Digital
3	Qualidade Preditiva
4	Tomada de Decisão Baseada em Dados
5	Competências Humanas e Organizacionais
6	Transformação das Ferramentas da Qualidade
7	Prontidão e Maturidade Organizacional
8	Abordagens Proativas da Qualidade
9	Sistemas Ciberfísicos* e <i>IoT</i> ( <i>Internet das Coisas</i> )
10	Adaptação dos requisitos das Normas ISO
11	Liderança da Qualidade em ambiente de inovação
12	Utilização de <i>Big Data</i>
13	Gerenciamento de Riscos e de Mudanças
14	Alinhamento Estratégico com os Objetivos de Negócios
15	Transformação Digital da Cultura de Qualidade
16	Integração com Conceitos sociais e de sustentabilidade
17	Infraestrutura para a Qualidade digital
18	Custos e Investimentos para a Qualidade digital

Fonte: Elaborado pelo autor

A Seção 1 – ‘Dados demográficos: identificação do perfil do respondente e dados gerais da empresa’ servem ao conhecimento do perfil do respondente, da sua experiência, além de fornecer dados gerais sobre a empresa e sua relação com tema de pesquisa. As demais Seções são compostas por 02 (duas) perguntas que cobrem os aspectos relevantes da Qualidade 4.0, como a sua preparação ou o seu desenvolvimento direcionado à transição digital. As perguntas apresentam opções de

respostas em escala *Likert*, variando de 1 (nenhuma aderência) a 5 (atende plenamente).

As opções estão em formato texto para orientar o respondente e esclarecer eventuais dúvidas em sua interpretação. O artefato apresenta graficamente informação sobre cada pergunta respondida no artefato (Figura 14). A resposta a cada questão está apresentada e organizada em colunas de acordo com a afirmativa selecionada, o que corresponde à pontuação da escala *Likert*, considerada pelo gestor.

Figura 14 – ‘Quadro de pontuação das Afirmativas’

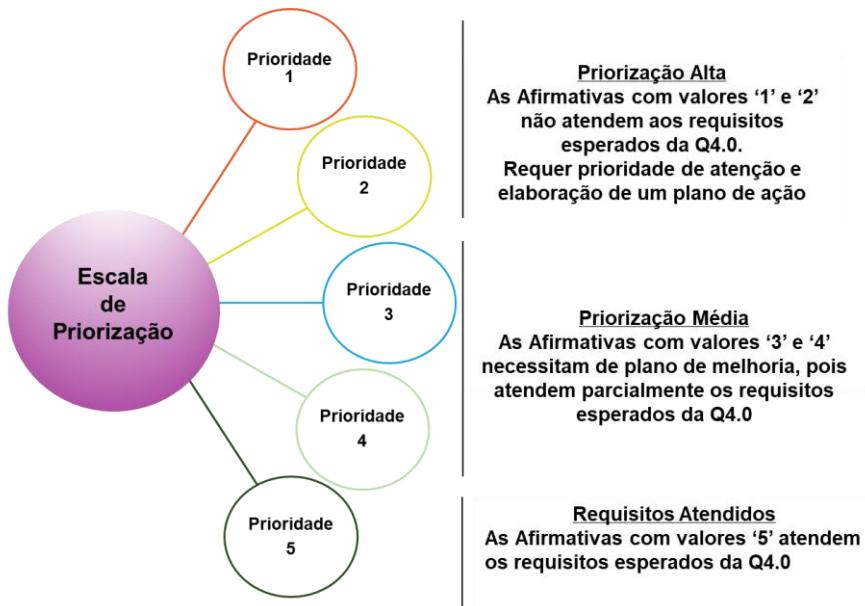
Seção	Afirmativas <sup>1</sup>	Pontuação				
		1 Nenhuma aderência	2 Pouca aderência	3 Aderência regular	4 Atende parcialmente	5 Atende plenamente
2	P11				■	
	P12					■
3	P13				■	
	P14				■	
4	P15			■		
	P16			■		
5	P17		■			
	P18	■				

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa visualização serve como primeira orientação em relação aos requisitos a serem priorizados e/ou mais bem trabalhados, direcionados à implementação da Qualidade 4.0.

Uma vez categorizadas as respostas, o gestor tem à sua disposição uma escala de priorização de ações em atendimento aos requisitos esperados da Qualidade 4.0. A ‘escala de priorização’, conforme detalhamento na Figura 15, contempla 5 (cinco) diferentes prioridades, classificadas como: (a) Alta – valores 1 e 2; (b) Média – valores 3 e 4; (c) Requisitos Atendidos – valor 5. A categorização da informação em forma de prioridades fornece ao gestor uma orientação sobre, por exemplo, onde investir recursos destinados ao plano de ação necessário ao atendimento dos requisitos da Q4.0. Os recursos são relacionados a diversas naturezas, tal qual definição de estratégias, tempo a dispenser, investimentos financeiros, infraestrutura tecnológica, equipamentos digitais e novas competências.

Figura 15 – Escala de priorização de ações em atendimento aos requisitos esperados da Qualidade 4.0

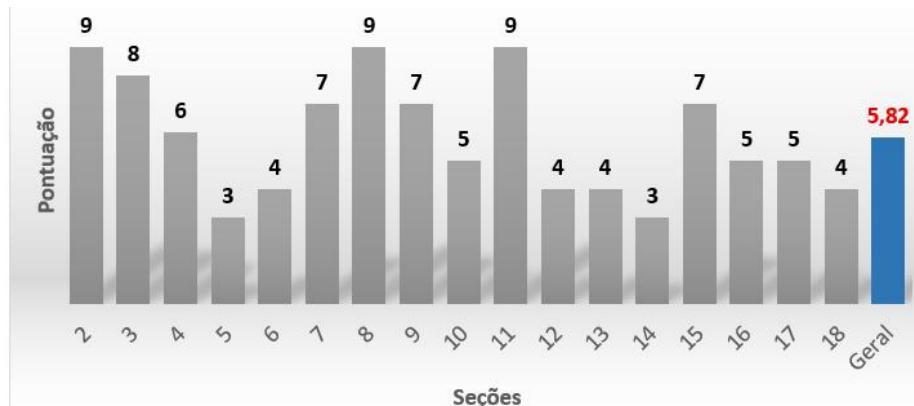


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.6 Indicador DQ<sup>+</sup> por Seção e Indicador DQ<sup>+</sup> Geral

O indicador DQ<sup>+</sup> por Seção, gerado pelo artefato de forma segmentada por Seção, permite a visualização da priorização dos requisitos que necessitam de mais atenção por parte dos gestores. O cálculo do Indicador DQ<sup>+</sup> por Seção considera cada agrupamento de duas questões correspondente a cada Seção, com soma das afirmativas selecionadas pelo gestor ao preencher as questões do artefato, o que está em parceria com os valores da escala *Likert*. Sua análise contribui para a adequação e o alinhamento do SGQ aos requisitos para transição digital, em conformidade com o conceito da Qualidade 4.0 (Figura 16).

Figura 16 – Índice DQ<sup>+</sup> por Seção e Índice DQ<sup>+</sup> Geral



Fonte: Elaborado pelo autor

O artefato também apresenta 'Indicador DQ<sup>+</sup> Geral' (média simples dos Indicadores DQ<sup>+</sup> por Seção); proporciona visualização do total geral obtido pela empresa quanto à constatação dos requisitos esperados da Qualidade 4.0.

Adicionalmente, o 'Indicador DQ<sup>+</sup> por Seção' também está organizado num 'gráfico de radar' (Figura 17), cuja apresentação pode servir como orientação ao gestor que aplicou o artefato. Ele o auxilia na geração e no aprofundamento do conhecimento sobre Qualidade 4.0, seus pontos fracos, fortes e críticos com vistas à implementação, à melhoria ou à adequação. Para a interpretação desse gráfico, foi estabelecido como critério que valores, obtidos por Seção iguais ou inferiores a 0,6 (60%), devem ser considerados pelos gestores para elaboração de plano de ação.

Figura 17 – Informação sobre priorização de planos de ação por Seção



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.7 Comunicação dos resultados de pesquisa – Diretriz DSR

A Fase 6 da estratégia de pesquisa DSR, conforme apresentado na Figura 8, refere-se à comunicação dos resultados gerados pelo artefato à comunidade científica e em geral. Como critério adotado por este trabalho para atendimento dessa diretriz, os resultados da aplicação do artefato estão disponíveis às partes interessadas por meio da publicação deste trabalho no Repositório Digital da Universidade Paulista – UNIP.

#### 4.2.8 Aplicação do artefato

Para a aplicação do artefato foram atendidos os pré-requisitos descritos no Quadro 5 – ‘Pré-requisitos para aplicação do artefato’. Os respondentes participantes da pesquisa exercem função de gestão e foram selecionados por conveniência do pesquisador. São colaboradores de multinacionais — relevantes em seus respectivos segmentos de negócios — instaladas no Brasil (matriz ou afiliada). Declararam ter implementado em seus processos alguma das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. O artefato foi aplicado em reunião virtual por intermédio das plataformas *Google Meet* e *TEAMS*, no período de 23 de julho de 2025 a 05 de setembro de 2025. Um total de 04 respondentes de organizações industriais participaram desta pesquisa. As empresas, devido às suas características, a seu porte e à sua atuação de mercado, favorecem a análise de um amplo campo à pesquisa.

##### a) ‘Empresa A’

Organização multinacional de grande porte do ramo farmacêutico fundada há mais de 50 anos. Possui algumas tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 implantadas em processos específicos da organização, entre eles a ‘serialização farmacêutica’. Esse processo atribui um número de série único a cada unidade de produto; serve à manutenção da rastreabilidade total do produto, desde a cadeia de suprimentos, de processos de manufatura até o consumo final. A rastreabilidade do produto/embalagem é garantida por meio de uma ligação direta entre a empresa fabricante e a entidade de proteção à saúde brasileira, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Ela requer aplicação de tecnologia digital em equipamentos e uso de softwares especializados.

b) 'Empresa B'

Organização multinacional de grande porte do ramo químico, fundada há mais de 50 anos, fabricante de especialidades químicas. Conta com tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como sensores inteligentes de medição em tempo real, sistema de coleta de dados para orientação à tomada de decisão, câmeras para inspeção e controle de processos, processo controlado por Inteligência Artificial e *software* de apoio à análise laboratorial da qualidade conectado ao sistema integrado de gestão (ERP). Em seu quadro de funcionários, há o cargo de Gerência Digital, responsável pela análise de necessidades e implantação de digitalização de processos e controles.

c) 'Empresa C'

Organização multinacional de grande porte do segmento Cosmético, com mais de 50 anos de existência. Tem implantados em seus processos sensores inteligentes para pesagem, para integração com sistema integrado de gestão (ERP) com outras tecnologias digitais, para identificação de falhas em processo com tomada de decisão para reprocesso, armazenamento de dados em nuvem, *big data* e *big data analytics*. A empresa encontra-se, atualmente, em processo de mudança cultural à transformação digital. São inúmeras frentes, como identificação de novas competências — para uso e tratamento de *softwares* nos diferentes processos. As gerências possuem orçamento, apesar de caráter não específico, destinado à implementação de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Entretanto, é conferida a prerrogativa de realocar recursos sob sua responsabilidade, originalmente alocados para outras finalidades, em favor da transição digital.

d) 'Empresa D'

Organização multinacional de grande porte do setor automotivo, fundada há mais de 80 anos. Nela, entre as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, ressalta-se a manufatura aditiva, inicialmente implantada para prototipagem. Posteriormente, a aplicação dessa tecnologia foi estendida à produção de componentes de reposição para a manutenção de equipamentos. Conta com outras iniciativas digitais implementadas: armazenamento em nuvem, *big data*, *data lake* - repositório

centralizado que armazena grandes volumes de dados brutos, ainda sem processamento ou análise -, uso de robôs autônomos controlados por IA, IoT, realidade virtual, digitalização de processos, cibersegurança, realidade aumentada – repertório destinado a treinamento na e fora da empresa - associação entre sistema integrado de gestão e programas de apoio (ERP, OEE, realidade virtual).

#### 4.2.9 Dados coletados pelo artefato

A análise e discussão dos resultados coletados pelo artefato estão detalhadas nos subitens subsequentes deste trabalho.

As informações gerais e as datas da aplicação do artefato estão apresentadas na ‘Seção 1: Dados demográficos: identificação do perfil do respondente e dados gerais da empresa’ (ver Quadro 7). A aplicação do artefato foi realizada em empresas de grande porte, já fundadas entre 50 e 80 anos. São multinacionais representantes de diferentes segmentos de negócios, com matriz no Brasil ou afiliada de grupo internacional instalado no país. Para melhor compreensão da pesquisa, acrescentaram-se elementos sobre a experiência dos respondentes e funções, situação sob certificação do SGQ, sobre a familiaridade com o conceito da Indústria 4.0 e sobre o tempo de início de implementação de alguma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0.

O resultado da aplicação do artefato pelos respondentes referentes a priorização de ações e indicadores gerados são apresentados nas Figura 18 e Figura19.

Quadro 7 - Dados gerais das empresas e datas de aplicação do artefato

Dados Demográficos: Identificação do Perfil do Respondente e Dados Gerais da Empresa							
Empresa	Cargo/função do respondente (P1)	Experiência do respondente (P2)	Porte da organização (P3)	Localização (P4)	Perfil da empresa (P5)	Segmento industrial (P6)	Data da aplicação do artefato
A	Coordenação, Melhoria e Inovação	10 a 15 anos	Grande (+ 500 funcionários)	Matriz - Brasil	Familiar multinacional	Farmacêutico	23 jul. 25
B	Gerência da Qualidade	20 a 25 anos	Grande (+ 500 funcionários)	Afiliada - Brasil	Privada SA multinacional	Químico	29 jul. 25
C	Coordenação Inovação / Logística e Pós-Entrega	05 a 10 anos	Grande (+ 500 funcionários)	Matriz - Brasil	Privada SA multinacional	Cosméticos	05 set. 25
D	Gerência de Projetos industriais e Serviços (Enga. Processos, Manutenção, Investimentos, Ambiental, <i>Lean Manufacturing</i> , Melhoria e Inovação)	+ 30 anos	Grande (+ 500 funcionários)	Matriz - Brasil	Familiar multinacional	Automotivo	03 set. 25

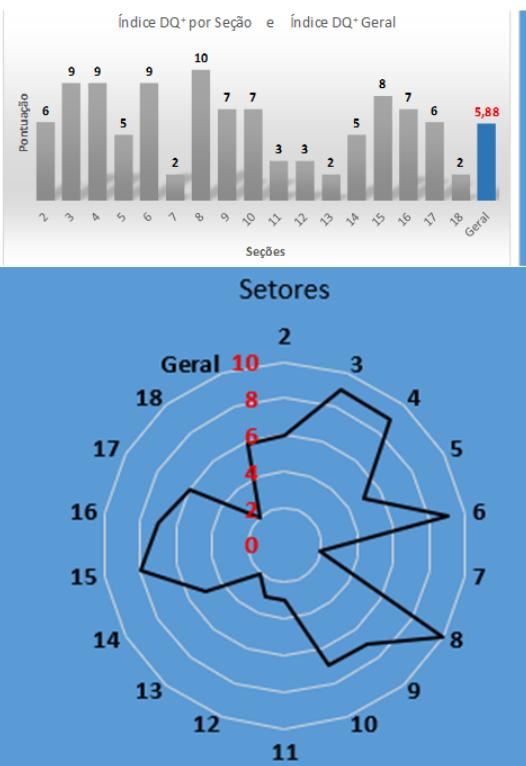
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Resultados da aplicação do artefato (1)

Quadro de pontuação das “Afirmativas”

Seção	Afirmativa*	Pontuação				
		1 Nenhuma adefenda	2 Pouca adefenda	3 Adequada	4 Adequa- damente	5 Adequa- damente
2	P11	■				
	P12		■			
3	P13					■
	P14					■
4	P15					■
	P16				■	
5	P17	■		■		
	P18			■		
6	P19			■		
	P20				■	
7	P21	■				
	P22	■				
8	P23					■
	P24					■
9	P25					■
	P26	■				
10	P27			■		
	P28			■		
11	P29			■		
	P30	■				
12	P31			■		
	P32			■		
13	P33				■	
	P34				■	
14	P35				■	
	P36				■	
15	P37	■				
	P38					■
16	P39					■
	P40					■
17	P41					■
	P42					■
18	P43	■				
	P44	■				

Empresa A



Quadro de pontuação das “Afirmativas”

Seção	Afirmativa*	Pontuação				
		1 Nenhuma adefenda	2 Pouca adefenda	3 Adequada	4 Adequa- damente	5 Adequa- damente
2	P11	■				
	P12		■			
3	P13			■		
	P14				■	
4	P15				■	
	P16				■	
5	P17	■				
	P18			■		
6	P19			■		
	P20				■	
7	P21	■				
	P22	■				
8	P23				■	
	P24				■	
9	P25				■	
	P26	■				
10	P27			■		
	P28			■		
11	P29				■	
	P30	■				
12	P31			■		
	P32			■		
13	P33				■	
	P34	■				
14	P35				■	
	P36				■	
15	P37	■				
	P38					■
16	P39					■
	P40					■
17	P41					■
	P42		■			
18	P43	■				
	P44	■				

Empresa B

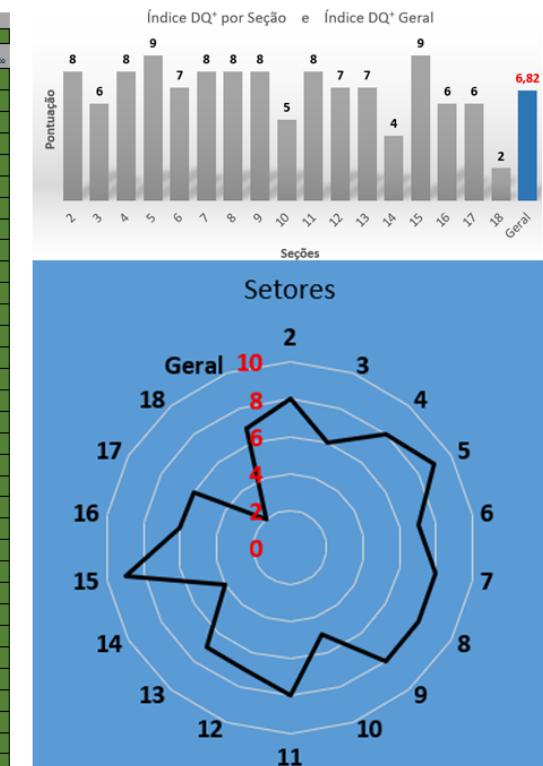
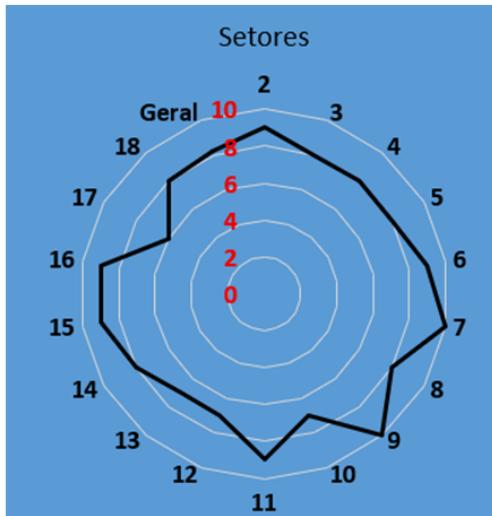
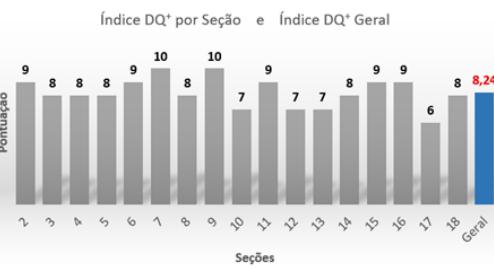


Figura 19 – Resultados da aplicação do artefato (2)

Quadro de pontuação das “Afirmativas”

Seção	Afirmativas*	Pontuação				
		1 Nenhum adequado	2 Pouca adequação	3 Adequação regular	4 Atende parcialmente	5 Atende plenamente
2	P11	9	8	8	8	1
	P12	8	8	8	8	1
3	P13	9	10	10	8	1
	P14	7	7	7	7	1
4	P15	10	10	10	8	1
	P16	10	10	10	8	1
5	P17	10	10	10	8	1
	P18	10	10	10	8	1
6	P19	10	10	10	8	1
	P20	10	10	10	8	1
7	P21	10	10	10	8	1
	P22	10	10	10	8	1
8	P23	10	10	10	8	1
	P24	10	10	10	8	1
9	P25	10	10	10	8	1
	P26	10	10	10	8	1
10	P27	10	10	10	8	1
	P28	10	10	10	8	1
11	P29	10	10	10	8	1
	P30	10	10	10	8	1
12	P31	10	10	10	8	1
	P32	10	10	10	8	1
13	P33	10	10	10	8	1
	P34	10	10	10	8	1
14	P35	10	10	10	8	1
	P36	10	10	10	8	1
15	P37	10	10	10	8	1
	P38	10	10	10	8	1
16	P39	10	10	10	8	1
	P40	10	10	10	8	1
17	P41	10	10	10	8	1
	P42	10	10	10	8	1
18	P43	10	10	10	8	1
	P44	10	10	10	8	1

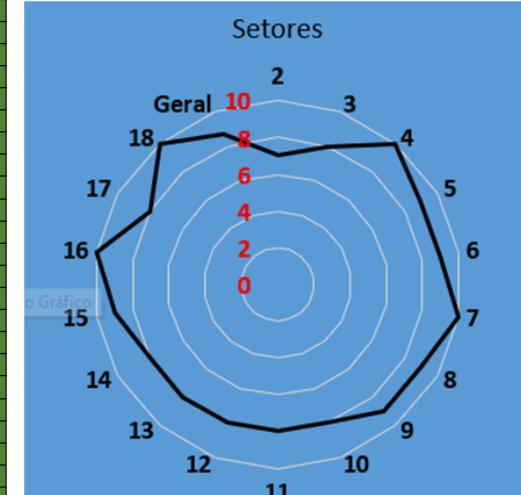
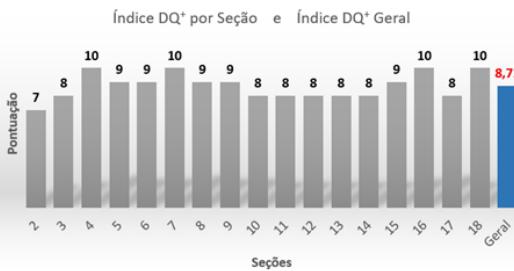
Empresa C



Quadro de pontuação das “Afirmativas”

Seção	Afirmativas*	Pontuação				
		1 Nenhum adequado	2 Pouca adequação	3 Adequação regular	4 Atende parcialmente	5 Atende plenamente
2	P11	1	1	1	1	1
	P12	1	1	1	1	1
3	P13	1	1	1	1	1
	P14	1	1	1	1	1
4	P15	1	1	1	1	1
	P16	1	1	1	1	1
5	P17	1	1	1	1	1
	P18	1	1	1	1	1
6	P19	1	1	1	1	1
	P20	1	1	1	1	1
7	P21	1	1	1	1	1
	P22	1	1	1	1	1
8	P23	1	1	1	1	1
	P24	1	1	1	1	1
9	P25	1	1	1	1	1
	P26	1	1	1	1	1
10	P27	1	1	1	1	1
	P28	1	1	1	1	1
11	P29	1	1	1	1	1
	P30	1	1	1	1	1
12	P31	1	1	1	1	1
	P32	1	1	1	1	1
13	P33	1	1	1	1	1
	P34	1	1	1	1	1
14	P35	1	1	1	1	1
	P36	1	1	1	1	1
15	P37	1	1	1	1	1
	P38	1	1	1	1	1
16	P39	1	1	1	1	1
	P40	1	1	1	1	1
17	P41	1	1	1	1	1
	P42	1	1	1	1	1
18	P43	1	1	1	1	1
	P44	1	1	1	1	1

Empresa D



#### 4.2.10 Preparação à implementação da Qualidade 4.0

Chiarini e Kumar (2022) apontaram que, mesmo que exista opinião discordante sobre a implementação da Qualidade 4.0 baseada no modelo ISO, considerado excessivamente rígido e estático diante da realidade de transição digital, há outro ponto de vista que compartilha o fato de o pessoal estar familiarizado com práticas padronizadas oferecidas pela ISO. Argumentam Oliveira *et al.* (2025) que a evolução da Qualidade 4.0 integra novas tecnologias da Indústria 4.0, combinadas as abordagens tradicionais, como a ISO 9000.

Todos os respondentes declararam que suas empresas possuem SGQ certificado, estruturado em alto nível de conformidade com a norma ISO 9001. Adicionalmente, a ‘Empresa D’ possui um certificado emitido pela *International Automotive Task Force* (IATF, a norma IATF 16949), destinado à qualidade do setor automotivo. Evidencia-se um cenário de maturidade avançada dessas organizações ao priorizar melhoria recorrente de produtos e processos.

O respondente da ‘Empresa D’ relatou que adotaram a digitalização dos processos antes da implementação da Indústria 4.0, propriamente dita. Ressaltou a importância das práticas do *Lean Manufacturing* e da *World Class Manufacturing* (Produção de Classe Mundial), elementos estabelecidos na Indústria 3.0, uma iniciativa do segmento automotivo e utilizada há vários anos pela empresa. Nesse contexto, destacam como boa prática Sader *et al.* (2022), Broday (2022) e Sony *et al.* (2020a) o apoio de um SGQ robusto que preserve vantagens e benefícios alcançados. Mencionam ainda esses autores que Qualidade 4.0 não substitui as ferramentas e as práticas tradicionais, mas promove o aprimoramento contínuo, quando ela é combinada e integrada à tecnologia digital, cenário encontrado nesta análise de dados.

Os respondentes solicitaram esclarecimentos ao aplicar o artefato sobre o termo ‘fatores de prontidão’ e exemplos de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, com a finalidade de melhor avaliar a própria realidade, mesmo afirmando familiaridade com o conceito. Evidenciou-se que careciam de informação mais objetiva sobre a relação entre as práticas que já utilizam e a Indústria 4.0. Antony *et al.* (2023b) confirmam essa situação ao apontar que Indústria 4.0 e Qualidade 4.0 são conceitos recentes, em estágio incipiente de assimilação e implementação. Essa afirmação é corroborada pelo respondente da ‘Empresa A’, ao comentar que ‘existem implementações isoladas de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, mas muitas

empresas não se dão conta de que é a Indústria 4.0!' A inexistência ou implementação parcial de planos e de estudos destinados à implementação da Indústria 4.0 reforçam aquele fato, mesmo tendo iniciado a jornada em direção à Indústria 4.0 há certo tempo. A exceção é feita ao respondente da 'Empresa D', quando ele comenta ter elaborado um plano estratégico de 05 anos sobre o tema e o estar gerenciando.

#### 4.2.11 Transição digital da qualidade

O ponto de partida em direção à transformação digital tem como destaque a digitalização dos processos produtivos e da qualidade, estratégia implementada plenamente pela 'Empresa D'. Nesse contexto, apontam Sony *et al.* (2020) que Qualidade 4.0 é a digitalização da qualidade de *design*, qualidade de conformidade e qualidade de desempenho com uso de tecnologias modernas. A digitalização do SGQ é um pré-requisito para a Qualidade 4.0 (Tambare *et al.*, 2022). Confirmado a importância primária da digitalização, constatou-se que essa prática é comum a todas as empresas pesquisadas, porém em diferentes níveis de implementação e utilização.

Apontam Deliu e Olariu (2024) que o processo evolutivo da informatização para a digitalização e, subsequentemente, para a transformação digital tem sido conduzido pelo uso de IA e *big data analytics*. Destacam Leberruyer *et al.* (2023) e Chiarini (2020) o desafio para aplicação de IA como auxiliar das ferramentas das qualidades tradicionais na geração de oportunidade para o aumento da qualidade. Nesse contexto, evidenciam-se trabalhos que tratam como positiva a implementação da Qualidade 4.0 devido à sua característica preditiva ao favorecer a tomada de decisão fundamentada em dados coletados em tempo real (Sony *et al.*, 2021; Sony *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2025; Javaid *et al.*, 2021).

As empresas, embora empenhadas para a integração digital, apresentam essa prática em processos isolados, sem um plano consistente à sua plena efetivação, à exceção da 'Empresa D' que se encontra adiantada nessa questão. Identificou-se a importância para as empresas do caráter preditivo da qualidade levantado pela literatura. A conduta da prevenção comum à Qualidade 3.0 está migrando para o modo preditivo e proativo, focado em análise de dados e melhorias — características esperadas da Qualidade 4.0.

O artefato capturou abordagens proativas da qualidade que atestam o emprego de dados reais que visam à eliminação de ações reativas da qualidade em

processos-chaves contemplados com a prática da prevenção. Diante desse cenário, observou-se que há visão da gestão das empresas para eliminação ou redução de eventos adversos não planejados da qualidade, exceção constatada na 'Empresa B'. Nela, verificou-se que, ainda que exista a visão preventiva, ela não está claramente definida nem é açãoada na medida esperada.

#### 4.2.12 Análise de dados baseada em dados

A tomada de decisão baseada em dados é uma mudança de paradigma associada à Qualidade 4.0. Dias *et al.* (2022) argumentam que acompanhamento de variáveis do processo em tempo real favorece a tomada de decisão pelos gestores e, consequentemente, permite maior rapidez ao procedimento decisório e pode obter diferencial de resultados quando comparado à concorrência (Mahin *et al.*; 2024; Sony *et al.*, 2020).

A pesquisa revelou que as empresas apoiam decisões da qualidade em análise de dados estruturados na maioria dos processos. No caso, destaca-se a 'Empresa D', mais avançada nesse item por ter institucionalizado e sistematizado o resultado da análise de dados às decisões estratégicas da qualidade.

#### 4.2.13 O papel da liderança e dos colaboradores

O papel do pessoal e a definição das novas competências necessárias ao pessoal são apontados como um desafio a ser enfrentado para implementação da Qualidade 4.0 (Antony *et al.* 2022; Liu *et al.*, 2023), devido à novidade e à disruptão associada à inovação. Mencionam Tewary e Jadon (2023) como benefício proporcionado pela Qualidade 4.0 o desenvolvimento e o aprimoramento de novas habilidades e competências das lideranças e dos colaboradores. A Qualidade 4.0, caracterizada pela aplicação de tecnologia digital, requer o estabelecimento de foco estratégico robusto, compartilhado por toda a empresa, considerado como pré-requisito à integração entre a transformação digital e o SGQ (Fadilasari *et al.*, 2024).

As organizações compreendem a importância do estabelecimento de ações direcionadas às novas competências, essenciais à nova ordem da qualidade. As expectativas das lideranças e dos colaboradores quanto ao desenvolvimento de novas competências variam entre os departamentos. Observa-se necessidade de

aclaramento e definição de escopo — um possível indicativo de ausência de uma estratégia corporativa. As empresas, de forma geral, tratam a questão das competências digitais e revelam esforço direcionado à aderência proposta da literatura pesquisada.

A ‘Empresa A’ relatou oportunidade de desenvolvimento dessa matéria ao estar consciente de sua necessidade; porém, não conta com um programa estruturado ou orçamento alocado a tal propósito. Essa situação foi citada na RSL no artigo 1 por Zheng *et al.* (2024), Chiarini e Kumar (2022) e Sony *et al.* (2020), ao identificar o fato como lacuna de pesquisa a ser explorada em estudo futuro.

Quanto ao entendimento por parte da liderança, a empresa demonstra interesse ou apoia a transformação digital nas operações da qualidade. Para suportar a restruturação da liderança à nova realidade tecnológica, a maioria das organizações, em diferentes níveis de implementação, estabeleceu planos de treinamento destinados à liderança. A ‘Empresa A’ relatou a ausência de planos de treinamento das lideranças focados para a transformação digital.

#### 4.2.14 Ferramentas tradicionais da Qualidade e a Qualidade 4.0

A Qualidade 4.0 não deverá substituir as ferramentas e as práticas tradicionais da qualidade, que podem ser adaptadas, aproveitadas e integradas com a tecnologia digital, o que estimula a melhoria contínua (Oliveira *et al.*, 2025; Sarker; Dunston, 2024; Sader *et al.*, 2022; Broday, 2022; Sony *et al.*; 2020a). Combinar abordagens tradicionais e digitais é um desafio a ser enfrentado pelas organizações, conforme apontam Escobar *et al.* (2024) e Sarker e Dunston (2024).

O artefato capturou o esforço das empresas para adaptar as ferramentas da qualidade no processo de transição digital. Diante desse panorama, observou-se que, à exceção da ‘Empresa B’ que não discutiu ou tomou ação, os requisitos da ISO estão sendo alinhados às demandas do ambiente digital. A solução encontrada pelas organizações está sendo a adoção de modelo híbrido que combina práticas tradicionais e digitais e visa a otimizar esforços, recursos dispendidos e resultados alcançados.

#### 4.2.15 Prontidão e maturidade da organização

Antony *et al.* (2022) e Sony *et al.* (2021) argumentam que os fatores de

prontidão — grau de preparação existente para adoção das tecnologias habilitadoras — são utilizados como indicadores para avaliar o ritmo da inovação representado pela transição digital e se organizações estão prontas para implementar a Qualidade 4.0. Mtowywa (2022) e Sutoová (2020) apontam como desafio a identificação da prontidão corporativa. A identificação do impacto envolvido para a integração emergente das tecnologias habitadoras da Indústria 4.0 na Qualidade 4.0, ao se considerar a complexidade do cenário industrial, foi identificada no artigo 1 e como lacuna de pesquisa (Sony *et al.*, 2020; Sony *et al.*, 2022; Zulfiqar *et al.*, 2023).

Constatou-se, entre a maioria dos respondentes, que a avaliação dos fatores de prontidão integra a estratégia para o planejamento e a execução da transformação digital. Na ‘Empresa A’, a ausência de uma avaliação dos fatores de prontidão pode elevar o risco de implicações negativas e eventos adversos durante a implementação da Qualidade 4.0.

Dados do artefato sobre a relação entre transformação digital da qualidade e alavancamento da competitividade dos negócios encontraram diferentes níveis de tratamento nas organizações. Duas empresas entendem que a transformação digital é vista como alavanca para a competitividade, e o seu planejamento estratégico incorpora iniciativas limitadas à qualidade. Uma empresa considera o fato como situação benéfica; no entanto, não se incorpora formalmente à estratégia. Por fim, há uma empresa em que existe reconhecimento da relação entre transformação digital e competitividade, mas sem ligação clara com o aumento da competitividade. A análise desses dados indica que o planejamento estratégico ainda não está incorporado a uma visão definida com a finalidade da transformação digital, o que atinge somente em certa medida a qualidade.

#### 4.2.16 *Big data* para SGQ

*Big data* é a tecnologia habilitadora responsável pela grande quantidade de dados brutos coletados de diferentes fontes como no chão de fábrica durante a fabricação do produto (Khan *et al.*, 2025; Bajic *et al.*, 2023; Aceto *et al.*, 2020). O *big data* é a resultante do uso das demais tecnologias digitais que favorecem o aprimoramento da produtividade e da qualidade dos processos e produtos (Oliveira *et al.*, 2025). O mesmo *big data* é ainda elemento importante da Qualidade 4.0, argumentam Sony *et al.* (2020) e Liu *et al.* (2023). Conforme a proposta seminal de

Zonnenshain e Kenett (2020), a Qualidade 4.0 é conceituada como uma abordagem de gestão da qualidade orientada por dados. Nesse contexto, os autores sublinham a importância crítica da qualidade da informação no âmbito do *big data* para a sua efetiva implementação. Acrescentam Dias *et al.* (2022) que agregar valor gerado pelo processamento da informação depende da capacidade de a gerar, na consideração dos dados brutos coletados.

O artefato capturou diferentes situações relacionadas à eficácia do *big data*. Constatou-se em duas empresas a coleta de dados, mas o processamento é ainda considerado inconsistente ou sua análise ineficiente, quando se tem em vista os propósitos da tecnologia. As demais empresas consideraram apresentar relativo sucesso em sua aplicação e reconheceram oportunidade de melhoria.

#### 4.2.17 Infraestrutura e tecnologias habilitadoras aplicadas

O processo de transição digital implica a aplicação das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, disponibilizadas e aproveitadas pela Qualidade 4.0. Os sistemas ciberfísicos possibilitam a conexão entre computadores e equipamentos; integram as operações em tempo real (Oks *et al.*, 2024) base à *IoT*. Essa última, integra a infraestrutura que realiza a conexão de dispositivos para troca de dados (Zhong *et al.*, 2017), enquanto os sistemas ciberfísicos, os processos físicos.

Os respondentes indicaram que as empresas possuem consciência sobre a importância dos sistemas ciberfísicos e da *IoT* para o alcance dos objetivos da transformação digital. Um declarou aplicação piloto, mas seu uso é limitado ou se encontra em caráter experimental. Os demais relataram sua aplicação e integração com as principais operações da qualidade. Quanto ao monitoramento de processos que utilizam sensores para coleta de dados em tempo real, três respondentes mencionaram sua implementação em diversos processos-chave. Já um respondente afirmou estar totalmente estabelecido para coleta de dados direcionados à qualidade.

A infraestrutura digital envolvida, ou disponível, à transformação digital é tratada pela literatura como requisito relevante à Qualidade 4.0. Também é considerada um desafio a ser enfrentado quanto ao aproveitamento das técnicas tradicionais do SGQ (Sader *et al.* 2022). Dois respondentes avaliam que suas organizações praticam avaliação parcial. Em decorrência, há lacunas na infraestrutura necessária. Os demais respondentes mencionam avaliação completa relacionada aos

requisitos da qualidade digital. Quanto à infraestrutura de redes de sensores, dispositivos *IoT*, demais instrumentos de coleta de dados em tempo real, há distintos níveis de implementação: ‘Empresa A’ e ‘Empresa C’ apresentam integração parcial; ‘Empresa B’, existência de alguma integração não incorporada totalmente aos sistemas da qualidade. A ‘Empresa D’ possui a maioria dos sensores e dispositivos digitais integrados ao SGQ. Entende-se de forma geral que as organizações reconhecem necessidades à Qualidade 4.0; porém, apresentam diferentes níveis de implementação ou de definição clara de estratégia pela alta direção.

#### 4.2.18 Transformação digital e a cultura da qualidade

Apontam Antony *et al.* (2022) e Sony *et al.* (2021) que, diante de um processo de mudança, alguns fatores são significativos, tal como a cultura organizacional. O uso de tecnologias em diversos processos da organização requer receptividade cultural necessária à implementação da Qualidade 4.0 (Psarommatis; Azamfirei, 2024). Conforme argumentam Sony *et al.* (2020) e Oliveira *et al.* (2025), a Qualidade 4.0 tem entre seus ingredientes-chave para sua implementação eficaz a cultura organizacional para a Qualidade 4.0.

Nesse contexto, o processo de mudança com uso da tecnologia digital, que caracteriza a inovação representada pela Qualidade 4.0, demanda a adoção de posicionamento estratégico que considere a qualidade no âmbito da cultura organizacional. A cultura da qualidade abrange diferentes frentes à implementação da Qualidade 4.0, seja como fator de prontidão de apoio à mudança de comportamentos e gerenciamento de processos, seja como desafio a ser enfrentado na busca da integração digital (Javaid *et al.*, 2021; Vukicevic *et al.* 2019).

O artefato direcionou questão sobre a relação entre a cultura da qualidade e a inovação digital. As respostas capturaram que as empresas promovem a inovação digital na cultura da qualidade, e essa prática confirma os achados da literatura pesquisada. Elas implementaram mecanismos para impulsionar e apoiar a mudança cultural direcionada à qualidade por meio digital, fator relevante da transformação digital e da cultura da qualidade.

#### 4.2.19 Integração com conceitos sociais e sustentabilidade

Novas concepções suscitadas pela relação entre a transformação digital e a

Qualidade 4.0 introduzem atenção à dimensão humana (Dias *et al.* 2022). Confirmam Kumar *et al.* (2022) a importância do aspecto das pessoas na Qualidade 4.0 e reafirmam que processos desenhados como repetitivos e rotineiros são passíveis de automação. Nem todas as funções, porém, poderão ser automatizadas. Dentro dessa perspectiva, Piccarozzi *et al.* (2024) mencionam que há importância em desenvolver a aplicação da tecnologia digital e a sustentabilidade econômica, financeira e social. Os autores ainda consideram essa discussão como complementar ou uma extensão da Indústria 4.0, que requer um reposicionamento conceitual para focar pessoas.

A maioria dos respondentes optaram pelas respostas oferecidas pelo artefato, aquelas em que há manutenção de equilíbrio entre a automação e a contribuição humana. Apenas na 'Empresa A' se constatou que esse equilíbrio vem sendo tentado, mas não de forma consistente. A sustentabilidade e a ética são, para metade dos respondentes, práticas geralmente integradas à qualidade e totalmente integradas para o restante. Observa-se a intenção das organizações pesquisadas na preocupação com a dimensão humana e seus potenciais impactos no processo de implementação da Qualidade 4.0. O conceito da Qualidade 4.0 ainda é recente, e isto confere à sua abrangência e à sua influência uma percepção pelos gestores de medidas cuidadosas devido à sensibilidade do tema.

#### 4.2.20 Gerenciamento de riscos e de mudanças

A complexidade inerente à tecnologia digital aplicada aos processos estabelece o gerenciamento de riscos como ação destinada à mitigação de seus potenciais impactos associados (Oliveira *et al.*, 2025; Tsarouhas; Papaevangelou, 2024). Apontam Sader *et al.* (2022) que as empresas, para superar desafios provocados por processos inovadores e disruptivos - tais como os representados pela implementação da Qualidade 4.0 - , necessitam definir estratégias e planos orientados à redução de riscos e de efeitos das mudanças.

Diante desse cenário, Dias *et al.* (2022), Fadilasari *et al.* (2024) e Psarommatis e Azamfirei (2024) compartilham que a Qualidade 4.0, como resultado da transformação digital, está inserida em ambiente de mudanças contínuas. Verhoef *et al.* (2021) complementam essa constatação ao atribuir como benefício da mudança a oportunidade de criação de valor à empresa.

O artefato, ao questionar a existência de um modelo de gerenciamento de

riscos e mudança em preparação à Qualidade 4.0, recebeu como respostas que ‘Empresa A’ não tem modelo para o gerenciamento de riscos; ‘Empresa B’ possui um modelo básico, mas com pouco foco nos aspectos digitais; as ‘Empresa C’ e ‘Empresa D’ possuem um modelo de gerenciamento de riscos e mudanças para o SGQ digital.

A diferença apresentada entre a declaração dos respondentes aponta situações de ausência de estratégia estabelecida para fins de mitigar efeitos de mudanças e riscos até gerenciamento consolidado para lidar com essas questões, potencialmente presentes em processos inovadores. Diferentes situações encontradas pelo artefato podem indicar que as organizações reconhecem a importância da qualidade digital, mas, em alguns casos, ainda não há definição de estratégias direcionadas à prevenção ou à eliminação de resultados decorrentes de circunstância adversa não planejada.

A resistência organizacional pode impedir a adoção de novas práticas digitais na gestão da qualidade, conforme afirmam El Manzani *et al.* (2025). Entre os fatores críticos de sucesso à implementação da Qualidade 4.0 pesquisados por Antony *et al.* (2023b), destacam-se investimento em tecnologia, novas competências, segurança cibernética, cultura organizacional e gerenciamento da resistência à mudança. O uso de novas técnicas digitais em ambientes tradicionais, argumentam Rogala *et al.* (2024), pode suscitar nos gestores e colaboradores uma avaliação pouco positiva sobre sua utilidade ou seus benefícios. Reações relacionadas à insegurança à novidade e preocupação quanto ao futuro podem ser gatilhos relacionados à resistência em aceitar essas tecnologias.

Com base em suas experiências, os respondentes optaram por alternativas do artefato relacionadas à gestão da resistência à mudança e à inovação. As seleções indicaram uma percepção de despreparo, uma preparação relativa e a adoção de uma estratégia limitada e inconsistente. A literatura pesquisada recomenda, devido à natureza disruptiva e inovadora da Qualidade 4.0, adotar uma abordagem à resistência à mudança e ao gerenciamento do risco (Alsadi *et al.*, 2024), ao correlacionar o sucesso de implementação à capacidade da organização de desenvolver estratégias de preparação para a adoção de técnicas digitais. Tal característica tende a induzir um nível de apreensão no uso em processos, o que demanda um planejamento cuidadoso para mitigar a resistência e facilitar a transição tecnológica.

#### 4.2.21 Custos e investimentos direcionados à qualidade digital

A literatura apontou custos e investimentos como um desafio a ser solucionado pelas organizações durante o processo de implementação da Qualidade 4.0. Segundo confirmam Ali e Johl (2023) e Sony *et al.* (2020), ainda há pouco conhecimento sobre esse tema. A relevância desse quesito é observada pelos motivos da não adoção da Qualidade 4.0 levantados por Antony *et al.* (2022), ao se discutir a percepção das organizações relacionada ao alto investimento inicial sobre a complexidade do cálculo de retorno do investimento.

A ‘Empresa A’ e a ‘Empresa B’ não possuem nenhum modelo de análise de custo-benefício para a implementação da Qualidade 4.0; a ‘Empresa C’ conta com um modelo básico que carece de estrutura para sua aplicação. Apenas a ‘Empresa D’ possui um modelo abrangente e sistematizado, gerenciado pelo respondente.

A mesma dificuldade é encontrada na existência de um sistema de alocação de recursos específicos para a transformação digital: nenhum tipo de sistema de alocação de recursos na ‘Empresa A’ e na ‘Empresa B’. Já há recursos financeiros dedicados ao esforço da transformação digital na ‘Empresa C’ e na ‘Empresa D’. Da análise das respostas capturadas pelo artefato observa-se que existem organizações com tentativas de transformação digital, mas sem uma estrutura de projeto estratégica desenvolvida.

#### 4.2.22 Validação do artefato

Encerrada a etapa de respostas às perguntas, em atendimento à ‘Fase 5 – Avaliação’, conforme modelo de DSR proposto por Peffers *et al.* (2007), foi solicitado aos respondentes que opinassem sobre o desempenho geral do artefato em uso. As questões de 01 a 10 serviram à avaliação e à validação do artefato e cobriram aparência, objetividade, compreensão e clareza das perguntas, facilidade de manuseio. Cobriram ainda possíveis ocorrências funcionais não desejadas, entendimento e facilidade de análise dos indicadores gerados, potencial de uso dos indicadores para tomada de decisão estratégica quanto à implementação da Qualidade 4.0. Os resultados estão apresentados no Quadro 8.

### Quadro 8 - Desempenho geral do artefato

#### 0 Legenda da escala

**DT**= Discordo Totalmente

**DT**= Discordo Totalmente

**I**= Indiferente

**CP**= Concordo Parcialmente

**CT**= Concordo Totalmente

Q#	Descrição	Empresas				Escala
		A	B	C	D	
Q1	O <i>software</i> é fácil de manusear, telas apresentadas de forma amigável, atraente e fácil compreensão?					DT
						DP
						I
					x	CP
		x	x	x		CT
Q2	O controle do <i>software</i> facilita a operação, incluindo retorno para correções?					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT
Q3	Apresenta ausência de falhas ou travas durante o uso?					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT
Q4	O <i>software</i> executa suas funções de modo satisfatório e adequado?					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT
Q5	Os botões, ícones ou comandos são suficientes?					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT
Q6	As questões são fáceis de responder, mantendo atenção e interesse do respondente?					DT
						DP
						I
		x	x		x	CP
					x	CT
Q7	Apresentação do indicador DQ <sup>+</sup> gerado pelo <i>software</i> é de fácil análise e entendimento					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT
Q8	Considera o indicador DQ <sup>+</sup> importante para a estratégia e tomada de decisão					DT
						DP
						I
					x	CP
		x	x	x		CT
Q9	O <i>software</i> atende suas expectativas ou gera benefícios					DT
						DP
						I
					x	CP
		x	x	x		CT
Q10	Recomenda o uso do <i>software</i> para outras empresas					DT
						DP
						I
						CP
		x	x	x	x	CT

Fonte: Elaborado pelo autor

Constatou-se oportunidade de melhoria relacionada à Q6 ‘As questões são fáceis de responder e mantêm a atenção e o interesse do respondente?’. Esse relato foi percebido como relacionado à novidade dos termos da qualidade digital. As dúvidas foram esclarecidas pelo pesquisador durante a aplicação do artefato. Portanto, tratou-se de contribuição dos respondentes para não depender do pesquisador ao responder às questões. A ‘Empresa D’ possui definida uma estratégia para implementação dos requisitos da Indústria 4.0; encontra-se mais adiantada em relação às demais empresas participantes. Ela considerou atendimento parcial relacionado ao indicador, por conseguinte, às suas expectativas.

Foi disponibilizada aos respondentes uma seção com três Questões Livres com os seguintes objetivos: (a) avaliar o desempenho do artefato por meio de recomendações, ajustes, melhorias ou ocorrências adversas durante sua aplicação; (b) capturar informação de que o artefato tenha obtido êxito em solucionar o problema para o qual foi desenvolvido; (c) constatar se o uso do artefato gerou conhecimento sobre a Qualidade 4.0.

As respostas às Questões Livres estão apresentadas no Quadro 9. Os respondentes mencionaram facilidade de manuseio do artefato devido à apresentação simples, intuitiva e amigável. Eles confirmaram o relato anterior sobre necessidade de maiores esclarecimentos disponíveis em algumas perguntas, pois queriam facilitar sua compreensão para eliminar dependência do pesquisador ao respondê-las. Mencionaram que o artefato cumpriu sua finalidade; satisfez expectativas dos respondentes.

As Questões Livres avaliaram os benefícios obtidos durante a aplicação do artefato. Os respondentes consideraram-nas uma oportunidade para refletir sobre temas da Qualidade 4.0 de modo organizado e estruturado. Todos os respondentes afirmaram a geração de conhecimento quanto ao conceito ou ao aprofundamento sobre a implementação da Qualidade 4.0.

Observou-se nesse exercício que inúmeras ações estão sendo desenvolvidas nas organizações pesquisadas, mas ainda carecem de uma estratégia aprofundada, estruturada e integrada. Os relatos comunicaram iniciativas em andamento em processos isolados. Os gestores, em geral, possuem uma visão focada no processo sob sua responsabilidade, ainda não conectada ao conjunto da organização, com visão de longo prazo. Constatou-se a ausência de alocação de recursos e investimentos específicos à transição digital na ‘Empresa A’ e na ‘Empresa B’. Embora

as organizações possuam algumas tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 efetivadas, ou em processo, não se consideram integrantes da Indústria 4.0. Não utilizam essa denominação nem atentam para a possibilidade de extensão das tecnologias digitais em apoio e em direção à Qualidade 4.0.

Quadro 9 - Questões livres para avaliação e validação do artefato

Descrição	Empresas			
	A	B	C	D
<i>Espaço para recomendações, ajustes, melhorias, descrição de problemas que experimentou ou constatações diversas que gostaria de relatar</i>	Respondente relatou pouca dificuldade em questões mais específicas da qualidade por ser um especialista em Melhoria e Inovação	1. Respondente mencionou necessidade de mais informações em algumas perguntas para compreender melhor sobre qual escopo estamos avaliando (processos da qualidade ou processos de forma geral) 2. Informações adicionais seriam necessárias para sanar dúvidas sobre o objetivo, ganhos e resultados apresentados	"Software está intuitivo, perguntas endereçam bens as 'dores' do processo de implementação da Q4.0"	"Q1 / Q6 = Algumas questões necessitaram de auxílio do pesquisador para melhor compreensão"
<i>O software aumentou sua compreensão sobre a Qualidade 4.0? Poderia detalhar sua percepção?</i>	"Conforme a realiza uma reflexão ao responder as questões, o software (por ser bastante abrangente) dá oportunidade de passar por todos os detalhes relacionados a Q4.0"	"Gerou conhecimento e refletiu sobre os pontos a desenvolver em estudos para futura melhoria do processo atual e adequação à Q4.0"	"Sim. Perguntas estão claras, endereçam bem o entendimento do conceito. O princípio de sustentabilidade não havia sido percebida como um tema de I4.0. Percebeu durante a aplicação do artefato a importância do requisito à I4.0"	"Melhorou a compreensão sobre o tema da Qualidade 4.0, pois conhecia apenas o conceito de I4.0"
<i>O que destacaria referente a geração de conhecimento sobre Qualidade 4.0 com uso do software?</i>	"Ao passar por vários pontos e detalhes que são avaliados ao responder o software, sim gerou conhecimento sobre o tema"	"Como se estruturar diante da Alta Direção sobre benefícios da implementação da Q4.0, para fins de argumentação sobre investimentos e custos envolvidos, assim como a geração de benefícios gerados pela implantação da Q4.0"	"Propiciou conhecimento. As coisas estão acontecendo na empresa, ajudam a ter uma visão mais generalista do que está sendo construído durante o processo de implementação da Q4.0"	"Destacaria: conceito da Q4.0 Reflexão sobre se é imprescindível a digitalização total da empresa (todos os processos relacionados à Qualidade)" I4.0 na reflexão do respondente dependerá do momento em que a empresa /processos conseguirem ser autônomos e fazer autocorrecção

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5. CONCLUSÃO

A relação entre o conceito da Indústria 4.0 e a Qualidade 4.0 não é claramente percebida pelos gestores e empresas. Este trabalho constatou que as organizações industriais apresentam diferentes momentos da Indústria 4.0. O segmento automotivo é aquele que se encontra há mais tempo na jornada em direção à transição digital.

Evidenciaram-se iniciativas concretas relacionadas à Indústria 4.0, com algumas tecnologias digitais implementadas em processos produtivos isolados. Por esse motivo, os gestores denotam dificuldade e cuidado ao expressar sua compreensão sobre o contexto da Indústria 4.0 na sua realidade. Consideram que a implementação é fracionada e distribuída por alguns processos específicos, sem contar ainda com um claro planejamento para integração plena entre técnicas digitais e produção. Isto não lhes permite o uso do termo Indústria 4.0 associado à empresa.

A revisão sistemática da literatura – RSL do artigo 1 apontou inúmeras propostas para a conceituação da Qualidade 4.0. O conceito carece de padronização, ou normalização reconhecida, para fins de assegurar completude de entendimento e planificação de ações da parte dos gestores e das empresas.

Até esse momento, o que confirma achados da literatura, gestores e organizações não possuem uma visão terminante ou suficientemente madura sobre o modelo a se adotar para a implementação da Qualidade 4.0. Atenção e recursos das empresas estão centrados no âmbito da Indústria 4.0 e na ampliação do uso das tecnologias habilitadoras. Falta estabelecer precisamente a conexão entre a Indústria 4.0 e o processo da qualidade.

Desafios à implementação da Qualidade 4.0 em organizações manufatureiras destacam preocupação em como aproveitar técnicas e ferramentas tradicionais da qualidade sem perda dos resultados alcançados. A ausência de estratégia da alta direção à transição digital se faz presente ao se constatar a implementação da Indústria 4.0. Ela se realiza em processos específicos, isolados, sem integração por toda a organização. Falta iniciativa quanto à definição de investimentos específicos destinados à transformação digital. Evidencia-se que há dificuldade em relacionar atividades da Indústria 4.0 e o compartilhamento das tecnologias habilitadoras com a Qualidade 4.0.

Os benefícios à implementação da Qualidade 4.0 se referem à complementação da ação preventiva com ação preditiva, essa última por meio do

monitoramento de processos próximo ao evento controlado, com consequente tomada de decisão em tempo real. A rapidez de tomada de decisão tende a elevar a possibilidade de mitigação ou eliminação de não-conformidades nos processos e propicia melhoria no desempenho operacional.

Os fatores de prontidão considerados para a elaboração do questionário a partir da RSL do artigo 1 não diferem das necessidades encontradas na realidade brasileira, conforme observado na aplicação do artefato. Adicionalmente, foi detectada a necessidade de identificação dos fatores de prontidão requeridos em preparação à transformação digital dos processos produtivos para implementação da Qualidade 4.0. Os esforços estão fragmentados pelo aproveitamento de técnicas digitais mais básicas já utilizadas pelas empresas e necessitam de planejamento de longo prazo que contemple a definição de prioridades dos processos que serão contemplados.

As questões do artefato, para diagnosticar os fatores de prontidão presentes nas organizações industriais, foram validadas por um especialista da qualidade. Após a aplicação do *software*, os respondentes validaram o instrumento com o registro de suas percepções sobre o desempenho operacional e a capacidade de resolver problema. Em complemento, constatou-se a geração de conhecimento por meio do aclaramento de tópicos do artefato, o que permitiu que os respondentes compreendessem a possibilidade de expansão e compartilhamento das ações destinadas à Indústria 4.0 para a Qualidade 4.0.

Por fim, a Comissão Europeia propôs o conceito da Indústria 5.0 — que integra sustentabilidade geral, centralização no ser humano e resiliência da cadeia produtiva. O conceito está desconectado da realidade da Indústria 4.0. Pode ser considerado um reposicionamento conceitual ou complemento à Indústria 4.0, visão compartilhada por esse trabalho. Recentemente, a academia iniciou a discussão sobre a Qualidade 5.0. Até esse momento, porém, esta tese não identificou embasamento ou maturidade conceitual para sua aplicação nas organizações.

## 5.1 Contribuições práticas e teóricas

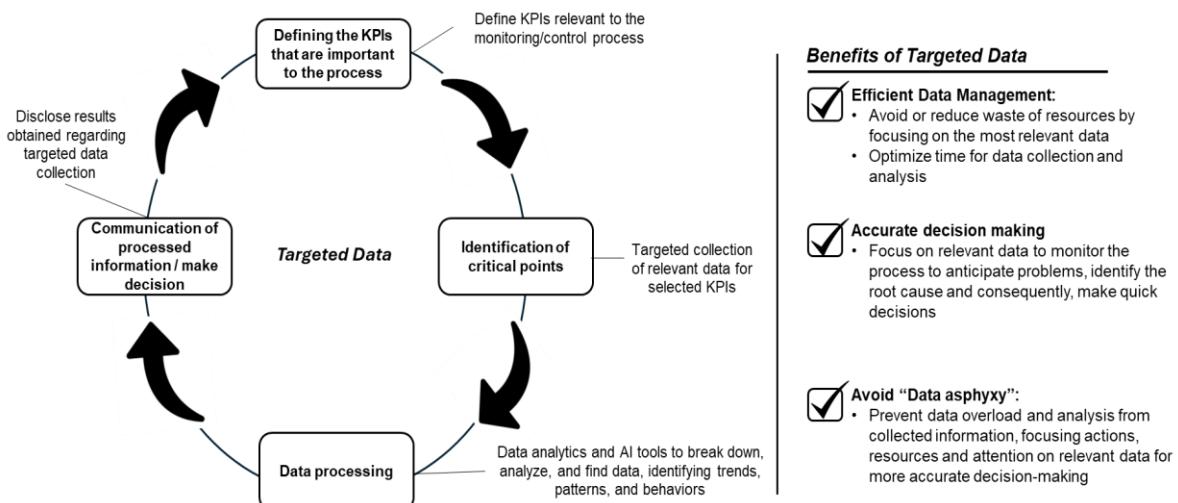
Este trabalho tem como contribuição prática a constatação do esforço das organizações para o aproveitamento das técnicas e das ferramentas tradicionais da qualidade, com o aprimoramento de seu uso na Qualidade 4.0.

A tese apresenta a proposta do uso inovador e original do *Targeted Data* (dados direcionados) no gerenciamento da Qualidade 4.0, por meio de um modelo estruturado para aplicação e benefícios. Trata-se de uma estratégia que simplifica e otimiza recursos derivados do *big data* da Indústria 4.0.

A facilidade para coleta, armazenamento e acessibilidade de grande volume de dados, proporcionada pelas técnicas digitais, pode acarretar algum prejuízo ou desvantagem, pois elas representam investimentos em infraestrutura, em pessoal, em equipamentos, em manuseio, em análise de informações e em consumo de recursos naturais (energia elétrica e água).

Para evitar a sobrecarga de informação aos processos e reduzir a ansiedade provocada por seu excesso, o *Targeted Data* identifica e separa as informações úteis; direciona àquelas que se interessam pelo benefício a tomada de decisão, conforme detalhado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema da aplicação do *Targeted Data* no gerenciamento da Q4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

A contribuição teórica deste trabalho explora a ausência de uma conceituação padronizada e reconhecida para a Qualidade 4.0. Diante desse contexto, este trabalho propõe um conceito que considera um escopo prático integrado ao âmbito da transformação digital: '*A Qualidade 4.0 agrupa tecnologia digital às práticas do sistema de gestão da qualidade para tomada de decisão e melhoria operacional*'.

Outra contribuição é análise crítica da nova proposta de Indústria 5.0, que a identificou mais como conceito de Sociedade 5.0. A Indústria 5.0 propõe uma futura Qualidade 5.0, um conceito que exigirá um suficiente e fundamental apoio teórico.

## **5.2 Limitações e estudos futuros**

A execução da pesquisa foi limitada às organizações industriais de grande porte. Para estudos futuros, sugere-se pesquisar empresas de médio e pequeno porte, que abranjam diferentes segmentos de negócio, para fins de avaliar o desempenho do artefato nessas situações.

A RSL do artigo 1 identificou que a maioria das pesquisas relacionadas à Qualidade 4.0 é baseada em estudo teóricos com busca em artigos científicos, entrevistas e aplicação de questionários. Constatou-se ausência de estudos longitudinais, cujos resultados poderiam revelar outras conclusões referentes ao estado da arte do conhecimento atual.

Por fim, a eventual necessidade de explorar o conceito da Qualidade 5.0 depende do desenvolvimento e do amadurecimento de uma base teórica que detalhe o conceito e o justifique.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 9000:2015- Sistemas de gestão da qualidade — Fundamentos e vocabulário.** Rio de Janeiro: ABNT. 2015a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 9001:2015- Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT. 2015b.

ACETO, G.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. **Industry 4.0 and health: internet of things, big data, and cloud computing for healthcare 4.0.** Journal of Industrial Information Integration, Vol. 18, 100129. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100129>.

ADSIZ, T; OZTURKOGLU, Y. **A conceptual framework for a new service model: digital servitization with an Industrial 4.0 perspective.** Journal of Global Operations and Strategic Sourcing, Vol. 18 No. 2, p. 267-284. 2025. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1108/JGOSS-08-2022-0091>.

AHMED, I.; JEON, G.; PICCIALLI, F. **From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in Industry 4.0: a survey on what, how, and where.** IEEE Transactions on Industrial Informatics. Vol. 18, No. 8. August 2022. 10.1109/TII.2022.3146552.

ALARCON, S.; ALARCON, C. **Questioning the concepts of the fourth industrial revolution and Industry 4.0 when describing modernization as a sequential framework.** Sustainability, Vol. 17, 4531. 2025. <https://doi.org/10.3390/su17104531>.

ALI, K.; JOHL, S. K. (2022), **Soft and hard TQM practices: future research agenda for industry 4.0.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 33, No.14, p. 1625-1655. 2022. doi: 10.1080/14783363.2021.1985448.

ALI, K.; JOHL S. K. **Impact of total quality management on industry 4.0 readiness and practices: does firm size matter?** International Journal of Computer Integrated manufacturing, Vol. 36, No. 4, p. 567-589. 2023. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2128213>

ALSADI, J.; ALKHATIB, F.; ANTONY, J.; GARZA-REYES, J. A.; TORTORELLA, G. AND CUDNEY, E. A. **A systematic literature review with bibliometric analysis of Quality 4.0.** The TQM Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. 2024. doi.org/10.1108/TQM-02-2024-0050.

ANTONY, J.; McDERMOTT, O.; SONY, M.; TONER, A.; BHAT, S.; CUDNEY, E. A.; DOULATABADI, M. **Benefits, challenges, critical success factors and motivations of Quality 4.0 – a qualitative global study.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 34, No 7-8, p. 827-846. 2023b. doi: 10.1080/14783363.2022.2113737.

ANTONY, J.; SWARNAKAR, V.; SONY, M.; McDERMOTT, O.; JAYARAMAN, R. **How do organizational performances vary between early adopters and late adopters of Quality 4.0? An exploratory qualitative study.** TQM Journal, Vol. 36, No. 8, p. 2338-2359. 2023a. doi: 10.1108/TQM-03-2023-0083.

ANTONY, J.; SONY, M.; McDERMOTT, O.; JAYARAMAN, R.; FLYNN, D. **An exploration of organizational readiness factors for quality 4.0: an intercontinental study and future research directions.** International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 40, No. 2, p. 582-606. 2022. doi:10.1108/IJQRM-10-2021-0357.

ANTONY, J.; McDERMOTT, O.; SONY, M. **Quality 4.0 conceptualization and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study.** The TQM Journal, Vol. 34, No. 5, p. 1169-1188. 2021. doi: 10.1108/TQM-07-2021-0215.

ASIF, M. **Are QM models aligned with Industry 4.0? A perspective on current practices.** Journal of Cleaner Production, Vol. 258, No. 10, 120820. June 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120820>.

ASQ - American Society for Quality. **Learn about quality: quality 4.0.** 2025. Disponível em: <https://asq.org/quality-resources/quality-4-0>. Acesso em: 06 jun. 2025.

ATMAJA, H., E.; HARTONO, B.; LIONORA, C. A., SIMAMORA, A. J.; SIHARIS, A. K. **Organizational factors, quality performance and competitive advantage of village-owned enterprise in Indonesia.** The TQM Journal, Vol. 37, No. 6, p. 1526–1552. 26 June 2025. <https://doi-org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1108/TQM-04-2023-0120>.

AVILÉS-SACOTO, S. V. VELASCO-TAPIA, K. C.; AVILÉS-SACOTO, E. C.; ARGUELLO-HERRERA, J. I. **Innovating for impact: proposing quality 4.0 integration to achieve sustainable development goals in microenterprises.** Business Strategy and Development, Vol. 7, No. 2. 2024. <http://dx.doi.org/10.1002/bsd2.371>.

BAJIC, B.; SUZIC, N.; MORACA, S.; STEFANOVIC, M.; JOVICIC, M. RIKALOVIC, A. **Edge computing data optimization for smart quality management: industry 5.0 perspective.** Sustainability, Vol.15, 6032. 2023. <https://doi.org/10.3390/su15076032>.

BARSALOU, M. **Root cause analysis in quality 4.0: a scoping review of current state and perspectives.** TEM Journal, Vol. 12, No. 1, p. 73-79. 2023. doi: 10.18421/TEM121-10.

BENSLIMANE, T.; BENABBOU, R.; MOUATASSIM, S.; BENHRA, J. **Understanding the relationship, trends, and integration challenges between lean manufacturing and industry 4.0. A literature review.** International Journal of Production Management and Engineering, Vol. 12, No. 2, p. 195-209. 2024. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2024.21473>.

BENZAQUEN, J.; CHARLES, V. **A stratified bootstrapping approach to assessing the success of TQM implementation in Peruvian companies.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 33, No. 1–2, p. 178–201. 2020. <https://doi-org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1080/14783363.2020.1816165>.

BIELECKI, M.; WISNIEWSKI, Z.; DIKIC, G.; DUJAC, D. **Supply Chain 4.0: what the supply chains of the future might look like.** Engineering Management in Production and Services, Vol. 16, No. 1, p. 77-92. 2024. doi: 10.2478/emj-2024-0006.

BISHT, B.; RAWAT, K.; NISHINARI, K.; VOHAT, A.; JANGID, N.; SINGH, N.; NISHINARI, K.; VLASKIN, M. S.; KURBATOVA, A.; KUMAR, V. **Industry 4.0 digital transformation: shaping the future of food quality.** Food Control, Vol. 170, 111030. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.111030>.

BLICHFELDT, H.; FAULLANT, R. **Performance effects of digital technology adoption and product & service innovation – a process-industry perspective.** Technovation, Vol. 105, 102275. July 2021. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102275>.

BOELL, S.; CECEZ-KECMANOVIC, D. **On being ‘systematic’ in literature reviews in IS.** Journal of Information Technology, Vol. 30, p. 161–173. 2015. <https://doi.org/10.1057/jit.2014.26>.

BOUSDEKIS, A.; LEPENIOTI, K.; APOSTOLOU, D.; MENTZAS, G. **Data analytics in Quality 4.0: literature review and future research directions.** International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 36, No 5, p. 678-701. 2023. doi: 10.1080/0951192X.2022.2128219.

BRODAY, E. E. **The evolution of quality: from inspection to quality 4.0.** International Journal of Quality and Services Sciences. Vol. 14, No. 3, p. 368-382. 2022. doi10.1108/IJQSS-09-2021-0121.

CARVALHO, A. V.; LIMA, T. M. (2022), **Quality 4.0 and cognitive engineering applied to quality management systems: a framework.** Appl. Syst. Innov., Vol. 5, No. 115. 2022. <https://doi.org/10.3390/asi5060115>.

CASTELO-BRANCO, I.; HENRIQUES, M. A.; JESUS, F. C.; OLIVEIRA, T. **Assessing the industry 4.0 european divide through the country/industry dichotomy.** Computers & Industrial Engineering, Vol. 176, 108925. February 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108925>.

CHANG, X.; JIA, X.; HU, H. **Energy-efficient and self-adaptive AGV scheduling approach based on hierarchical reinforcement learning for flexible shop floor.** Computers & Industrial Engineering, Vol. 205, 111140, July 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111140>.

CHIARINI, A. **Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research.** The TQM Journal, Vol. 32, No. 4, p. 603-616. 2020. doi10.1108/TQM-04-2020-0082.

CHIARINI, A.; KUMAR, M. **What is quality 4.0? An exploratory sequential mixed methods study of Italian manufacturing companies.** International Journal of Production Research, Vol. 60, No 16, p. 4890-4910. 2022. doi:10.1080/00207543.2021.1942285.

CHIARINI, A.; CHERRAFI, A. **Integrating ISO 9001 and industry 4.0. An implementation guideline and PDCA model for manufacturing sector.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 34, No 13-14, p. 1629-1654. 2023. doi: 10.1080/14783363.2023.2192916.

CROSBY, P. B. **Qualidade é investimento.** Tradução Áurea Weissenberg. 3<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: José Olympio. 1988.

DIAS, A.; CARVALHO. A. M.; SAMPAIO, P. **Quality 4.0: literature review analysis, definition and impacts of the digital transformation process on quality.** International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 39, No. 6, p. 1312-1335. 2022. doi 10.1108/ijqrm-07-2021-0247.

DELIU, D.; OLARIU, A. **The role of artificial intelligence and big data analytics in shaping the future of professions in industry 6.0: perspectives from an emerging market.** Electronics, Vol.13, 4983. 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13244983>.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design science research: método de pesquisa para o avanço da ciência e tecnologia.** Porto Alegre: Brasil. Bookman. 2015a.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; MIGUEL, P. A. C. **Uma análise distintiva entre o estudo de caso, pesquisa-ação e a design science research.** Revista Brasileira de Gestão e Negócios, São Paulo: Brasil, Vol. 17, No. 56, p. 1116-113. Abr./jun. 2015b.

DROR, S. **QFD for selecting key success factors in the implementation of quality 4.0.** Qual Reliab Engng Int., Vol. 38, p. 3216–3232. 2022. doi:10.1002/qre.3138.

DUGGALL, A., S.; MALIK, P. K.; GABA, G. S.; MASUD, M.; GEHLOT, A.; SINGH, R.; AL-AMRI, J. F. **A sequential roadmap to Industry 6.0: Exploring future manufacturing trends.** IET Communications, Vol. 16, p. 521 – 531. 2022. DOI: 10.1049/cmu2.12284.

EFIMOVA, A.; BRIS, P. **Quality 4.0 for processes and customers.** Quality Innovation Prosperity / Kvalita Inovácia Prosperita, Vol. 25, No. 3. 2021. doi: 10.12776/qip.v25i3.1609.

EFIMOVA, A.; BRIS, P.; EFIMOV, A. **A Bibliometric analysis of the evolution of six sigma in the context of Industry 4.0.** Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics, Vol. 32, No. 4, p. 338–349. 2021. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.32.4.28536>.

EL MANZANI, Y.; BELAHOUAOUI, R.; TAJOURI, O. **A textometric analysis of Quality 4.0 research.** The TQM Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. 2025. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1108/TQM-06-2024-0227>.

ESCOBAR, C. A.; CANTORAL-CEBALLOS, J. S.; MORALES-MENENDEZ, R. **Quality 4.0: learning quality control, the evolution of SQC/SPC.** Quality Engineering, Vol. 37, No. 1, p. 92-117. 2024. <http://dx.doi.org/10.1080/08982112.2024.2356519>.

ESCOBAR, C. A.; McGOVERN, M. E.; MORALES-MENENDEZ, R. **Quality 4.0: a review of big data challenges in manufacturing.** Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 32, p. 2319–2334. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01765-4>.

EUROPEAN COMMISSION. **Industry 5.0: towards more sustainable, resilient and human-centric industry.** Jan. 2021. Disponível em: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-01-07\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/industry-50-towards-more-sustainable-resilient-and-human-centric-industry-2021-01-07_en). Acesso em: 25 maio 2025.

FADILASARI, D. P.; GHATAK, R. R.; GARZA-REYES, J. A.; JOSHI, R.; KANDASAMY, J. **Adopting quality management practices in the industry 4.0 era: an investigation into the challenges.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 35, No. 9-10, p. 1098-1123. 2024. doi: [10.1080/14783363.2024.2354840](https://doi.org/10.1080/14783363.2024.2354840).

FEIGENBAUM, A. V. **Total quality control: engineering and management:** USA: McGraw-Hill. 1961.

FERNÁNDEZ-MIGUEL, A.; GARCIA-MURINA, F. E.; SETTEMBRE-BLUNDO, D.; TARANTINO, S. C., RICCARDI, M. P. **Exploring Systemic Sustainability in Manufacturing: Geoanthropology's Strategic Lens Shaping Industry 6.0.** Global Journal of Flexible Systems Management, Vol. 25, No. 3, p. 579–600. September 2024. <https://doi.org/10.1007/s40171-024-00404-0>.

FONSECA, M. L. **From quality gurus and TQM to ISO 9001:2015: review of several quality paths.** International Journal for Quality Research, Vol. 9, No. 1, p. 167–180, 2015. ISSN 1800-6450.

FULLER, A.; FAN, Z.; DAY, C.; BARLOW, C. **Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research.** IEEE Access, 8, p. 108952–108971. 2020. doi [10.1109/ACCESS.2020.2998358](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358).

GARVIN, D. A. **What does “product quality” really mean?** Sloan Management Review, Harvard University, p. 25-43. 1984.

GLOGOVAC, M; RUSO, J.; MARICIC, M. **ISO 9004 maturity model for quality in industry 4.0.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 33, No. 5, p. 529-547. 2022. doi:10.1080/14783363.2020.1865793.

GOBENA, S. T.; WOLDEYOHANNES, D. A. **Comparative review on the application of smart material in additive manufacturing: 3D and 4D printing.** Discover Applied Sciences, Vol. 6, No. 7, p. 353. 2024. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05999-8>.

GOVARDHAN, S.; NARKHEDE, B. E.; RAUT, R. D.; ZHANG, L. L.; GHOSHAL, S. **Significance of Industry 4.0 in achieving sustainable performance across supply chains—a research perspective.** Business Strategy & Development, Vol. 8, No 1, e70064. 2025. <https://doi.org/10.1002/bsd2.70064>.

GUNASEKARAN, A.; SUBRAMANIAN, N.; NGAI, W. T. E. **Quality management in the 21st century enterprises: research pathway towards industry 4.0.** International Journal of Production Economics, Vol. 207, p. 125-129. January 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.005>.

HASSOUN, A.; JAGTAP, S.; GARCIA-GARCIA, G.; TROLLMAN, H.; PATEIRO, M.; LOURENZO, J. M.; TRIF, M.; RUSU, A. V.; AADIL, R. M. SIMAT, V. CROPTOVA, J.; CÂMARA, J. S. **Food quality 4.0: from traditional approaches to digitalized automated analysis.** Journal of Food Engineering, Vol. 337, 111216. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111216>.

HE, L. **Industry 4.0 oriented distributed infographic design.** Mobile Information Systems, Issue 1, 4743216. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4743216>.

HEVNER, A.R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. **Design science in Information Systems Research.** MIS Quarterly, Vol. 28, No.1, p. 75-105. Mar. 2004. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.2307/25148625>.

HEVNER, A.; CHATTERJEE, S. **Design science in information system: theory and practice.** USA: Springer. 2010.

HO, P. T.; ALBAJEZ, J. A.; SANTOLARIA, J.; YAGUE-FABRA, J. A. **Study of augmented reality based manufacturing for further integration of Quality Control 4.0: a systematic literature review.** Appl. Sci., Vol. 12, No. 4. 2022. <https://doi.org/10.3390/app12041961>.

HOLMSTROM, J.; KETOKIVI, M.; HAMERI, P. A. **Bridging practice and theory: a design science approach.** Decision Sciences, Vol. 40, No. 1. February 2009. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1111/j.1540-5915.2008.00221.x>.

HOR, C. L.; CROSSLEY, P. A. **Extracting knowledge from substations for decision support.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2. April 2005. doi: 10.1109/TPWRD.2004.838515.

HUANG, Z.; SHAHZADI, A., KHAN, Y. D. **Unfolding the impact of Quality 4.0 practices on Industry 4.0 and circular economy practices: a hybrid SEM-ANN approach.** Sustainability, Vol. 14 No. 23. 2022. <https://doi.org/10.3390/su142315495>.

ISHIKAWA, K. **TQC - Total Quality Control: estratégia e administração da qualidade.** Trad. Mário Mishimura. São Paulo: IMC, 1986.

JAVAID, M.; HALEEM, A.; SINGH, R. P.; SUMAN, R. **Significance of Quality 4.0 towards comprehensive enhancement in manufacturing sector.** Sensors International, Vol. 2, 100109, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100109>.

JOHNSON, S. **Quality 4.0: a trend within a trend.** Quality Magazine. Feb. 2019. Disponível em: <https://www.qualitymag.com/publications/3/editions/1370>. Acesso em: 27 maio 25.

JOKOVIC, Z.; JANKOVIC, G.; SUPUROVIC, A.; MAISTOROVIC, V. **Quality 4.0 in digital manufacturing – example of good practice.** Quality Innovation Prosperity / Kvalita Inovácia Prosperita, Vol. 27, No. 2. 2023. doi:10.12776/QIP.V27I2.1870.

JURAN, J. M. **Quality control handbook.** 3<sup>rd</sup>. ed., USA: McGraw-Hill. 1979.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. **Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives.** Process Safety and Environmental Protection, Vol. 117, p. 408–425. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>.

KARBEKOVA, A. B.; MAKHKAMOVA, S. G.; INKOVA, N. A.; PAKHOMOVA, O. K. **Automation based on datasets and AI of corporate accounting and sustainability reporting in quality management in industry 4.0.** Proceedings on Engineering Sciences, Vol. 5, No. S2, p. 265-278, 2023. doi:10.24874/PES.SI.02.007.

KHAN, M. I.; ASIF, M.; YASMEEN, T.; FAROOQ, M.; KHAN, M.; HADI, N. U.; AL-GHAMDI, S. G. **Integrating industry 4.0 for enhanced sustainability: pathways and prospects.** Sustainable Production and Consumption, Vol. 54, p.149–189. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>.

KHAN, W. Z.; REHMAN, M. H.; ZANGOTI, H.M.; AFZAL, M. K. ARMI, N.; SALAH, K. **Industrial internet of things: recent advances, enabling technologies and open challenges.** Computers and Electrical Engineering, Vol. 81, 106522. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>.

KHASAWNEH, M. A.; DWEIRI, F. **Analyzing the digital infrastructure enabling project management success: a hybrid FAHP-FTOPSIS approach.** Appl. Sci., Vol. 14, No. 17. 2024. <https://doi.org/10.3390/app14178080>.

KUMAR, R. R.; GANESH, L. S.; RAJJENDRAN, C. **Quality 4.0 – a review of and framework for quality management in the digital era.** International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 39, No. 6, p. 1385-1411. 2022. doi 10.1108/IJQRM-05-2021-0150.

LEBERRUYER, N.; BRUSH, J.; AHSKOG, M.; AFSHAR, S. **Toward zero defect manufacturing with the support of artificial intelligence—insights from an industrial application.** Computers in Industry, Vol. 147, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103877>.

- LEZI, M.; LAZOI, M.; CORALLO, A. **Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: a reference framework**. Computers in Industry, Vol. 103, p. 97–110. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.004>.
- LI, S.; ZHENG, P.; LIU, S.; WANG, Z.; WANG, X. V.; ZHENG, L.; WANG, L. **Proactive human–robot collaboration: mutual-cognitive, predictable, and self-organising perspectives**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 81, 102510, June 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102510>.
- LIU, H. C.; LIU, R.; GU, X. Z.; YANG, M. Y. **From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda**. Frontiers of Engineering Management, Vol. 10, No. 2, p. 191-205. 2023. <https://doi.org/10.1007/s42524-022-0243-z>.
- LONGO, F.; PADOVANO, A.; UMBRELLO, S. **Value-Oriented and ethical technology engineering in Industry 5.0: a human-centric perspective for the design of the factory of the future**. Appl. Sci., Vol. 10, No. 12. 2020. doi:10.3390/app10124182.
- LONGO, F.; NICOLETTI, L.; PADOVANO, A. **Smart operators in industry 4.0: a human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context**. Computers & Industrial Engineering, Vol. 113, p. 144–159. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.016>.
- LYNN, R.; HELU, M.; SATI, M.; TUCKER, T.; KURFESS, T. **The Sstate of integrated CAM/CNC control systems: prior developments and the path towards a smarter CNC**. Smart Sustain Manuf Syst., Vol. 4, No. 2. Jul 2020. doi: 10.1520/SSMS20190046.
- MAHIN, M.; KADASH, N.; ALSABBAN, A.; ALBLIWI, S. **Exploring the landscape of quality 4.0: a comprehensive review of its benefits, challenges, and critical success factors**. Production & Manufacturing Research, Vol. 12, No. 1. 2024. doi: 10.1080/21693277.2024.2373739.
- MALJUGIC, B.; COCKALO, D.; BAKATOR, M.; STANISAYLIEV, S. **The role of the quality management process within Society 5.0**, Societies, Vol. 14, No. 7, 111. 2024. <https://doi.org/10.3390/soc14070111>.
- MARINAGI, C., REKLITIS, P.; TRIVELLAS, P.; SAKAS, D. **The impact of Industry 4.0 technologies on key performance indicators for a resilient Supply Chain 4.0**. Sustainability – Basel, Vol. 15, ed. 6, 5185. 2023.. doi:10.3390/su15065185.
- MARKATOS, N. G.; MOUSAVI, A. **Manufacturing quality assessment in the industry 4.0 era: a review**. Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 34, No. 13-14, p. 1655-1681. 2023. doi: 10.1080/14783363.2023.2194524.
- MARTELL, F.; LOPEZ, J. M.; SANCHEZ, I. Y.; PAREDES, C. A.; PISANO, E. **Evaluation of the degree of automation and digitalization using a diagnostic and analysis tool for a methodological implementation of Industry 4.0**.

Computers & Industrial Engineering, Vol. 177. 2023.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109097>.

MARTIN-GOMEZ, A. M.; AGOTE-GARRIDO, A.; LAMA-RUIZ, J. R. **A framework for sustainable manufacturing: integrating Industry 4.0 technologies with Industry 5.0 values**. Sustainability, Vol. 16, No. 4, 1364. 2024.  
<https://doi.org/10.3390/su16041364>.

MASON, S.; FRICK, L.; CASTELLÓ, M.; CHENG, W.; CHONG, S. W.; VILLALBA, L. D.; GARCIA-MORANTE, M.; KONG, M. S.; SAKURAI, Y.; SPRONKEN-SMITH, R.; WEISE, C. **What makes a thesis by publication? An international study of policy requirements and restrictions**. Journal of Higher Education Policy and Management, Vol. 47, No. 1, p. 57-72. 2025. doi: 10.1080/1360080X.2024.2389357.

MASOOD, T.; SONNTAG, P. **Industry 4.0: adoption challenges and benefits for SMEs**. Computers in Industry, Vol. 121, 103261. 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>.

McKINLAY, A.; WILSON, J. **All they lose is the scream': Foucault, Ford and mass production**. Management & Organizational History, Vol. 7, No. 1, p. 45–60. 2012.  
<https://doi-org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1177/1744935911427219>.

MEHTA, A. M.; RAUF, A.; SENATHIRAJAH, A. R. B. S. **Achieving world class manufacturing excellence: integrating human factors and technological innovation**. Sustainability, Vol. 16, No. 24, 11175. 2024.  
<https://doi.org/10.3390/su162411175>.

MIHAI, S.; YAQOOB. M.; HUNG, D. V.; DAVIS, W.; TOWAKEL, P.; RAZA, M.; KARAMANOGLU, M.; BARN, B.; SHETVE, D.; PRASAD, R. V.; VENKATARAMAN, H.; TRESTIAN, R.; NUGYEN, H. X. **Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 24, No. 4, Fourth Quarter 2022.  
doi: 10.1109/COMST.2022.3208773.

MOHAN, R. T.; PREETHA, R. J.; ANNIE, A. R.; DEVARAJ, D., UMACHANDRAN, K. **Intelligent machine learning based total productive maintenance approach for achieving zero downtime in industrial machinery**. Computers & Industrial Engineering, Vol.157, 107267. July 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107267>.

MTOTYWA, M. M. **Developing a quality 4.0 maturity index for improved business operational efficiency and performance**. Quality Innovation Prosperity / Kvalita Inovácia Prosperita, Vol. 26, No. 2. 2022. doi: 10.12776/QIP.V26I2.1718.

NASCIMENTO, D. L. M.; ALENCASTRO, V.; QUELHAS, O. L. G.; CAIADO, R. G. G.; GARZA-REIS, J. A.; ROCHA-LONA, L.; TORTORELLA, G. **Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal**. Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 30, No. 3, p. 607-627. 2019. doi 10.1108/JMTM-03-2018-0071.

NAVARRO, G. T.; BAYONA, J. A. **Del paradigma de calidad total a calidad 5.0: una revisión de literatura para el sector manufacturero.** Revista De Ciencias Sociales-RCS, Vol. XXX, Número Especial 10, p. 551-566. 2024.

NENADÁL, J.; VYKYDAL, D.; HALFAROVÁ, P.; TYLECHOVÁ, E. **Quality 4.0 maturity assessment in light of the current situation in the Czech Republic.** Sustainability, Vol. 14, 7519. 2022. <https://doi.org/10.3390/su14127519>.

NGUYEN, T. A. V.; TUCEK, D.; PHAM, N. T.; NGUYEN, K. H. **Quality 4.0 practices toward sustainable excellence in the manufacturing sector.** Total Quality Management and Business Excellence, Vol. 35, No. 13-14, p. 1593–1610. 2024. doi: 10.1080/14783363.2024.2383616.

OLIVEIRA, D.; ALVELOS, H.; ROSA, M. J. **Quality 4.0: results from a systematic literature review.** The TQM Journal, Vol. 37, No. 2, p. 379-456. 2025. <https://doi.org/10.1108/TQM-01-2023-0018>.

PANDEY, S., CHAUDHARY, M.; TÓTH, Z. **An investigation on real-time insights: enhancing process control with IoT-enabled sensor networks.** Discover Internet of Things, Vol. 5, No. 29. 2025. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00124-6>.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. **Design Science Research methodology for information systems research.** Journal of Management Information Systems, Vol. 24, No. 3, p. 45-77. 2007. <http://dx.doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.

PICCAROZZI, M.; SILVESTRI, L.; SILVESTRI, C.; RUGGIERI, A. **A roadmap to Industry 5.0: enabling technologies, challenges, and opportunities towards a holistic definition in management studies.** Technological Forecasting & Social Change, Vol. 205, 123467. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123467>.

PRASHAR, A. **Quality management in industry 4.0 environment: a morphological analysis and research agenda.** International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 40, No. 3, p. 863-885. 2023. doi 10.1108/IJQRM-10-2021-0348.

PRISMA. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses.** 2025. Disponível em: <http://www.prisma-statement.org>. Acesso em 21 jun. 2025.

PSAROMMATIS, F.; AZAMFIREI, V. **Zero defect manufacturing: a complete guide for advanced and sustainable quality management.** Journal of Manufacturing Systems, Vol. 77, p. 764-779. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.022>.

OKS, S. J.; JALOWSKI, M.; LECHNER, M.; MIRSCHBERGER, S.; MERKLEIN, M.; VOGEL-HEUSER, B.; MOSLEIN, K. M. **Cyber-Physical Systems in the context of Industry 4.0: a review, categorization and outlook.** Information Systems Frontiers, Vol. 26, p. 1731–1772. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x>.

ONG, K.; THE S. Y.; SOH, K. L. CHONG, Z. L.; KHOO, M. B. C. **Optimal Design of S2 -EWMA control chart with estimated parameters based on median run length and expected median run length.** Quality and Reliability Engineering International, Vol. 41, Issue 4, p. 1495-1532. June 2025. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1002/qre.3731>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development.** United Nations. 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 01 maio 2025.

RICK, M De.; VERSTEYHE, M.; DEBROUWERE, F. **Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques.** Journal of Manufacturing Systems, Vol. 54, p. 152-173. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.002>.

RICO, J. P.; CALVO-MORA; A.; MEDINA-MOLINA, C.; ALVES, H. **Quality 4.0 social and strategic readiness factors: sufficient and necessary condition analysis.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 35, No. 5-6, p. 559-583. 2024. <http://dx.doi.org/10.1080/14783363.2024.2323185>.

RIFQI, H.; ZAMA, A.; SOUDA, S. S.; HANSALI, M. **Positive effect of Industry 4.0 on quality and operations management.** iJOE – Vol. 17, No. 09. 2021. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i09.24717>

ROGALA, P.; BRZOZOWSKI, T.; PANKOWSKA, M. B. **Insights into quality professionals' adoption of Quality 4.0 in the high-tech industry.** TQM Journal, Vol. 36, No. 9, p. 193-214. 2024. doi: 10.1108/TQM-08-2023-0263.

ROGALA, P.; WAWAK, S. **Quality of the ISO 9000 series of standards-perceptions of quality management experts.** International Journal of Quality and Service Sciences, Vol. 13, No. 4, p. 509-525. 2021. doi 10.1108/IJQSS-04-2020-0065.

ROWLANDS, H.; MILLIGAN, S.; **Chapter 1: Quality-driven Industry 4.0.** Key Challenges and Opportunities for Quality, Sustainability and Innovation in the Fourth Industrial Revolution. p. 3-30. January 2021. [https://doi.org/10.1142/9789811230356\\_0001](https://doi.org/10.1142/9789811230356_0001).

SADER, S.; HUSTI, I.; DARÓCZI, M. **A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges.** Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 33, No. 9-10, p. 1164-1182. 2022. doi 10.1080/14783363.2021.1944082.

SAEED, A.; KHAN, M. A.; AKRAM, U.; OBIDALLAH, W. J.; JAWED, S.; AHMAD A. **Deep learning based approaches for intelligent industrial machinery health management and fault diagnosis in resource-constrained environments.** Sci Rep, Vol. 15, 1114. 2025. <https://doi.org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-024-79151-2>.

SALIMBENI, S.; REDCHUKB, A.; ROUSSERIE, H. **Quality 4.0: technologies and readiness factors in the entire value flow life cycle.** Production & Manufacturing Research, Vol. 11, No. 1. 2023. <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2238797>.

SANTHI, A. R.; MUTHUSWAMY, P. **Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies.** International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Vol. 17, p. 947–979. 2023. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01217-8>.

SARKER, T. R.; DUNSTON, J. K. **Implementation of Quality 4.0, a systematic review of approaches, root causes, and challenges.** Quality Engineering. 2024. doi: 10.1080/08982112.2024.2373360.

SCHMIDT, M. C.; VEILEA, J. W.; MULLER, J. M.; VOIGT, K. I. **Industry 4.0 implementation in the supply chain: a review on the evolution of buyer-supplier relationships.** International Journal of Production Research, Vol. 61, No. 17, p. 6063-6080. 2023. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2120923>.

SINGH, J.; AHUJA, I. P. S.; SINGH, H.; SINGH, A. **Development and implementation of autonomous quality management system (AQMS) in an automotive manufacturing using Quality 4.0 concept - a case study.** Computers & Industrial Engineering, Vol. 168, 108121. Jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2022.108121>.

SINGH, M., FUENMAYOR, E., HINCHY, E. P., QIAU, Y., MURRAY, N.; DEVINE, D. **Digital Twin: origin to future.** Applied System Innovation, Vol. 4, No 2, 36. 2021. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>.

SILVA, A. C.; MACHADO, J.; SAMPAIO, P. **Predictive quality model for customer defects.** The TQM Journal, Vol. 36, No. 9, p. 155-174, 1754-2731. 2024. doi 10.1108/TQM-09-2023-0302.

SOLLI, K.; NYGAARD, L. P. **The doctorate in pieces: a scoping review of research on the PhD thesis by publication.** Higher Education Research & Development, Vol. 42, No. 4, p. 984-999. 2023. doi: 10.1080/07294360.2022.2110575.

SONY, M.; ANTONY, J.; DOUGLAS, J. A; McDERMOTT, O. **Motivations, barriers and readiness factors for Quality 4.0 implementation: an exploratory study.** The TQM Journal, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. 2021. doi:10.1108/TQM-11-2020-0272.

SONY, M.; ANTONY, J.; DOUGLAS, A. J. **Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: a narrative review of literature and future directions for research.** The TQM Journal, Vol. 32, No. 4, p. 779-793. 2020. doi 10.1108/TQM-12-2019-0275.

SOUZA, F. F.; CORSI, A.; PAGANI, R. N.; BALBINOTTI, G.; KOVALESKI, J. L. **Total quality management 4.0: adapting quality management to Industry4.0.** The TQM Journal, Vol. 34, No. 4, p. 749-769, 2022. DOI 10.1108/TQM-10-2020-023.

SUNDARAM, S.; ZEID, A. **Artificial intelligence-based smart quality inspection for manufacturing**. *Micromachines*. Vol. 4, No. 3, p. 570. 2023. <https://doi.org/10.3390/mi14030570>.

SUTOOVÁ, A.; SOOS, L.; KÓCA, F. **Learning needs determination for Industry 4.0 maturity development in automotive organisations in Slovakia**. *Quality Innovation Prosperity /Kvalita Inovacia Prosperita*, Vol. 24, No. 3. 2020. doi: 10.12776/QIP.V24I3.1521.

TAMBARE, P.; MESHRAM, C.; LEE, C. C.; RAMTEKE, R. J.; IMOIZE, A. L. **Performance measurement system and quality management in data-driven Industry 4.0: a review**. *Sensors*, Vol. 22, No. 224. 2022. <https://doi.org/10.3390/s22010224>.

TEWARY, A.; JADON, V. **Building a competent workforce in implementing Quality 4.0: a systematic literature review and proposed agenda for future research**. *The TQM Journal*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. 2023. <https://doi.org/10.1108/TQM-03-2023-0070>.

TSAROUHAS, P. PAPAEVANGELOU, N. **Critical steps and conditions to be included in a business model in logistics, seeking competitive advantage from the perspective of the modern digital age and industry 4.0**. *Appl. Sci.*, Vol. 14, No. 7. 2024. <https://doi.org/10.3390/app14072701>.

UDO, W.; MUHAMMAD, Y. **Data-driven predictive maintenance of wind turbine based on SCADA data**. In *IEEE Access*, Vol. 9, p. 162370-162388, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3132684.

VAN AKEN, J. E. **Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules**. *Journal of Management Studies*, Vol. 4, No. 2. 0022-2380. March 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x>.

VLAD, F.; SEVERIN, I. **Management through process in SMEs using quality 4.0**. Technical University of Cluj-Napoca. *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, Vol. 65, Issue Special IV. 2022.

VERHOEF, P.; BROEKHUIZENA, T.; BARTB, Y.; BHATTACHARYAA, A.; DONGA, J. Q.; FABIANA, N.; HAENLEINC, M. **Digital transformation: a multidisciplinary reflection and research agenda**. *Journal of Business Research*, Vol. 122, p. 889–901. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.022>.

VERMA, P.; SANGLE, P. S. **Role of digital transformation in inspection and certification**. In: Bhatnagar, A., Yadav, S., Achanta, V., Harmes-Liedtke, U., Rab, S. (eds) *Handbook of Quality System, Accreditation and Conformity Assessment*. Springer, Singapore. 2024. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-5750-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-97-5750-3_28).

VIRMANI, N.; SALVE, U. R.; KUMAR, A.; LUTHRA, S. **Analyzing roadblocks of Industry 4.0 adoption using graph theory and matrix approach**. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 70, No. 2, p. 454-463. Feb. 2023. doi: 10.1109/TEM.2020.3048554.

VUKICEVIC, A. M.; DJAPAN, M.; TODOROVIC, P.; ERI, M.; STEFANOVIC, M.; MACUZIC, I. **Decision support system for dimensional inspection of extruded rubber profiles**. IEEE Access, Vol. 7, p. 12605 – 112616. 2019.

WAN, J.; YI, M.; LI, D.; ZHANG, C.; WANG, S.; ZHOU, K. **Mobile services for customization manufacturing systems: an example of Industry 4.0**. IEEE Access, Vol. 4. 2016. doi:10.1109/access.2016.2631152.

WAN, X., LIU, J. **Human-computer interaction strategies to alleviate information overload in business contexts**. International Journal of Human-Computer Interaction, 1-14. 2025. <https://doi.org/10.1080/10447318.2025.2470296>.

WEI J.; SHEN, Y. **Impact and mechanism of digital transformation on performance in manufacturing firms**. Innovation and Green Development Vol. 4, Issue 1, 100205. February 2025. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2025.100205>.

YOUSEF, N.; SATA, A.; SHUKLA, M.; JARBOUI, S.; MOBARSA, D. **Blockchain-integrated IoT device for advanced inspection of casting defects**. Sci Rep, Vol. 15, 5300. 2025. <https://doi-org.ez346.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-025-86777-3>.

ZHENG, K. X.; DENG, Y.J.; ZHANG, M. AND HE, Z. **Leadership for quality 4.0: development and validation of a multidimensional measure**. Total Quality Management & Business Excellence. Vol. 35, No. 11-12, p. 1233-1254. 2024. <https://doi.org/10.1080/14783363.2024.2365863>.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. **Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: a review**. Engineering, Vol. 3, p. 616–630. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>.

ZONNENSHAIN, A; KENNET, R. S. **Quality 4.0- the challenging future of quality engineering**. Quality Engineering, Vol. 32, No. 4, p. 614-626. 2020. doi:10.1080/08982112.2019.1706744.

ZULFIQAR, M.; ANTONY, J.; SWARNAKAR, V.; SONY, M.; JAYARAMAN, R.; McDERMOTT, O. **A readiness assessment of Quality 4.0 in packaging companies: an empirical investigation**. Total Quality Management & Business Excellence, Vol. 34, No. 11-12, p. 1334-1352. 2023. doi:10.1080/14783363.2023.2170223.

ZUPIC, I.; CATER, T. **Bibliometric methods in management and organization**. Organizational Research Methods, Vol. 18, Issue 3, p. 429-472. July 2015. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DO ARTEFATO

### Avaliação e melhorias pelo usuário do software

Quanto ao uso do software como considera seu desempenho:

Legenda:

DT= Discordo Totalmente DP= Discordo Parcialmente I= Indiferente

CP= Concordo Parcialmente CT= Concordo Totalmente

Q#	Descrição	DT	DP	I	CP	CT
Q1	O software é fácil de manusear, telas apresentadas de forma amigável, atraente e de fácil compreensão					
Q2	O controle do software facilita a operação, incluindo retorno para correções					
Q3	Apresenta ausência de falhas ou travas durante o uso					
Q4	O software executa suas funções de modo satisfatório e adequado					
Q5	Os botões, ícones ou comandos são suficientes					
Q6	As questões são fáceis de responder, mantendo atenção e interesse do respondente					
Q7	Apresentação do indicador QD gerado pelo software é de fácil análise e entendimento					
Q8	Considera o indicador QD importante para a estratégia e tomada de decisão					
Q9	O software atende suas expectativas ou gera benefícios					
Q10	Recomenda o uso do software para outras empresas					
Questões livres:	Espaço para recomendações, ajustes, melhorias, descrição de problemas que experimentou ou constatações diversas que gostaria de relatar					
	O software aumentou sua compreensão sobre a Qualidade 4.0? Poderia detalhar sua percepção?					
	O que destacaria referente a geração de conhecimento sobre Qualidade 4.0 com uso do software?					

## APÊNDICE B – COMITÊ DE ÉTICA

UNIVERSIDADE PAULISTA -  
UNIP



### PARECER CONSUSTANCIADO DO CEP

#### DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

**Título da Pesquisa:** *Desafios e benefícios da qualidade 4.0: como as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 podem contribuir para a melhoria da qualidade.*

**Pesquisador:** Saulo Ferraz Junior

**Área Temática:**

**Verão:** 1

**CAAE:** 82206324.6.0000.5512

**Instituição Proponente:** ASSOCIAÇÃO UNIFICADA PAULISTA DE ENSINO RENOVADO OBJETIVO-

**Patrocinador Principal:** Financiamento Próprio

#### DADOS DO PARECER

**Número do Parecer:** 7.050.993

#### Apresentação do Projeto:

As informações elencadas nos campos *Apresentação do projeto*, *Objetivo da pesquisa* e *Avaliação dos riscos e benefícios*, foram retiradas do arquivo *Informações Básicas da Pesquisa (PB\_INFORMACOES\_BASICAS\_DO\_PROJETO\_2366667.pdf* de 09/08/2024) e/ou do Projeto Detalhado (*Proj\_Pesquisa\_Comite\_Etica\_UNIP\_SauloFerraz.Jr.docx* de 20/07/2024).

#### Resumo:

A Indústria 4.0 (I4.0) apoiada pela Qualidade 4.0 (Q4.0) representa nova era de transformação nas organizações. Pretende melhorar o desempenho organizacional, reduzir custos e elevar a satisfação do cliente. O objetivo deste trabalho é investigar os desafios e benefícios da implementação da Q4.0 nas empresas industriais com uso das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 para contribuir à melhoria da qualidade. O método de pesquisa a ser utilizado será a estratégia Delphi composta por especialistas a nível de gestores de Supervisão, Gerência ou Diretoria, Acadêmicos e Empresários. Os cenários a serem avaliados pelos especialistas foram identificados no artigo *Challenges and benefits of quality 4.0 in Industrial organisations: systematic literature review and research agenda*, submetido a publicação que comporá parte da Tese. O artigo serve de base à compreensão da situação atual da Q4.0 nas organizações industriais. A análise e categorização dos achados de pesquisa mostram os pontos a desenvolver: (a) fatores de prontidão e maturidade à implementação; (b) papel da liderança e

Endereço: Rue Dr. Bocca, 1212 4º andar

Bairro: Vila Clementino

CEP: 04.026-002

UF: SP

Município: SÃO PAULO

Telefone: (11)5555-4068

E-mail: cep@unip.br

Continuação do Parecer: T.050.993

pessoas; (c) identificação das vantagens do emprego de técnicas digitais; transição do atual Sistema de Gestão da Qualidade-SGQ para Q4.0 e (d) identificação de modelos para implementação. A análise das lacunas de investigação serve a uma agenda futura de pesquisa para auxiliar a concentrar esforços e recursos. Diante da importância que os autores pesquisados direcionaram a *“Prontidão das empresas à implementação da Q4.0”*, essa lacuna será interesse da Tese.

Hipótese:

- Q1) Quais são os desafios e benefícios da implementação da Q4.0?  
 Q2) Como as tecnologias habilitadoras da 4.0 podem contribuir para a transição digital à Q4.0?

Metodologia Proposta:

O método de pesquisa tem por finalidade estabelecer o procedimento adotado para a pesquisa para permitir estabelecer critérios de planejamento das etapas e dos recursos necessários à sua aplicação. Desse modo, assegurar o rigor científico e sua repetibilidade, minimizando a possibilidade de ocorrência de vício de pesquisa que possa invalidar ou colocar em dúvida a confiabilidade do resultado obtido.

O método desta pesquisa está planejado de forma a discutir e levantar opiniões de especialistas da qualidade quanto a visão futura de cenários possíveis à implementação de um modelo Q4.0 mais adequado. Assim, por tratar-se de tema emergente, de recente interesse pela academia, poucas implementações abrangentes pelas organizações, além de lidar com problema complexo e multidisciplinar, optou-se pela estratégia de pesquisa pelo método Delphi. Pretende-se com sua aplicação o esclarecimento e aprofundamento de questões relacionadas à identificação dos desafios e benefícios da Q4.0 nas organizações industriais. Por meio da indicação de concordâncias e discordâncias e o direcionamento ao consenso sobre o tema, explicitadas pelos participantes do Delphi, prover base fundamentada para geração de conhecimento e tomada de decisão sobre os efeitos potenciais da implementação da Q4.0.

O grupo Delphi será composto por seis a quinze participantes especialistas que exerçam funções ou responsabilidade em organizações industriais, nas áreas da qualidade, produção, tecnologia da informação, pesquisa e desenvolvimento, acadêmicos, gestores com mínimo cargo gerencial, diretores ou empresários. As sessões do Delphi (rodadas) estão planejadas em número de duas, podendo chegar a três rodadas de discussão, caso necessário. O Apêndice A - *“Categorização de temas para rodadas Delphi com Especialistas”* (disponível no Projeto de

Centro de Recursos Técnicos

Pesquisa) mostra os temas a serem apresentadas aos Especialistas para discussão nas rodadas Delphi. A aplicação do método Delphi seguirá as etapas: (a) Definição dos objetivos da aplicação do método Delphi; (b) definição dos critérios e seleção do grupo de especialistas; (c) Elaboração, validação e aplicação do questionário de discussão e (d) Análise e discussão dos resultados.

A duração estimada de pesquisa será de 04 meses ; considerando-se as rodadas de discussão mencionadas, preservando a confidencialidade do processo quanto ao anonimato dos participantes que serão apresentados identificados apenas pelo termo : Especialista 1 ; ; Especialista 2 ; e assim por diante.

Obstetron da Parceria

Chilean Primates

**Analisa os desafios e benefícios advindos da Implementação da Q4.0 em organizações industriais, desenvolvendo um roteiro de modelo de sua implementação.**

## Objective: Securing

- (a) Identificar, analisar e categorizar as características da Q4.0 e os desafios e benefícios desta para as organizações;
  - (b) Compreender necessidades e visão futura da implementação da Q4.0 nas organizações por meio da estratégia de pesquisa Delphi e;
  - (c) Propor solução / roteiro de implementação da Q4.0 às organizações industriais.

Avaliação dos Blocoos e Bensfiosos

800

Considerando que toda pesquisa oferece algum tipo de risco, nesta pesquisa ele pode ser avaliado como grau Mínimo, e esse risco pode ser explicado como eventualmente qualquer participante accidentalmente citar em seus comentários o nome de uma determinada empresa, caso ocorra, a providência a ser tomada será desconsiderar tal informação nos resultados da pesquisa.

Barriers

É esperado o seguinte benefício decorrente da participação neste trabalho, que é, caso o participante tenha interesse, pode solicitar o envio por e-mail do resultado da pesquisa.

## Comentários e Considerações sobre a Pequicar:

O projeto utiliza a estrutura de pesquisa pelo método Delphi para discutir e levantar opções.

ANSWER

Figure 1. The distribution of the number of species in the 1000 samples of 1000 individuals each.

UNIVERSIDADE PAULISTA -  
UNIP



Confidencial do Parecer: 7.088-993

de especialistas da qualidade quanto a visão futura de cenários possíveis à implementação de um modelo Q4.0. Não fere princípios éticos.

**Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

Para esta análise foram utilizados os documentos postados na lista anexa.

**Recomendações:**

**RECOMENDAÇÃO 1** - O parecer do CEP-UNIP é baseado nos textos do protocolo encaminhado pelos pesquisadores e pode conter, inclusive, trechos transcritos literalmente do projeto ou de outras partes do protocolo. Trata-se, ainda assim, de uma interpretação do protocolo. Caso algum trecho do parecer não corresponda ao que efetivamente foi proposto no protocolo, os pesquisadores devem se manifestar sobre esta discrepância. A não manifestação dos pesquisadores será interpretada como concordância com a fidelidade do texto do parecer no tocante à proposta do protocolo.

**RECOMENDAÇÃO 2** - É obrigação do pesquisador desenvolver o projeto de pesquisa em completa conformidade com a proposta apresentada ao CEP. Mudanças que venham a ser necessárias após a aprovação pelo CEP devem ser comunicadas na forma de emendas ao protocolo por meio da Plataforma Brasil.

**RECOMENDAÇÃO 3** - Os pesquisadores devem manter os arquivos de fichas, termos, dados e amostras sob sua guarda por pelo menos 5 anos após o término da pesquisa.

**RECOMENDAÇÃO 4** - Uma vez concluída a coleta de dados, é recomendado ao pesquisador responsável fazer o download dos dados coletados para um dispositivo eletrônico local, apagando todo e qualquer registro de qualquer plataforma virtual, ambiente compartilhado ou "nuvem".

**Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

Não há óbices éticos.

**Considerações Finais a critério do CEP:**

Diante do exposto, o CEP-UNIP, de acordo com as atribuições definidas na Resolução CNS n.º 466, de 2012, manifesta-se por confirmar o parecer do projeto de pesquisa como **APROVADO**, nos termos em que está proposto. Ressalta-se que cabe ao pesquisador responsável

Endereço: Rua Dr. Bresser, 1212 4º andar

Bairro: Vila Clementino

CEP: 04.026-002

UF: SP Município: SÃO PAULO

Telefone: (11)5586-4086

E-mail: cep@unip.br

UNIVERSIDADE PAULISTA -  
UNIP



Continuação do Parecer: T.060.993

encaminhar os relatórios parciais e finais da pesquisa, por meio da Plataforma Brasil, via notificação do tipo relatório, para que sejam devidamente apreciadas pelo CEP, conforme Norma Operacional CNS nr 001/12, item XI.2.d.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJECTO_2366667.pdf	09/08/2024 15:04:59		ACEITO
Outros	CARTA_APRESENTACAO20240808.pdf	09/08/2024 14:58:57	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Outros	Termo_Compromisso_pesquisador20240808.pdf	09/08/2024 14:58:12	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TermodeconsentimentoTCLE_04ago24.docx	09/08/2024 14:57:07	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Orçamento	ORÇAMENTO20240808.pdf	09/08/2024 14:56:31	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_3_3_20240719.pdf	20/07/2024 11:19:25	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_2_3_20240719.pdf	20/07/2024 11:19:13	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE_1_3_20240719.pdf	20/07/2024 11:18:40	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Orçamento	ORÇAMENTO20240719.pdf	20/07/2024 11:16:28	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Outros	TERMO_COMPROMISSO20240719.pdf	20/07/2024 11:16:11	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Declaração de concordância	CARTA_ANUENCIA20240719.pdf	20/07/2024 11:14:29	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Outros	CARTA_APRESENTACAO20240719.pdf	20/07/2024 11:14:08	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Proj_Pesquisa_Comite_Etica_UNIP_SauloFernazJr.docx	20/07/2024 11:13:00	Saulo Fernaz Junior	ACEITO
Folha de Rosto	FOLHA_ROSTO_PESQUISA20240719.pdf	20/07/2024 11:10:45	Saulo Fernaz Junior	ACEITO

Endereço: Rue Dr. Baccellar, 1212 4º andar  
Bairro: Vila Clementino  
UF: SP  
Município: SÃO PAULO  
Telefone: (11)5555-4036

CEP: 04.028-002

E-mail: cep@unip.br

UNIVERSIDADE PAULISTA -  
**UNIP**



Continuação do Parecer: 7.050.993

**Situação do Parecer:**  
Aprovado

**Не necessita Apreciação da CONEP:**  
Não

SÃO PAULO, 03 de Setembro de 2024

---

**Assinado por:**  
**Bettina Gerken Brasil**  
(Coordenador(a))

Endereço: Rue Dr. Bocca, 1212 4º andar  
Bairro: Vila Clementino  
UF: SP  
Município: SÃO PAULO  
Telefone: (11)5555-4335  
CEP: 04025-002  
E-mail: esp@unip.br

## APÊNDICE C – CERTIFICADO DE REGISTRO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
 MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS  
 INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL  
 DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

### Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: BR512025006330-0

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 13/08/2025, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

**Título:** SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE PRONTIDÃO PARA A QUALIDADE 4.0

**Data de publicação:** 13/08/2025

**Data de criação:** 06/08/2025

**Titular(es):** RODRIGO FRANCO GONÇALVES; SAULO FERRAZ JUNIOR

**Autor(es):** RODRIGO FRANCO GONÇALVES; MARCOS ANTÔNIO CAMPOS BENVENGA; SAULO FERRAZ JUNIOR

**Linguagem:** VISUAL BASIC; EXCEL

**Campo de aplicação:** AD-05; AD-06; EC-14; IN-01; IN-02

**Tipo de programa:** AP-01; FA-03; GI-04

**Algoritmo hash:** SHA-512

**Resumo digital hash:**

18BA4D0176BAE06F7E014A568C99A8995104D1D0E129E9AF8444DEFDC82CFC938990CC457A4A7A7403622718D69137378C0F A9E2C987C2CA77C48B26AFD03725

**Expedido em:** 09/12/2025

Aprovado por:  
 ERICA GUIMARAES CORREIA  
 Chefe da DIPTO