UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Donglares Aragão de Oliveira Filho

Identificação de direcionadores e proposta de um modelo para a Qualidade 4.0 através de análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso

João Pessoa
2025

Donglares Aragão de Oliveira Filho

Identificação de direcionadores e proposta de um modelo para a Qualidade 4.0 através de análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Guedes de Oliveira

João Pessoa
2025

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F488i Oliveira Filho, Donglares Aragao de.
Identificação de direcionadores e proposta de um modelo para a Qualidade 4.0 através de análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura / Donglares Aragao de Oliveira Filho. - João Pessoa, 2025.
63 f. : il.

Orientação: Lucas Guedes de Oliveira.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Qualidade 4.0. 2. Indústria 4.0. 3. Gestão da Qualidade. 4. Modelos da Qualidade 4.0. 5. Transformação Digital. 6. Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. 7. Habilidades do futuro. I. de Oliveira, Lucas Guedes. II. Título.

UFPB/BSCT CDU 658.5(043.2)

Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

Donglares Aragão de Oliveira Filho

Identificação de direcionadores e proposta de um modelo para a Qualidade 4.0 através de análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro de Produção e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

João Pessoa, 07 de Maio de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lucas Guedes de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dra. Sandra Naomi Morioka
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dra. Lígia Lobo Mesquita
Universidade Federal da Paraíba

Dedico este trabalho aos meus pais, que são a base de
todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Michele Davet, pelo seu amor incondicional e por ser exemplo em cada passo pessoal ou profissional da minha vida. Por acreditar no meu potencial e fazer o possível e o impossível para que eu atingisse meus objetivos.

Ao meu pai, Donglares Aragão, por toda atenção e disposição, fornecendo auxílio essencial durante todo esse período.

Aos meus irmãos, Julia Davet e Italo Davet, que passadas todas as brigas e discussões se tornaram grandes amigos e inspirações diárias.

A minha avó, Maria Davet, por todas as orações e velinhas queimadas, e por sempre ter sido amparo quando precisei.

Aos amigos do curso, Maria Eduarda Rezende e Jefferson Vieira, que dividiram comigo a maior parte da caminhada rumo à graduação, por todos os trabalhos em grupo e por facilitar os desafios do curso.

Aos amigos do intercâmbio, Fernanda Fernandes e Clarissa Gusmão, presentes da França na minha vida, que dividiram comigo momentos inesquecíveis e me apoiaram e apoiam continuamente, independente de onde estiverem.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da UFPB, por todo o trabalho, dedicação e orientação em todos esses anos de curso. Por entregarem o máximo de si, fazendo muito com pouco e por terem tornado o DEP um lugar inspirador e acolhedor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Lucas Guedes, por todo o auxílio e paciência durante a execução deste trabalho.

RESUMO

A transformação digital promovida pela Indústria 4.0 (I4.0) traz mudanças significativas nas formas tradicionais de gestão das organizações, sobretudo no que tange a gestão da qualidade. Nesse sentido, o conceito de Qualidade 4.0 (Q4.0) ganha força na comunidade acadêmica que direciona esforços para compreender as variáveis desse novo modelo de gestão. Assim, este trabalho tem como objetivo identificar os principais direcionadores da Q4.0 e propor um modelo conceitual que sintetize seus princípios fundamentais. Para isso adota-se uma abordagem composta por uma análise bibliométtrica e uma revisão sistemática da literatura (RSL) seguindo o protocolo PRISMA. A análise bibliométrica permitiu uma visão geral de tendências, principais fontes, países e autores mais relevantes enquanto a RSL conduziu a seleção de 46 artigos focados na proposição de modelos da Q4.0. Os resultados promovem a identificação das principais tecnologias emergentes associadas à Q4.0 bem como as principais *hard* e *soft skills* nessa nova era industrial. O trabalho também apresenta um quadro comparativo dos oito modelos da Q4.0 identificados na amostragem e propõe um modelo combinado através de uma análise crítica dos modelos existentes e das principais tendências identificadas.

Palavras-chave: Qualidade 4.0; Indústria 4.0; Gestão da Qualidade; Modelos da Qualidade 4.0; Transformação Digital; Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0; Habilidades do futuro.

ABSTRACT

The digital transformation driven by Industry 4.0 (I4.0) brings significant changes to traditional management practices within organizations, especially regarding quality management. In this context, the concept of Quality 4.0 (Q4.0) has gained strength within the academic community, which has increasingly focused efforts on understanding the variables of this new management model. Thus, this work aims to identify the main drivers of Q4.0 and propose a conceptual model that synthesizes its fundamental principles. To achieve this, the study adopts an approach composed of a bibliometric analysis and a systematic literature review (SLR) following the PRISMA protocol. The bibliometric analysis provided an overview of trends, main sources, countries, and most relevant authors, while the SLR led to the selection of 46 articles focused on proposing Q4.0 models. The results promote the identification of the main emerging technologies associated with Q4.0 as well as the key hard and soft skills required in this new industrial era. The study also presents a comparative framework of the eight Q4.0 models identified in the sample and proposes a combined model through a critical analysis of the existing models and the main trends observed.

Keywords: Quality 4.0; Industry 4.0; Quality Management; Quality 4.0 Models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As quatro revoluções industriais 16
Figura 2 – A evolução da Qualidade 18
Figura 3 – Eras da Qualidade 18

Figura 4 – Visão esquemática do método adotado 21
Figura 5 – Diagrama PRISMA para a seleção de artigos 24

Figura 6 – Mapa bibliométrico da Etapa 1 (artigos relacionados à Q4.0) em artigos da base *Scopus* 28
Figura 7 – Mapa bibliométrico da Etapa 1 (artigos relacionados à Q4.0) em artigos da base *Web of Science* 29
Figura 8 – Mapa bibliométrico da Etapa 2 (artigos relacionados à Modelos da Q4.0) em artigos da base *Scopus* 30
Figura 9 – Mapa bibliométrico da Etapa 2 (artigos relacionados à Modelos da Q4.0) em artigos da base *Web of Science* 30
Figura 10 – Nuvem de palavras da Amostra 31
Figura 11 – Distribuição Anual da Produção da Amostra 32
Figura 12 – Fontes mais frequentes na Amostra 32
Figura 13 – Autores mais frequentes na Amostra 33
Figura 14 – Publicações mais citadas na Amostra 34
Figura 15 – Países mais frequentes na Amostra 35
Figura 17 – Hard Skills mais recorrentes da amostra 39
Figura 18 – Soft Skills mais recorrentes da amostra 40
Figura 19 – Modelo 1: Os Eixos da Qualidade 4.0 42
Figura 20 – Modelo 2: Transformação Digital da Qualidade 42
Figura 21 – Modelo 3: Pilares do TQM 4.0 43
Figura 22 – Modelo 4: Um modelo teórico para a Q4.0 43
Figura 23 – Modelo 5: TQM no contexto da I4.0 44
Figura 24 – Modelo 6: As dimensões da Q4.0 45
Figura 25 – Modelo 7: Estrutura conceitual da Q4.0 45
Figura 26 – Modelo 8: Estrutura integrada da Q4.0 46
Figura 27 – Modelo 8: Estrutura integrada da Q4.0 (Expandida) 46
Figura 28 – Modelo Combinado da Q4.0 50
Figura 16 – Tecnologias mais recorrentes da amostra 51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios adotados para a seleção dos documentos para análise bibliométrica 22
Quadro 2 – Critérios adotados para a seleção dos documentos para revisão sistemática 23
Quadro 3 – Resumo da amostra de artigos selecionados através da metodologia PRISMA para a RSL 25
Quadro 4 – Resumo dos modelos da Q4.0 encontrados 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Países mais frequentes na Amostra 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AI	*Artificial Intelligence* - Inteligência Artificial
BPR	*Business Process Reengineering* - Reengenharia de processos de negócios
CC	*Cloud Computing* - Computação em Nuvem
CLP	Controlador Lógico Programável
CPS	*Cyber-Physical System* - Sistema Ciberfísico
CTQ	Controle Total da Qualidade
DMAIC	*Define, Measure, Analyze, Improve, Control* - Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar
ERP	*Enterprise Resource Planning* - Sistema integrado de gestão empresarial
I4.0	*Industry 4.0* - Indústria 4.0
IA	Inteligência Artificial
IoT	*Internet of things* - Internet das Coisas
LSS	*Lean Six Sigma*
ML	*Machine Learning* - Aprendizado de Máquina
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PRISMA	*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*
Q4.0	*Quality 4.0* - Qualidade 4.0
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
STS Theory	Teoria dos sistemas sociotécnicos
TI	Tecnologia da Informação
TQM	*Total Quality Management* - Gestão da Qualidade Total
WoS	*Web of Science*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 OBJETIVOS 14
2.1 OBJETIVO GERAL 14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
3 REFERENCIAL TEÓRICO 15
3.1 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS E INDÚSTRIA 4.0 15
3.2 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE 16
3.3 QUALIDADE 4.0 19
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 20
4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA 20
4.2 MÉTODO ADOTADO PARA A CONDUÇÃO DA PESQUISA . . . 20
4.3 BIBLIOMETRIA 21
4.4 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA 22
4.4.1 Critérios de busca e seleção dos trabalhos 23
4.5 QUESTÕES DE PESQUISA 27
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 28
5.1 VISÃO GERAL DA QUALIDADE 4.0 28
5.2 ANÁLISE DA AMOSTRA DE DOCUMENTOS SELECIONADOS PELA RSL 31
5.3 LEVANTAMENTO DAS TECNOLOGIAS, *SOFT SKILLS* E *HARD SKILLS* DA QUALIDADE 4.0 33
5.3.1 Principais tecnologias associadas ao ambiente 4.0 33
5.3.2 *Hard skills* identificadas 39
5.3.3 *Soft skills* identificadas 40
5.4 O PAPEL DAS PESSOAS NA QUALIDADE 4.0 41
5.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS ESTRUTURADOS DE QUALIDADE 4.0 42
5.6 PROPOSTA DE UM MODELO COMBINADO DA Q4.0 48
6 CONCLUSÃO 52
REFERÊNCIAS 53

1 INTRODUÇÃO

A Gestão da Qualidade sofreu várias transformações ao passar do tempo. Nesse sentido, podemos entender as fases da Gestão da Qualidade de acordo com as "Eras da Qualidade", sendo a Primeira Revolução Industrial marcada pela era da inspeção de produtos acabados (Dale, 2003). Na sequência com a Segunda Revolução Industrial e a produção em massa tem-se o início da preocupação da gestão ainda durante o processamento na era do "Controle Estatístico da Qualidade"(Dale, 2003). Após isto temos a Terceira Revolução Industrial e o surgimento das abordagens de gestão preventiva durante a fase da "Garantia da Qualidade"(Deming, 1986). Por fim, tem-se a era definida pela literatura como "Gestão da Qualidade Total"onde passa-se a ver na Qualidade uma função estratégica com o importante envolvimento de todos os níveis da empresa (Feigenbaum, 1951).

Originada na Alemanha no ano de 2011, a Quarta Revolução Industrial possibilitou a integração de tecnologias digitais avançadas com a manufatura, propiciando a interação máquina-máquina sem intervenção humana (Rodrigues; JESUS; Schützer, 2016). Esta nova fase trouxe o surgimento de tecnologias disruptivas, capazes de modificar a forma como o ser humano vive, se relaciona e trabalha, como o Big Data, a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA), cujo avanço tem o potencial de elevar os níveis de excelência das indústrias, tornando algumas tarefas anteriormente realizadas por pessoas muito mais eficientes e eficazes, transformando assim toda a dinâmica de trabalho e gestão destas empresas (Kagermann; Wahlster; Helbig *et al.*, 2013).

Nesse sentido, entende-se que a Indústria 4.0 (I4.0) traz profundas transformações na forma como a Qualidade é gerida. Essas inovações exigem uma reconfiguração dos modelos tradicionais de gestão da qualidade, dando origem ao conceito emergente de Qualidade 4.0 (Q4.0) (Zonnenshain; Kenett, 2020), que busca integrar os aprendizados das eras anteriores com as possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais. No entanto, embora o termo venha ganhando destaque na literatura, ainda há uma lacuna significativa quanto à sua sistematização e à consolidação de modelos conceituais robustos. Nesse contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de organizar e aprofundar o conhecimento sobre os direcionadores e as dimensões tecnológicas e humanas da Q4.0. Neste trabalho, consideram-se como direcionadores os elementos que promovem tanto as tecnologias quanto as competências técnicas e sociais, elementos esses frequentemente citados na literatura como aspectos relevantes do ambiente 4.0 no contexto da Qualidade (Margherita; Braccini, 2024). Ao propor uma análise bibliométrica e uma revisão sistemática da literatura, a pesquisa contribui para mapear tendências, identificar competências-chave e estruturar modelos que orientem uma gestão da qualidade mais eficaz no ambiente contemporâneo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Identificar os principais direcionadores e sugerir um modelo para a Q4.0, em termos de suas principais tecnologias associadas, aplicações específicas e em relação às novas hard skills e soft skills necessárias.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(i) Mapear os principais conceitos, abordagens e contribuições científicas recentes relacionados à Q4.0;

(ii) Explorar os termos mais associados à Q4.0 e compreender suas inter-conexões;

(iii) Investigar os modelos de Q4.0 existentes;

(iv) Identificar as tecnologias associadas à Q4.0 e suas aplicações;

(v) Identificar as competências requeridas para a implementação da Q4.0;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS E INDÚSTRIA 4.0

A primeira revolução industrial iniciou em 1760 na Europa Medieval e foi marcada pela transição do uso de métodos de produção manual em virtude da invenção do motores movidos à vapor ou água (Xu *et al.*, 2021). Essas máquinas permitiram a transição da agricultura e da sociedade feudal para um novo processo de fabricação. Esta transição incluiu o uso do carvão como principal fonte de energia ao passo que o trem era o principal meio de transporte (Xu; David; Kim *et al.*, 2018).

Na sequência, por volta de 1900, inicia a Segunda Revolução Industrial com o advento do motor à combustão interna, o que levou a uma era de rápida industrialização com o uso do petróleo e da eletricidade impulsionando a produção em massa (Xu; David; Kim *et al.*, 2018). Além disso, o sistema Taylorista com estudos de tempos e movimentos impulsionou tarefas de produção e cotas de produtividade. Assim, empresas começaram a ser capazes de gerir fábricas enormes (Chandler, 1993). Isso transformou as indústrias em modernas linhas de produção resultando em alta produtividade e um crescimento econômico significativo (Xu *et al.*, 2021).

Por sua vez, a Terceira Revolução Industrial teve início nos anos 1970 e seu início caracteriza-se pelo advento dos computadores, permitindo pela primeira vez as "customizações em massa"(Davis, 1997). Sendo assim, esta revolução empregou a eletrônica e a tecnologia da informação (TI) para alcançar maior automação dos processos de fabricação à medida que as máquinas não assumiam apenas uma parte do trabalho manual mas iniciavam a assumir também uma parte do trabalho mental (Kagermann; Wahlster; Helbig *et al.*, 2013). Desta forma, o advento do Controlador Lógico Programável (CLP) e o uso de tecnologias da comunicação no processo produtivo guiando a automação da produção caracterizam essa revolução (Xu *et al.*, 2021).

Estas três primeiras revoluções industriais surgiram a partir do resultado da mecanização, da eletricidade e da tecnologia da informação (Kagermann; Wahlster; Helbig *et al.*, 2013). A partir de agora, a introdução de novos conceitos e tecnologias digitais como IoT, Big Data, IA e Computação em Nuvem deram início a chamada Quarta Revolução Industrial ou I4.0. A I4.0 é entendida como um novo estágio industrial onde há integração entre os sistemas de fabricação, especialmente a IoT, formando os chamados Cyber-Physical Systems (CPS) (Wang; Törngren; Onori, 2015) ou sistema ciberfísico - uma tecnologia que busca o controle inteligente de sistemas produtivos através da integração de sistemas computacionais, tecnologias da comunicação e os processos físicos das entidades.

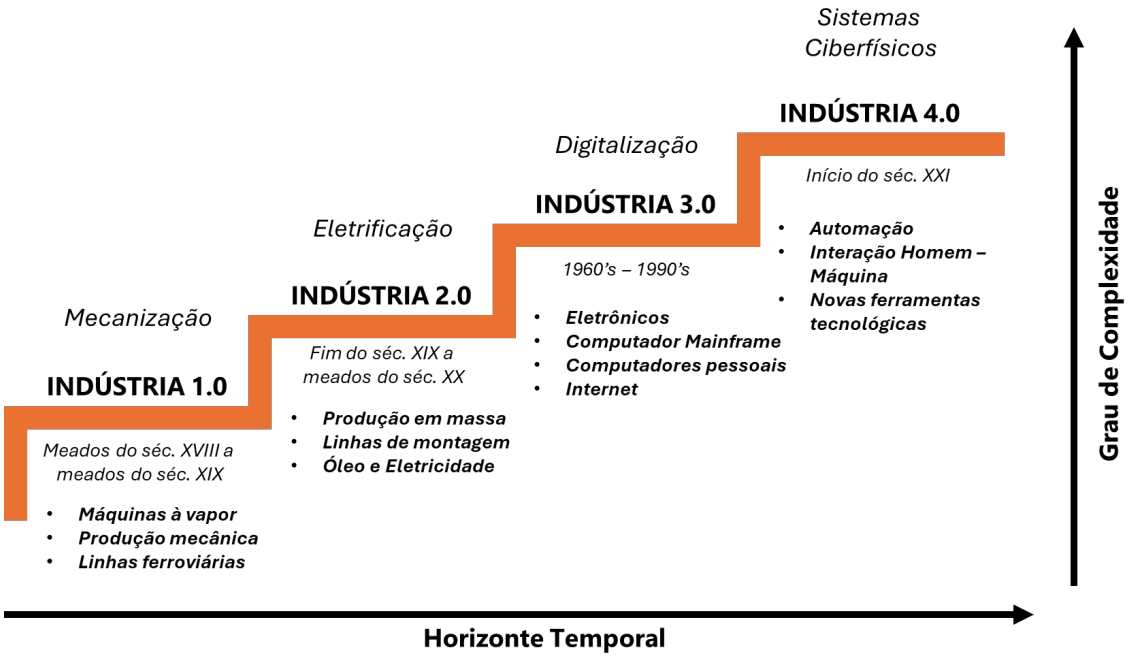
Essa nova era industrial é principalmente impulsionada pela coleta massiva de dados proveniente de sensores e dispositivos integrados à IoT, além do contínuo avanço da capacidade computacional. Esses dispositivos, são agora capazes de interagir entre si, permitindo também o monitoramento e controle remoto (Zonnenshain; Kenett, 2020;

Acharjya; Geetha, 2017). Com isso, tecnologias da informação e processos produtivos estão cada vez mais integrados, promovendo a automação e tornando a produção mais autônoma (Zonnenshain; Kenett, 2020).

Desde sua divulgação na Alemanha, em 2011, o termo "Industrie 4.0"passou a atrair a atenção de governos, empresas e pesquisadores, destacando-se pelo seu potencial de transformar digitalmente cadeias de valor. No entanto, essa mudança também traz desafios relevantes, como a possível substituição de empregos com baixa qualificação por tecnologias autônomas, ao mesmo tempo em que cria novas oportunidades em áreas como engenharia de automação, machine learning e design de sistemas de controle (Ghobakhloo, 2020). Ainda que o número de empresas que já adotam metodologias avançadas de qualidade seja relativamente pequeno, há uma forte crença no grande potencial de transformação dessas inovações na indústria (Zonnenshain; Kenett, 2020).

A Figura 1 mostra a progressão das quatro revoluções industriais e seus principais temas associados.

Figura 1 – As quatro revoluções industriais



Fonte: Adaptado de Sureshchandar (2022)

3.2 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE

A evolução e história da qualidade pode ser sintetizada de diferentes maneiras, sendo convencionalmente retratada em Eras da Qualidade. Dale (2003) divide essa evolução em cinco eras: Inspeção, Controle Estatístico da Qualidade, Garantia da Qualidade, Gestão da Qualidade Total e Gestão Estratégica da Qualidade. Já Toledo *et al.* (2012) adota uma abordagem com quatro eras: Inspeção, Controle da Qualidade do Processo, Garantia da

Qualidade e Gerenciamento Estratégico da Qualidade. Sader, Husti e Daróczi (2019), por sua vez, omitem a Era da Inspeção e incluem a Q4.0 como a quarta era da qualidade. A Figura 2 ilustra as quatro eras da qualidade conforme Sader, Husti e Daróczi (2019). A Figura 3 traz, por sua vez, a visão das cinco eras da Qualidade, incluindo a era da inspeção como a primeira e a Q4.0 como a quinta e última.

A maior motivação para as atividades de inspeção vem da inspiração provida por Frederick Taylor no início dos anos 1900, onde seus princípios da administração científica introduziram abordagens sistêmicas à produção industrial, definindo assim a Era da Inspeção, onde o controle da qualidade era basicamente associado à inspeção pós-produção para garantir os padrões dos produtos (Kanigel, 1997; Garvin, 1988).

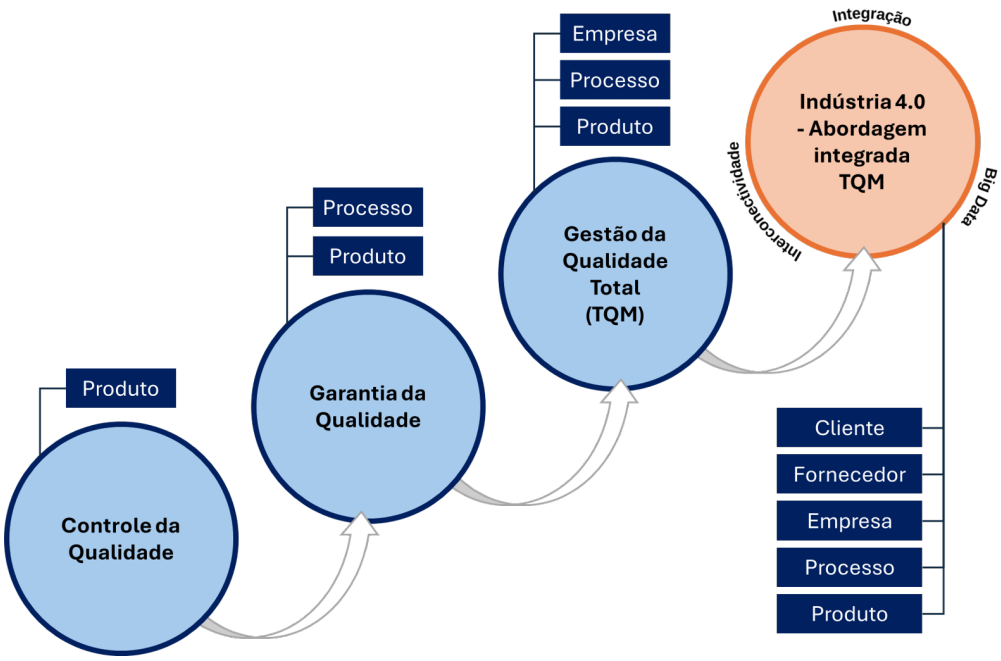
Posteriormente com o desenvolvimento do conceito de produção em massa associado à introdução do Ford T por Henry Ford, onde as indústrias passam a adotar o modelo de linhas de montagem móvel favorecendo a produção de grandes volumes de produto com baixa diferenciação (Womack, 2004), a Era do Controle Estístico da Qualidade começa a aparecer. Nessa fase, estudiosos pioneiros, como Walter A. Shewart e W. Edwards Deming trouxeram valiosas contribuições para a gestão da qualidade: Shewart desenvolveu gráficos de controle estatístico e o ciclo PDSA (Plan-Do-Study-Act) (Shewhart, 1926), que buscava a melhoria contínua e a análise dos resultados para ajustar processos. Posteriormente, Deming promoveu e popularizou a versão desse ciclo como PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Deming, 1986), durante o período pós Segunda Guerra Mundial, onde as indústrias japonesas buscavam adotar práticas de qualidade para se recuperar e melhorar a produção. Essas contribuições possibilitaram uma gestão da qualidade mais proativa e sistêmica, permitindo a detecção e correção de problemas ainda durante a produção.

Após a progressiva consolidação das práticas do Controle da Qualidade, a Era da Garantia da Qualidade, que se estendeu das décadas de 1960 e 1970, representou uma transição importante na forma como as empresas abordavam a qualidade. Agora, o foco era garantir que os processos de produção fossem coordenados de maneira eficiente, com ênfase proativa na identificação e resolução de problemas antes de chegar ao produto final. Nessa fase, a garantia da qualidade começa a ser vista como uma responsabilidade coletiva e compartilhada por todos os departamentos da organização, originando assim o conceito de Controle Total da Qualidade (CTQ) (Feigenbaum, 1951), com a alta gestão liderando o planejamento e a execução das políticas de qualidade. Sendo assim, essa era elevou a qualidade de um nível operacional em direção aos patamares mais elevados da administração da organização (Toledo *et al.*, 2012).

Finalmente, entre as décadas de 1980 e 1990, têm-se o surgimento da chamada Era do Gerenciamento Estratégico da Qualidade, era que enfatizou o impacto estratégico nas organizações. Nesse período, a qualidade começa ser vista não apenas como uma ferramenta, mas como uma possível vantagem competitiva no mercado (Crosby, 1979). A responsabilidade pela qualidade ampliou-se para toda a empresa, com a alta gerência

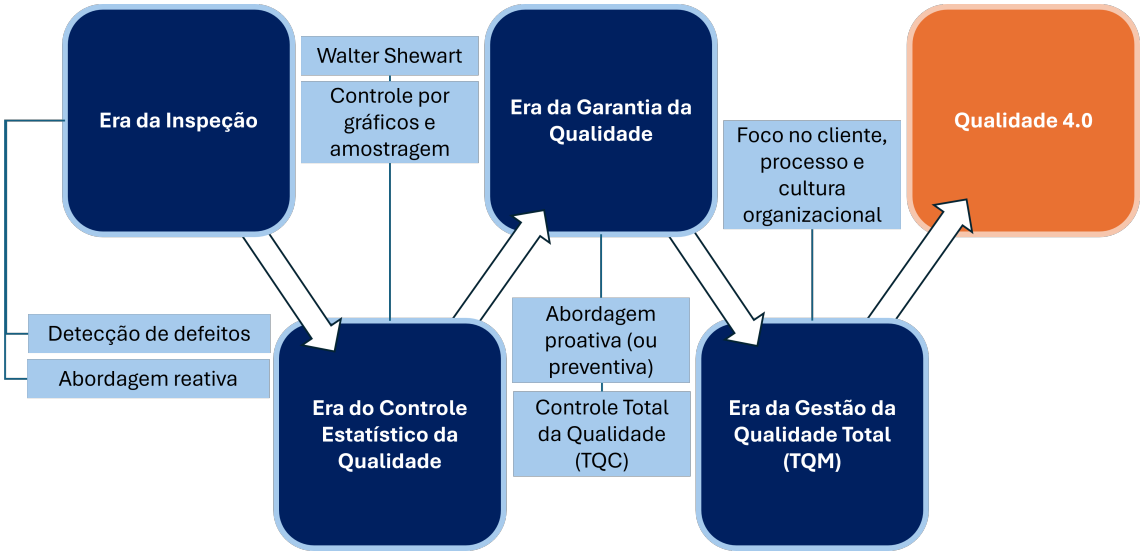
exercendo forte liderança. Além disso, a qualidade passa a ter uma abordagem mais humana, visando otimizar a organização como um todo, e não apenas as operações (Toledo *et al.*, 2012).

Figura 2 – A evolução da Qualidade



Fonte: Adaptado de Sader, Husti e Daróczi (2019)

Figura 3 – Eras da Qualidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3 QUALIDADE 4.0

Considearada por muitos como a quarta fase na evolução da qualidade, na qual as abordagens das fases anteriores são retomadas (Maganga; Taifa, 2023a; Sader; Husti; Daróczi, 2019), a Q4.0 surge como um conceito emergente no campo da gestão da qualidade e reflete as mudanças e transformações trazidas pela Quarta Revolução Industrial. Embora a discussão acerca do tema ainda esteja em estágio inicial, sendo pouco discutido na literatura, a integração de novas tecnologias, como Big Data, IoT e IA aos modelos tradicionais de gestão da qualidade se mostra um movimento essencial para a modernização desta área do conhecimento (Antony *et al.*, 2023b). O termo foi introduzido por Jacob (2017), que destaca a necessidade de adaptar os princípios da qualidade à utilização dessas tecnologias para uma gestão mais eficiente e em tempo real.

Dessa forma, a Q4.0 pode ser definida como uma evolução da gestão da qualidade, em que práticas tradicionais são ampliadas e integradas às novas tecnologias da I4.0 para melhorar o desempenho e reduzir riscos (Sader; Husti; Daroczi, 2022; Wawak; Teixeira Domingues; Sampaio, 2024). No entanto, essa abordagem não se limita à adoção de tecnologias, uma vez que os elementos culturais e humanos são essenciais para impulsionar a sua implementação e desempenho (Antony *et al.*, 2023a). Segundo Sader, Husti e Daroczi (2022), a Q4.0 transcende as tecnologias, sendo uma abordagem abrangente da gestão da qualidade, que combina as tecnologias modernas com métodos consagrados da qualidade para expandir o escopo da gestão da qualidade e aprimorar a eficiência e a eficácia das tarefas nas organizações.

Nesse contexto, alguns autores tem se dedicado a definir os princípios da Q4.0; Chiarini e Kumar (2022) por exemplo, propõem que o modelo da Q4.0 consiste em: alta gestão, coleta de dados e integração com o sistema integrado de gestão empresarial (ERP), mapeamento de processos, identificação de produtos e rastreabilidade, comunicação de dados máquina a máquina, controle de documentos, uso de software de IA e habilidades digitais para controle de qualidade.

Entre os benefícios gerados pela adoção da Q4.0, destacam-se o aumento da eficiência, inovação e desempenho da organização, ao passo que proporciona vantagens competitivas às empresas através do aumento da satisação dos consumidores, aprimoramento dos modelos de negócio e o desenvolvimento de melhores produtos e serviços (Antony; McDermott; Sony, 2022). A seguir, os principais modelos estruturados da Qualidade 4.0 identificados na literatura serão analisados na seção de revisão sistemática da literatura, conforme o protocolo PRISMA adotado nesste trabalho.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

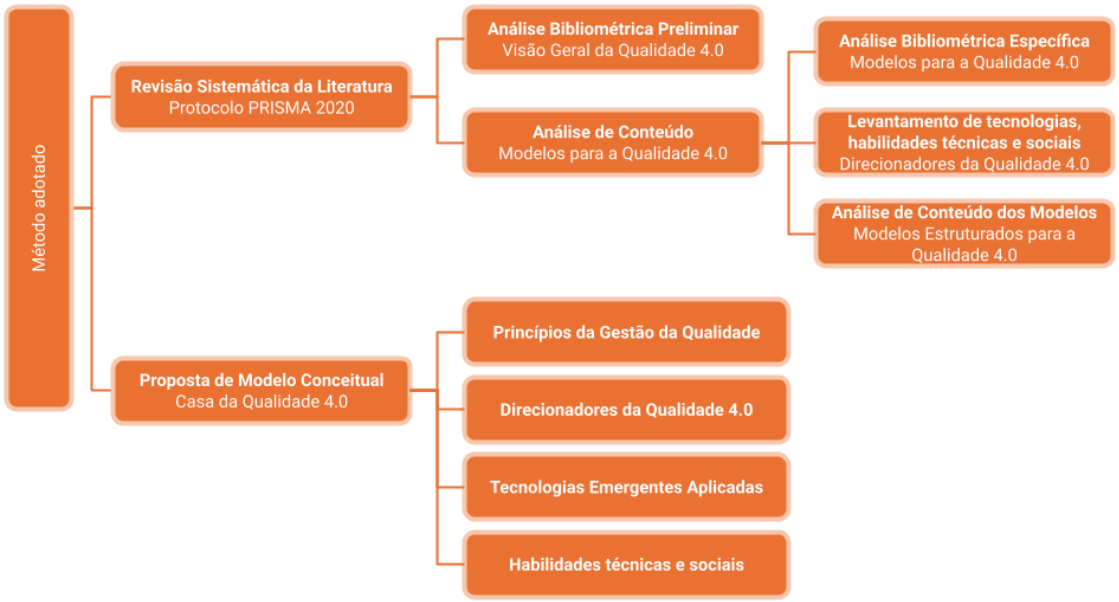
O presente trabalho configura uma pesquisa qualitativa com caráter exploratório visto seu objetivo de investigar a Q4.0 e os modelos de gestão propostos até o presente momento. Quanto à sua natureza e lógica, classifica-se como uma pesquisa aplicada de lógica indutiva, uma vez que a sua principal meta é a geração de conhecimentos que contribuam para o avanço científico. Além disso, a fonte dos dados utilizados nesta pesquisa é de origem secundária, sendo estes gerados em outras pesquisas e analisados na pesquisa proposta (Azevedo; Ensslin, 2020).

4.2 MÉTODO ADOTADO PARA A CONDUÇÃO DA PESQUISA

Para a condução desta pesquisa, adotou-se o método representado na Figura 4. Inicialmente, realizou-se uma análise bibliométrica geral sobre Qualidade 4.0, conforme detalhado na Seção 4.3 — Bibliometria (Etapa 1). Em seguida, como parte da análise de conteúdo, foi conduzida uma segunda análise bibliométrica, com foco específico nos modelos para a Q4.0 (Etapa 2).

Na seção 4.4 - Revisão Sistemática da Literatura, é detalhado o procedimento usado para a seleção da amostra de artigos, com base no protocolo PRISMA 2020. Essa seleção resultou na análise bibliométrica específica, no levantamento de tecnologias e habilidades técnicas e sociais, bem como na análise de conteúdo dos modelos estruturados para a Q4.0. O resultado final desse procedimento culmina com uma proposta de modelo conceitual para a Q4.0 baseada nos princípios de Gestão da Qualidade, Direcionadores da Q4.0, Tecnologias Emergentes aplicadas e Habilidades Técnicas e Sociais.

Figura 4 – Visão esquemática do método adotado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 BIBLIOMETRIA

Esta pesquisa utiliza-se da análise bibliométrica, uma abordagem estatística formalizada por Pritchard (1969) com a finalidade de apurar a literatura existente e avaliar as tendências globais em um campo de pesquisa específico. Para tal, foram utilizadas as bases acadêmicas *Scopus* e *Web of Science* (WoS) devido principalmente a suas relevâncias na Engenharia (Martín *et al.*, 2018) além do software gratuito de análise e visualização de redes bibliométricas *VOSviewer*.

Foram utilizados critérios objetivos de busca nas bases acadêmicas *Scopus* e WoS a fim de delimitar o tema. O Quadro 1 exibe os critérios adotados e os associa aos filtros das etapas de pesquisa.

Quadro 1 – Critérios adotados para a seleção dos documentos para análise bibliométrica

Filtros de Busca	**Etapa 1**	**Etapa 2**
Campo de Busca	Título, *Abstract* e *Keywords*	Título, *Abstract* e *Keywords*
String Utilizada	(*"Quality 4.0"* OR *"Quality management 4.0"*)	((*"Quality 4.0"* OR *"Quality management 4.0"*) AND (*"framework"* OR *"model"* OR *"methodology"* OR *"approach"*))
Período de Publicação	Ano inicial até 2024	Ano inicial até 2024
Tipo de Documento	Todos	Todos

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A pesquisa foi realizada em duas etapas, buscando inicialmente uma visão geral da Q4.0 (Etapa 1) e visualização mais específica buscando resultados associados ao desenvolvimento e trabalho de modelos da Q4.0 (Etapa 2).

Os dados coletados nas etapas 1 e 2 foram analisados por meio do software *VOSviewer*, permitindo um estudo bibliométrico com base nas palavras-chave dos documentos obtidos em ambas as bases de dados.

O software *RStudio*, em conjunto do pacote *Bibliometrix* e da interface de visualização *Biblioshiny* foram empregados na sequência para complementar a análise bibliométrica do *VOSviewer*. Após a seleção final dos artigos para a revisão sistemática da literatura, a amostra final de documentos foi analisada através da geração de dados e gráficos do *Biblioshiny*, permitindo a análise de dados a respeito da distribuição anual da produção, identificação das fontes, autores e países mais frequentes e do levantamento das publicações mais citadas, além da geração de uma nuvem de palavras que auxiliou na caracterização da amostra e da identificação dos termos em alta.

4.4 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A metodologia PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) foi utilizada como metodologia balizadora para a revisão sistemática da literatura (RSL) neste trabalho. O protocolo PRISMA, inicialmente desenvolvido em 2009 (Moher *et al.*, 2009), e revisado em 2020 buscando incorporar inovações na condução de revisões sistemáticas (Page *et al.*, 2021) fornece diretrizes para estruturar um processo que inclui desde a definição clara da questão da pesquisa, a busca sistemática das bases de dados, a triagem dos trabalhos através de critérios de inclusão, exclusão, extração e análise

de dados, uma avaliação crítica da qualidade dos estudos e uma síntese dos resultados. Para tal, a metodologia apresenta o fluxograma PRISMA, o qual documenta cada etapa da triagem dos estudos e um checklist de sete seções e 27 itens que orientam a revisão sistemática.

Após a seleção final dos artigos para a RSL, com base nos documentos identificados na Etapa 2, a amostra foi analisada por meio da geração de dados e gráficos utilizando o software Biblioshiny.

4.4.1 Critérios de busca e seleção dos trabalhos

Após a definição de que a *Scopus* e a *WoS* seriam as bases de dados utilizadas para a busca dos artigos analisados de acordo com a metodologia PRISMA, selecionou-se a string utilizada na Etapa 2 da análise bibliométrica deste trabalho (Quadro 1), uma vez que esta orienta uma busca mais específica por documentos associados a construção de modelos da Q4.0, o foco deste trabalho.

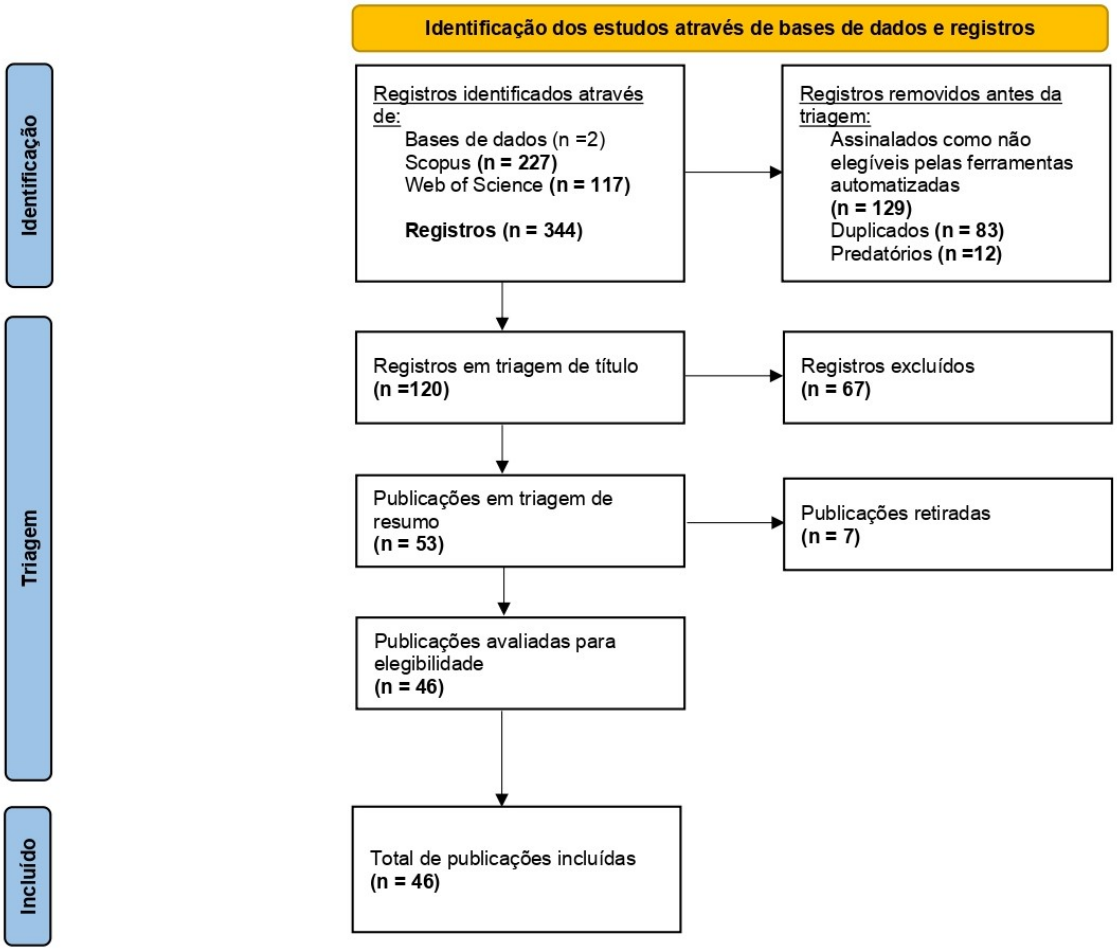
A sequência dos passos de inclusão e exclusão dos documentos de acordo com a metodologia PRISMA pode ser visualizada na Figura 5 e o Quadro 2 contempla os critérios utilizados para a seleção dos documentos para a RSL.

Quadro 2 – Critérios adotados para a seleção dos documentos para revisão sistemática

Critério	Inclusão	Exclusão
(i) Tipo de Documento	Artigo	Outros documentos
(ii) Idioma de Publicação	Inglês	Outros idiomas
(iii) Período de Publicação	Ano inicial - 2024	Demais períodos
(iv) Periódicos predatórios	Periódicos não-predatórios	Periódicos predatórios
(v) Temática	Modelos de Q4.0	Demais temáticas

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 5 – Diagrama PRISMA para a seleção de artigos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Page *et al.* (2021)

Na fase de identificação, os critérios *(i)*, *(ii)* e *(iii)* do Quadro 2 foram utilizados para excluir os artigos nas ferramentas de busca automatizadas de ambas as bases de dados. Em seguida o software *RStudio* e o pacote *Bibliometrix* junto da interface gráfica *Biblioshiny* foram empregados para auxiliar a gestão e a organização das referências, bem como na exclusão de duplicatas encontradas em ambas as bases. Na sequência, para aplicação do critério *(iv)*, exportou-se a relação obtida para uma planilha no *Microsoft Excel* a fim de identificar e remover documentos publicados em periódicos predatórios, com base na lista atualizada do site *Predatory Journals* (https://predatoryjournals.org/the-list). Por fim, o *Biblioshiny* auxiliou na triagem e seleção de artigos com base na temática dos títulos, resumos e leituras integrais.

Por sua vez, na fase de triagem, o critério *(v)* do Quadro 2 foi aplicado para a filtragem dos artigos restantes de acordo com a temática do estudo identificada nos títulos e resumos. Foram então removidos artigos com menções a normas específicas e modelos normalizados, bem como estudos muito específicos e não diretamente relacionados à temática selecionada. Buscou-se assim incluir artigos que focalizam o estudo e criação de propostas de modelos para a Q4.0.

A revisão teve como resultado uma amostra final de 46 artigos triados a partir de uma amostra inicial de 344 documentos encontrados através da string de busca utilizada (227 localizados na base *Scopus* e 117 na base *Web of Science*). Os 46 artigos artigos selecionados para leitura integral estão sumarizados no quadro 3.

Quadro 3 – Resumo da amostra de artigos selecionados através da metodologia PRISMA para a RSL

Ano	Fonte	Título do Artigo	Autores
2024	Total Quality Management & Business Excellence	Adopting Quality Management Practices In The Industry 4.0 Era: An Investigation Into The Challenges	(Fadilasari *et al.*)
2024	TQM Journal	An Assessment Framework To Evaluate The Critical Success Factors To Quality 4.0 Transition In Developing Countries: A Case Experience Of Sustainable Performance Of Indian Manufacturers	(Joshi *et al.*)
2024	TQM Journal	Analysis Of Critical Success Factors Of Quality 4.0 Implementation In Manufacturing SMEs Using Best-Worst Method	(Vinodh; Wankhede; Muruganantham)
2024	TQM Journal	Assessing Solutions To Overcome Quality 4.0 Barriers: A Decision-Making Framework	(Virmani *et al.*)
2024	International Journal of Quality & Reliability Management	Critical Failure Factors For Quality 4.0: An Exploratory Qualitative Study	(Antony *et al.*)
2024	Int. J. Manage. Decis. Mak.	Determining The Maturity Level For The Selected Manufacturing Industries Through Industry 4.0 Perspectives	(Maganga; Taifa)
2024	TQM Journal	Essential Organizational Variables For The Implementation Of Quality 4.0: Empirical Evidence From The Indian Furniture Industry	(Mittal *et al.*)
2024	TQM Journal	Exploring Barriers To Quality 4.0 Implementation: A Multivariate Analysis	(Calvo-Mora; Pedro; Suarez)
2024	Int. J. Qual. Res.	From Quality 4.0 To Quality 5.0 - The Transition Roadmap	(Stefanovic *et al.*)
2024	Business Strategy and Development	Innovating For Impact: Proposing Quality 4.0 Integration To Achieve Sustainable Development Goals In Microenterprises	(Avilés-Sacoto *et al.*)
2024	TQM Journal	Insights Into Quality Professionals' Adoption Of Quality 4.0 In The High-Tech Industry	(Rogala; Brzozowski; Pankowska)
2024	TQM Journal	Integrated Quality 4.0 Framework For Quality Improvement Based On Six Sigma And Machine Learning Techniques Towards Zero-Defect Manufacturing	(Gonzalez *et al.*)
2024	Total Quality Management & Business Excellence	Leadership For Quality 4.0: Development And Validation Of A Multidimensional Measure	(Zheng *et al.*)
2024	Quality Engineering	Mutual Combination Of Selected Principles And Technologies Of Industry 4.0 And Quality Management Methods - Case Study	(Klaput *et al.*)
2024	TQM Journal	Critical Failure Factors For Quality 4.0: An Exploratory Qualitative Study	(Wawak; Teixeira Domingues; Sampaio)
2024	Total Quality Management & Business Excellence	Quality 4.0 Practices Toward Sustainable Excellence In The Manufacturing Sector	(Nguyen *et al.*)

Continua...

Ano	Fonte	Título do Artigo	Autores
2024	Total Quality Management & Business Excellence	Quality 4.0 Social And Strategic Readiness Factors: Sufficient And Necessary Condition Analysis	(Rico *et al.*)
2024	Journal of Manufacturing Technology Management	Towards Quality 4.0 In Home Appliances: Definitions, Deployment Scenarios, And Future Perspectives	(Talaie; Ziaeian; Malekinejad)
2023	International Journal of Quality & Reliability Management	An Exploration Of Organizational Readiness Factors For Quality 4.0: An Intercontinental Study And Future Research Directions	(Antony *et al.*)
2023	Total Quality Management & Business Excellence	Benefits, Challenges, Critical Success Factors And Motivations Of Quality 4.0 - A Qualitative Global Study	(Antony *et al.*)
2023	Int J Computer Integr Manuf	Data Analytics In Quality 4.0: Literature Review And Future Research Directions	(Bousdekis *et al.*)
2023	Engineering Management Journal	Leadership For Quality 4.0 Improvement, Learning, And Innovation	(Glogovac *et al.*)
2023	TQM Journal	Quality 4.0 Conceptualisation: An Emerging Quality Management Concept For Manufacturing Industries	(Maganga; Taifa)
2023	Quality Innovation Prosperity	Quality 4.0 In Digital Manufacturing-Example Of Good Practice	(Jokovic *et al.*)
2023	GeSec	Quality 4.0: Emerging Technologies And Applications	(Da Silva *et al.*)
2023	International Journal of Quality & Reliability Management	Quality 4.0-A Measurement Model Using The Confirmatory Factor Analysis (Cfa) Approach	(Sureshchandar)
2023	International Journal of Quality & Reliability Management	Quality Management In Industry 4.0 Environment: A Morphological Analysis And Research Agenda	(Prashar)
2023	Quality Engineering	Quality Process Reengineering In Industry 4.0: A Bpr Perspective	(Shivam; Gupta)
2023	International Journal of Quality & Reliability Management	The Readiness Of Manufacturing Industries To Transit To Quality 4.0	(Maganga; Taifa)
2023	International Journal of Data and Network Science	The Role Of Quality 4.0 In Supporting Digital Transformation: Evidence From Telecommunication Industry	(Alrabadi; Talib; Abdullah)
2023	Operations and Supply Chain Management	Total Quality Management 4.0 Framework: Present And Future	(Nguyen; Nguyen; Tucek)
2022	Quality Innovation Prosperity	Developing A Quality 4.0 Maturity Index For Improved Business Operational Efficiency And Performance	(Mtotywa)
2022	International Journal of Quality & Reliability Management	Enabler Toward Successful Implementation Of Quality 4.0 In Digital Transformation Era: A Comprehensive Review And Future Research Agenda	(Thekkoote)
2022	Acta Tech. Napoc. Ser.-Appl. Math. Mech. Eng.	Management Through Processes In SMEs Using Quality 4.0	(Vlad; Severin)
2022	Qual. Reliab. Eng. Int.	QFD For Selecting Key Success Factors In The Implementation Of Quality 4.0	(Dror)
2022	TQM Journal	Quality 4.0 And Its Impact On Organizational Performance: An Integrative Viewpoint	(Antony *et al.*)
2022	TQM Journal	Quality 4.0 Conceptualisation And Theoretical Understanding: A Global Exploratory Qualitative Study	(Antony; McDermott; Sony)

Continua...

Ano	Fonte	Título do Artigo	Autores
2022	International Journal of Quality & Reliability Management	Quality 4.0-Understanding The Criticality Of The Dimensions Using The Analytic Hierarchy Process (Ahp) Technique	(Sureshchandar)
2022	TQM Journal	The New Concept Of Quality In The Digital Era: A Human Resource Empowerment Perspective	(Jamkhaneh *et al.*)
2022	Sustainability	Unfolding The Impact Of Quality 4.0 Practices On Industry 4.0 And Circular Economy Practices: A Hybrid Sem-Ann Approach	(Huang; Shahzadi; Khan)
2022	International Journal of Production Research	What Is Quality 4.0? An Exploratory Sequential Mixed Methods Study Of Italian Manufacturing Companies	(Chiarini; Kumar)
2021	TQM Journal	Motivations, Barriers And Readiness Factors For Quality 4.0 Implementation: An Exploratory Study	(Sony *et al.*)
2021	Quality Innovation Prosperity	Quality 4.0 For Processes And Customers	(Efimova; Bris)
2020	TQM Journal	Industry 4.0, Quality Management And TQM World. A Systematic Literature Review And A Proposed Agenda For Further Research	(Chiarini)
2020	Quality Engineering	Quality 4.0-The Challenging Future Of Quality Engineering	(Zonnenshain; Kenett)
2019	Periodica Polytechnica Social and Management Sciences	Industry 4.0 As A Key Enabler Toward Successful Implementation Of Total Quality Management Practices	(Sader; Husti; Daróczi)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.5 QUESTÕES DE PESQUISA

Com os procedimentos metodológicos adotados, pretende-se responder às seguintes questões de pesquisa:

Questões de Pesquisa Gerais:

Q1: Quais são principais termos e palavras-chave presentes nas publicações acerca da Q4.0?

Q2: Quais periódicos têm sido referência na publicação acerca dos novos modelos de Q4.0?

Q3: Que autores se destacam nas publicações sobre os novos modelos de Q4.0?

Q4: Que países estão se destacando na publicação de estudos sobre dos novos modelos de Q4.0?

Questões de Pesquisa Específicas:

Q5: Quais tecnologias têm sido mais utilizadas para definir o que constitui um modelo de Q4.0?

Q6: Quais estão sendo as *softskills* mais requeridas na Q4.0?

Q7: Quais estão sendo as *hardskills* mais requeridas na Q4.0?

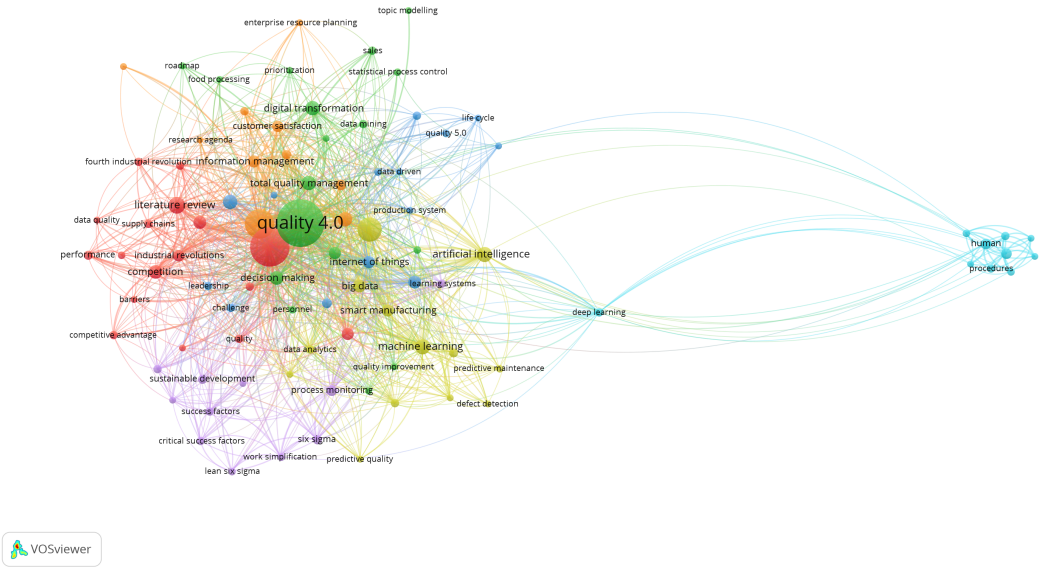
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VISÃO GERAL DA QUALIDADE 4.0

Como resultado da busca de documentos segundo critérios estabelecidos no Quadro 1 foram identificados 294 e 176 documentos respectivamente nas bases *Scopus* e *Web of Science* na Etapa 1, enquanto na Etapa 2, os totais foram de 227 e 117.

A partir da análise bibliométrica realizada através do software gratuito *VOSviewer* foram obtidos 4 mapas bibliométricos: um mapa para cada base de dados na Etapa 1, que considera trabalhos gerais sobre Q4.0 e um mapa para cada base de dados na Etapa 2 que considera trabalhos mais específicos com propostas de modelos para a Q4.0 (conforme critérios descritos no Quadro 1 da seção 4.2). Desta forma, na Etapa 1, foram identificados 65 termos para a base *Scopus* e 150 termos na base *Web of Science*, quantidades essas representadas conforme critério de proporcionalidade entre as bases apresentado na seção 4.2. Já na Etapa 2, foram levantados 53 palavras-chave para a base *Scopus* e 105 termos para a base WoS.

Figura 6 – Mapa bibliométrico da Etapa 1 (artigos relacionados à Q4.0) em artigos da base *Scopus*

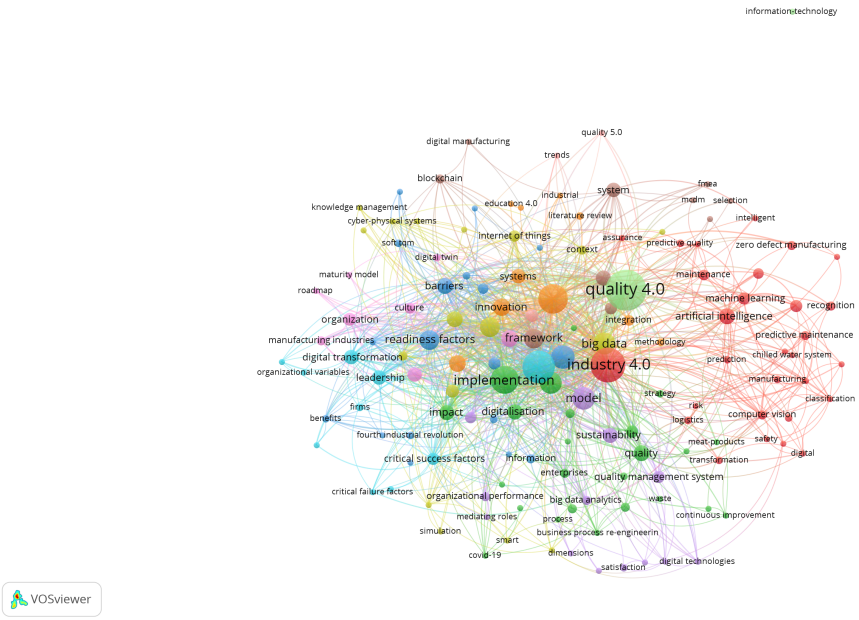


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As Figuras 6, 7, 8 e 9 exibem os mapas bibliométricos gerados pelo *software VOSviewer*. Nesses mapas, o tamanho das palavras-chave reflete as suas recorrências, as cores dos círculos sinalizam os *clusters* ou conjunto de agrupamento dos itens e as linhas revelam o relacionamento dos termos apresentados.

Em todos os mapas gerados, como esperado, a palavra-chave "quality 4.0"foi o

Figura 7 – Mapa bibliométrico da Etapa 1 (artigos relacionados à Q4.0) em artigos da base *Web of Science*



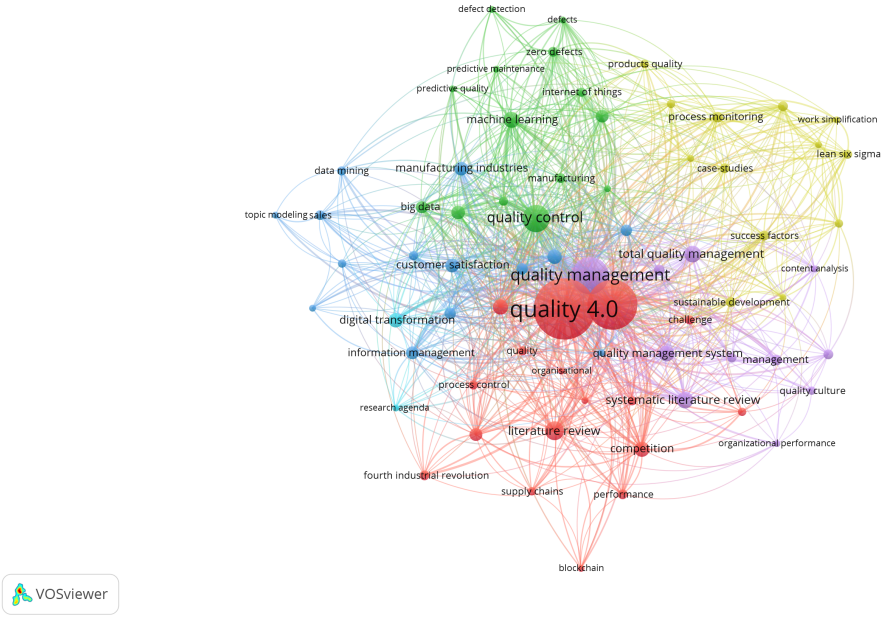
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

termo mais recorrente da pesquisa, tendo aparecido 196 vezes na *Scopus* e 126 vezes na *Web of Science* durante a primeira etapa da análise, ao passo que na segunda etapa, a ocorrência desse termo foi de 166 para a base *Scopus* e de 89 para a base WoS. Além disso, o termo "industry 4.0"revelou-se o segundo termo mais recorrente em todos os resultados, com 136 e 97 aparições respectivamente nas bases *Scopus* e WoS durante a primeira etapa e 116 e 70 aparições nas mesmas bases na segunda etapa. A presença em massa desses dois termos é fortemente associável, uma vez que as práticas da Q4.0 estão diretamente associadas à aplicação das tecnologias digitais surgidas na I4.0 às práticas da gestão da qualidade (Sader; Husti; Daroczi, 2022).

Termos como "big data", "artificial intelligence", "machine learning"e "internet of things"formaram *clusters* em todas os mapas gerados, colocando em envidência a centralidade dessas tenlogias no contexto da Q4.0. A presença recorrente destas palavras e a relação entre elas sugere que os documentos analisados buscam entender as inovações tecnológicas que moldam o contexto da atual gestão da qualidade.

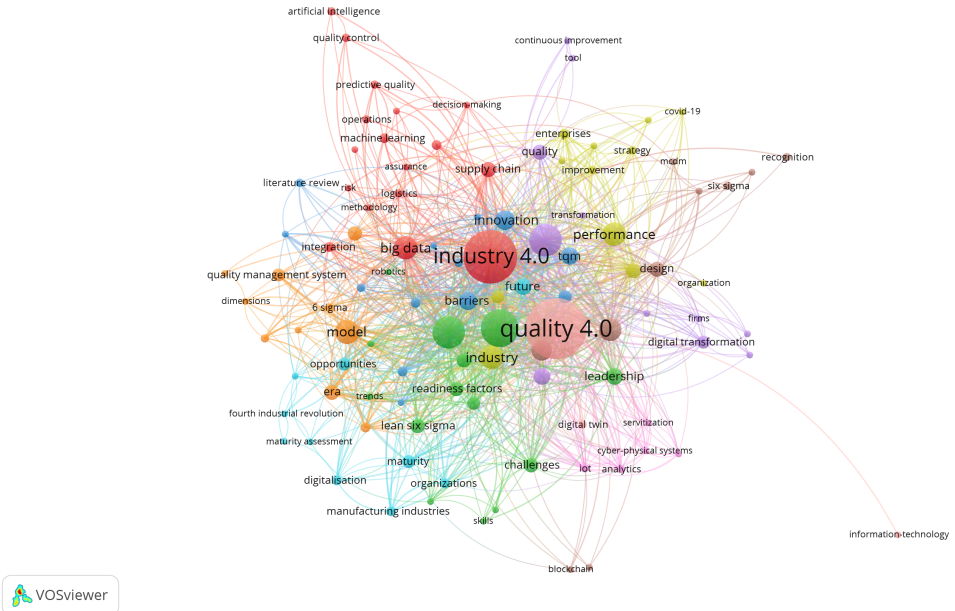
Além disso, a presença recorrente de termos como "digitalisation", "digital transformation"e "implementation"sugere a crescente busca pelo entendimento dos desafios para a transição dos modelos convencionais para os possíveis novos modelos de gestão, transição esta que requere a superação de uma série de desafios e dificuldades de alinhamento, além de um grande investimento em treinamento em IA, *data analytics* e IoT. (Antony *et al.*, 2023b).

Figura 8 – Mapa bibliométrico da Etapa 2 (artigos relacionados à Modelos da Q4.0) em artigos da base *Scopus*



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 9 – Mapa bibliométrico da Etapa 2 (artigos relacionados à Modelos da Q4.0) em artigos da base *Web of Science*



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.2 ANÁLISE DA AMOSTRA DE DOCUMENTOS SELECIONADOS PELA RSL

Para entender a caracterização da amostra, uma análise de dados foi realizada para obter uma visão geral da literatura estudada e dos documentos selecionados.

Inicialmente, uma nuvem de palavras foi gerada com o auxílio da interface *Biblioshiny* (Figura 10). Percebe-se que as palavras "implementation"e "management"destacaram-se como as palavras-chave com maior repetição na base estudada, revelando a preocupação dos autores com a implementação das novas tecnologias na transição dos modelos anteriores para os novos modelos de qualidade e com a gestão da qualidade em si nas empresas e organizações em meio à esse período de mudança e inovação.

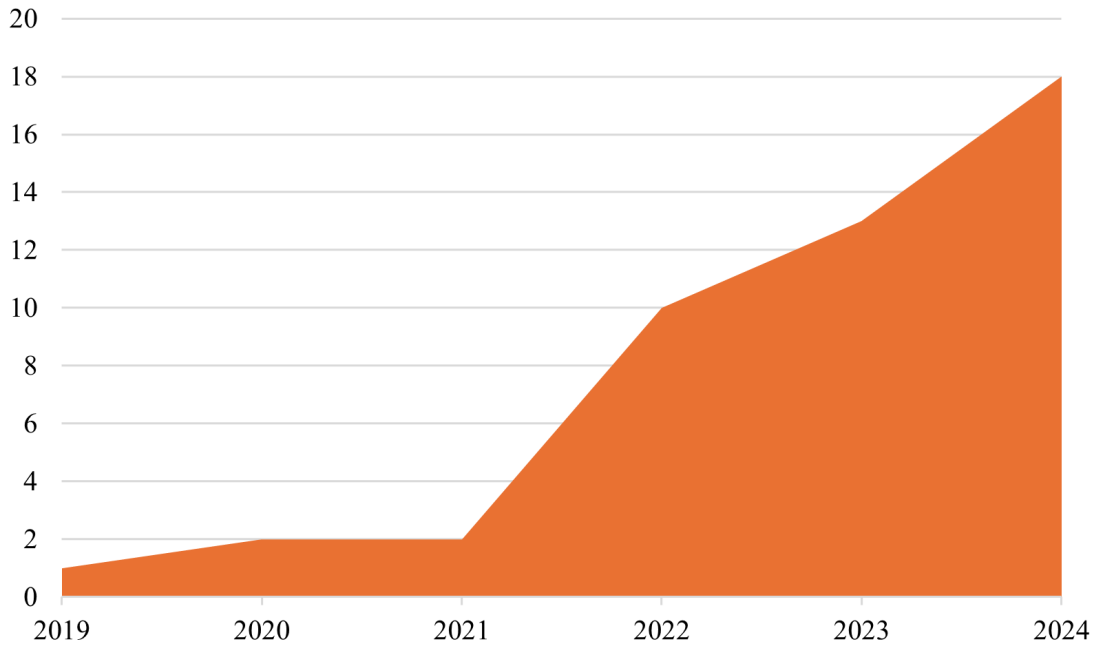
Figura 10 – Nuvem de palavras da Amostra

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 11 apresenta a distribuição anual de produção científica da amostra composta pelos 46 artigos selecionados para a RSL. O primeiro registro data do ano de 2019, e evidencia o início das publicações acerca da Q4.0 dentro da amostra. Observa-se também um crescimento expressivo do número de publicações registradas a partir do ano de 2020, período que coincide com o surgimento da pandemia do COVID-19, momento a partir do qual a integração de tecnologias digitais e práticas industriais ganha forte aceleração em virtude do impulsionamento da necessidade de inovação e adaptação dos setores industriais (Amankwah-Amoah *et al.*, 2021).

A Figura 12 mostra as fontes mais recorrentes na amostra, indicando predominância expressiva do TQM Journal como principal veículo de publicação sobre a Q4.0, onde 14

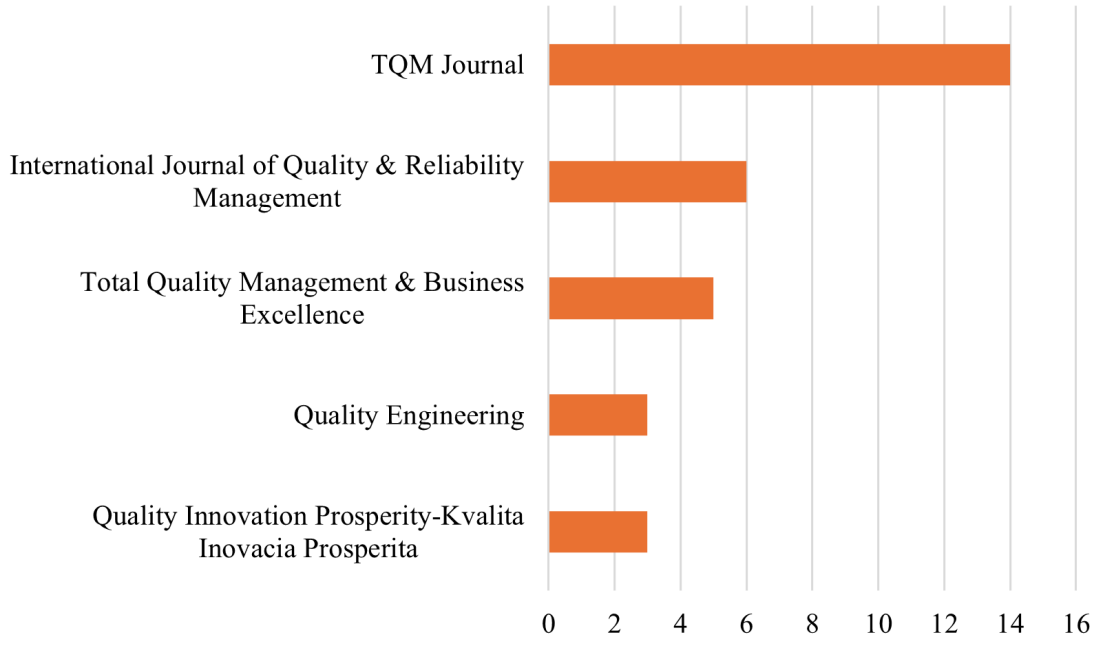
Figura 11 – Distribuição Anual da Produção da Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

das 46 publicações selecionadas para revisão foram publicadas nesse periódico.

Figura 12 – Fontes mais frequentes na Amostra

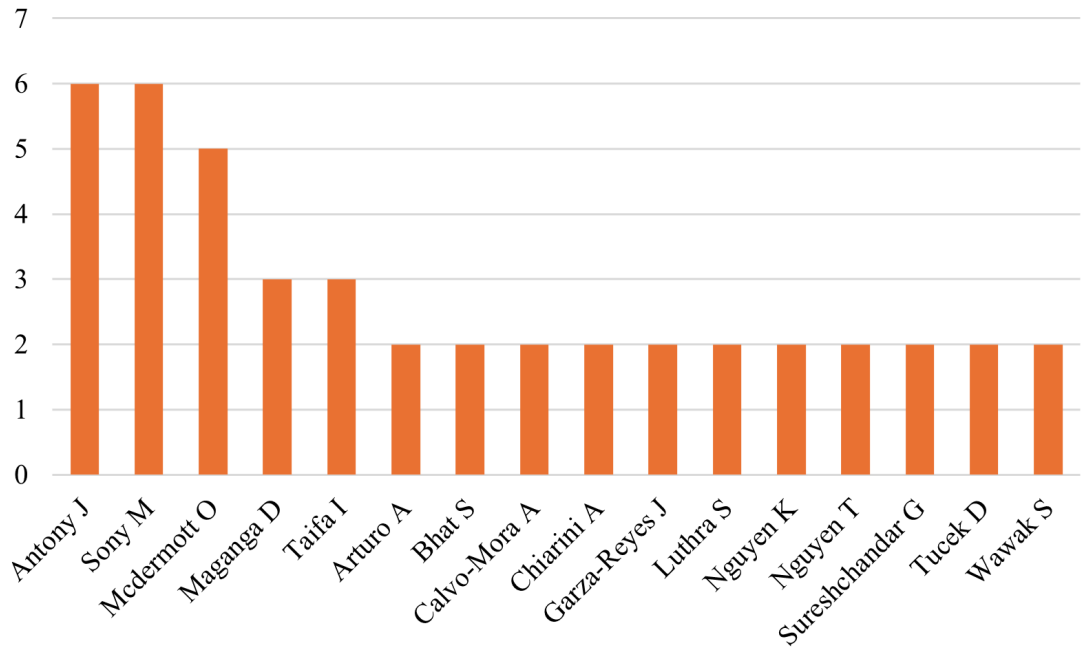


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 13 destaca os autores mais presentes na amostra. Entre eles, os autores Antony J., Sony M. e Mcdermott O. destacam-se com ao menos 5 estudos presentes na

amostra. A Figura 14 por sua vez apresenta as 10 publicações com maiores números de citações dentro da amostra de artigos selecionados, entre eles podemos destacar os estudos de Zonneshain A. e Chiarini A. que apresentam mais de 100 citações no momento da execução deste estudo e os autores Chiarini A. e Antony J. que sobressaem-se com dois artigos cada entre as publicações mais citadas. Esses dados destacam os autores e os trabalhos com maior impacto dentro da amostra.

Figura 13 – Autores mais frequentes na Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

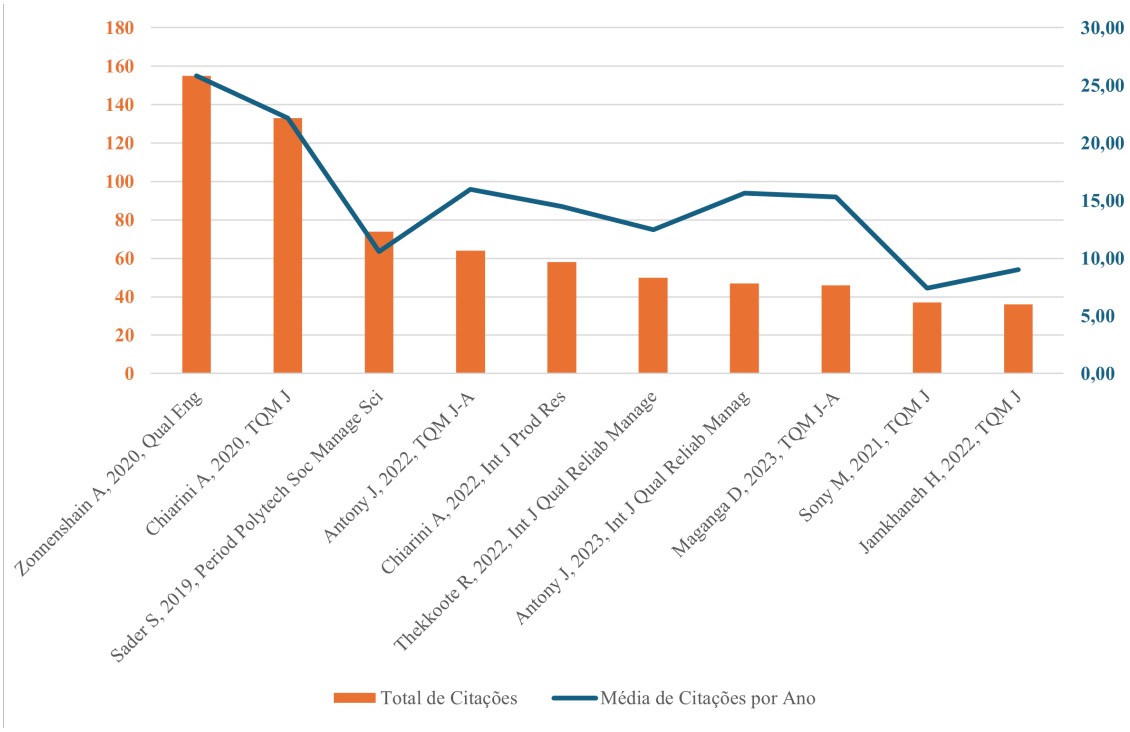
Os países de origem dos autores das obras selecionadas são apresentados na Tabela 2 e na Figura 15. A relação expressa na tabela contém a frequência da aparição dos países na amostra e contabiliza a origem de cada um dos autores creditados nas obras (países com frequência de aparição inferior a 4 foram não foram incluídos na tabela). Assim, é possível identificar os países com os maiores números de estudos dentro da amostra, a Índia (36 estudos) e o Reino Unido (14 estudos) consolidram-se como os países com maior prevalência, revelando forte impacto desses no estudo do tema.

5.3 LEVANTAMENTO DAS TECNOLOGIAS, *SOFT SKILLS* E *HARD SKILLS* DA QUALIDADE 4.0

5.3.1 Principais tecnologias associadas ao ambiente 4.0

Para responder as questões de pesquisa Q5, Q6 e Q7 realizou a extração das informações contidas nos artigos a partir da leitura integral dos artigos selecionados e da organização dos dados dentro de uma planilha utilizando o software *Microsoft Excel*.

Figura 14 – Publicações mais citadas na Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

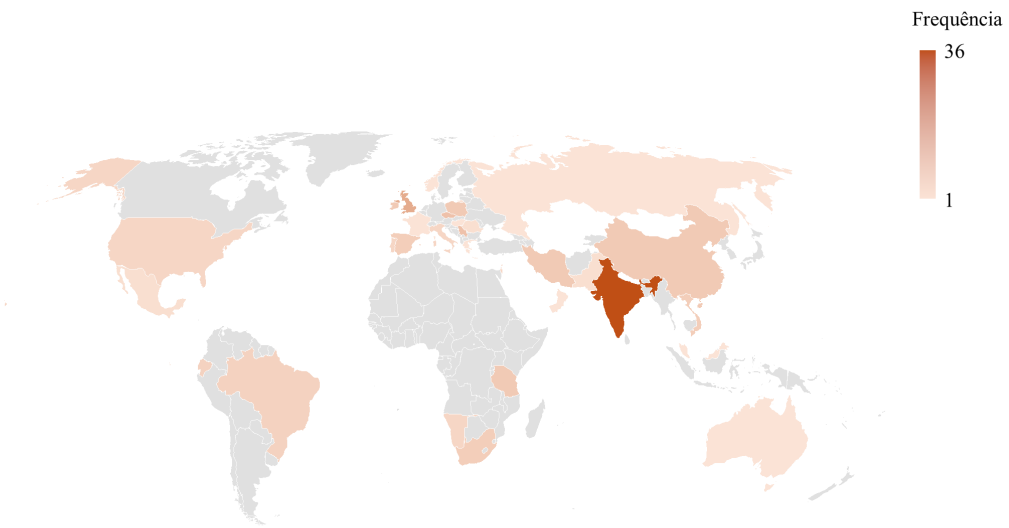
Durante essa etapa, observou-se uma variação significativa nos termos utilizados pelos autores para se referirem às mesmas tecnologias, *hard skills* ou *soft skills*. Por isso, buscando garantir a consistência e permitir a quantificação dessas ocorrências, uma etapa de normalização dos dados foi realizada. Essa etapa consistiu na identificação e agrupamento de sinônimos, variações linguísticas e diferentes formas de nomeação de um mesmo conceito. Por exemplo, conceitos como *Cloud computing*, *Cloud technology* e *Cloud manufacturing* foram todos agrupados sob o termo unificado *Cloud Computing*. Isso foi essencial para consolidar os dados extraídos e permitir uma análise mais coerente e comparável entre os artigos revisados.

A Figura 16 mostra o ranking das tecnologias associadas à Q4.0 mais presentes na amostra de documentos. Um total de 30 dos 46 artigos selecionados abordaram e/ou levantaram as principais tecnologias presentes nos novos modelos de Qualidade, apenas as tecnologias com recorrência maior ou igual a dois foram destacadas na figura. Um breve descritivo de cada uma destas tecnologias e suas principais aplicações na área da Qualidade são apresentadas a seguir:

- Internet Of Things:

  Tecnologia que integra dispositivos físicos (máquinas, sensores e processos) à internet, permitindo a comunicação e o compartilhamento de dados entre dispositivos, o que facilita a coleta de dados em tempo real e possibilita automações (Jagatheesaperumal *et al.*, 2021). Possibilita a execução de verificações automá-

Figura 15 – Países mais frequentes na Amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

ticas de qualidade, contribuindo para a melhoria contínua e para uma maior conectividade ao longo de toda a cadeia de valor (Sader; Husti; Daroczi, 2022).

- Artificial Intelligence AI:

  Área da ciência da computação que enfatiza a criação de máquinas inteligentes que funcionam e reagem como seres humanos (Bai *et al.*, 2020). Permite o processamento de grandes volumes de dados e a tomada de decisão baseada no aprendizado contínuo, possibilitando assim a redução de falhas através da rápida análise e identificação de padrões indesejados.

- Big Data:

  Correlação entre grandes quantidades de dados para aplicação em análise preditiva, mineração de dados, análises estatísticas, entre outros (Gilchrist, 2016). Em conjunto com a IA e o ML, o Big Data favorece a detecção de anomalias, previsão de falhas, extração de *insights* e análise de tendências, permitindo ajustes em tempo real e aumento da eficiência dos processos.

- Cloud Computing (CC):

  Tecnologia que se utiliza da virtualização para compartilhar e alocar dinamicamente recursos de computação (Xu; Xu; Li, 2018). Escalabilidade, centralização de dados e acessibilidade são benefícios do CC (Joshi *et al.*, 2024; Sader; Husti; Daroczi, 2022; Maganga; Taifa, 2023a).

- Machine Learning (ML):

Tabela 2 – Países mais frequentes na Amostra

Ranking	País	Frequência
1º	Índia	36
2º	Reino Unido	14
3º	República Tcheca	9
3º	Sérvia	9
4º	China	7
4º	Irã	7
4º	Irlanda	7
4º	Polônia	7
4º	Tanzânia	7
5º	África do Sul	6
5º	Espanha	6
5º	Vietnã	6
6º	Brasil	5
6º	Equador	5
7º	Israel	4
7º	Itália	4
7º	Namíbia	4
7º	Portugal	4
7º	EUA	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

É uma subseção da inteligência artifical. O aprendizado de máquina consiste na criação de algoritmos que dão ao computador a capacidade de aprender e agir pelo usuário sem ser diretamente programado para isso (Fuller *et al.*, 2020).

- Cyber-Physical Systems (CPS):

  Sistemas que integram componentes físicos e computacionais profundamente e representam a base da I4.0. Possibilitam sistemas colaborativos em fábricas inteligentes, onde agentes físicos, softwares e humanos se comunicam (Xu; Xu; Li, 2018).

- Blockchain:

  Tecnologia de banco de dados distribuído, onde informações são armazenadas em blocos encadeados de forma segura e inviolável, utilizando de tecnologias de criptografia e autenticação (Bai *et al.*, 2020).

- Virtual Reality, Augmented Reality and Mixed Reality:

Ambientes interativos baseados na realidade que utilizam capacidades de geração computacional de imagens, sons e outros efeitos para melhorar a experiência do mundo real (Bai *et al.*, 2020). Podem ser aplicados como ferramenta de *e-Learning* facilitando treinamentos operacionais (Sordan *et al.*, 2025).

- 3D Printing: Máquinas de manufatura versáteis para sistemas de manufatura flexível, capazes de transformar modelos digitais 3D em produtos físicos (Weller; Kleer; Piller, 2015).
- Robots: Dispositivos utilizados para replicar ações humanos na manufatura (Bai *et al.*, 2020). Maior precisão e consistência e diminuiçãoo de erros humanos são alguns dos benefícios na manufatura (Javaid *et al.*, 2021; Antony *et al.*, 2023a).
- Automation: É a capacidade de realizar tarefas que necessitam de altos níveis de precisão através do uso de robôs e sistemas automatizados, eliminando erros humanos e garantindo o controle da qualidade (Avilés-Sacoto *et al.*, 2024; Joshi *et al.*, 2024).
- RFID: Tecnologia que utiliza comunicação sem fio entre um objeto (ou etiqueta) e um dispositivo de leitura para identificar e rastrear objetos automaticamente (Bai *et al.*, 2020). Permite a identificação rápida e a origem de defeitos, acelerando e facilitando ações corretivas, além de reduzir erros manuais na coleta de dados, gerando maior confiabilidade nas medições.
- Deep Learning: É uma subseção do aprendizado de máquina. Os algoritmos de *Deep Learning* aprendem dados não estruturados e não rotulados usando redes neurais complexas com extração autônoma de características de entrada em vez de uma extração manual (Fuller *et al.*, 2020).
- Data Science and Data Analytics:

  Dados são coletados de diversas fontes para apoiar diversas técnicas avançadas de análise de dados. Essas estratégias facilitam a identificação de padrões, anomalias e áreas potenciais para melhoria em procedimentos de qualidade. Isso resulta na diminuição de defeitos e na otimização de operações, aumentando os níveis de satisfação do cliente (Joshi *et al.*, 2024).
- Sensors:

  Dispositivos que respondem a estímulos físicos (como calor, luz, som, pressão, magnetismo, ou movimento específico) e transmitem um impulso resultante (como para medições ou operações de controle) (Bai *et al.*, 2020).
- Enabling Technologies:

  Forma genérica usada para designar tecnologias que podem ser utilizadas para implementar a I4.0. Essas tecnologias incluem CPS, IoT, *Cloud Computing*, *Blockchain* e outras tecnologias relacionadas (Xu; Xu; Li, 2018).

- Cyber Security:

  Refere-se a metodos preventivos utilizados para proteger informação de roubos e ataques cibernéticos (Bai *et al.*, 2020).

- Digital Twins:

  Consiste em uma representação digital de um item físico através do uso de simulações integradas e dados do serviço. É um conjunto de informações virtuais que descreve uma produção física potencial ou real, sendo esta continuamente atualizada (Liu; Meyendorf; Mrad, 2018; Zheng; Yang; Cheng, 2018).

- Connectivity:

  Refere-se ao conceito de vínculos ou laços relacionais que facilitam a interação e a inovação entre os dispositivos e membros da organização (Zheng *et al.*, 2024; Carmeli; Spreitzer, 2009).

- Nanotechnology:

  Tecnologia específica para controlar átomos e moléculas individuais com o objetivo de fabricar produtos em escala macroscópica (Bai *et al.*, 2020).

- Digitalisation:

  A digitalização é definida como a conversão de informação para o formato digital e o uso de tecnologias digitais para melhorar operações e impacta desde processos internos até interações com clientes e estratégias de mercado (Fadilasari *et al.*, 2024).

- Quantum Computing:

  Tecnologia que se utiliza das leis da mecânica quântica para processar informações, o que permite uma memória exponencialmente maior e uma manipulação simultânea de entradas. Computadores quânticos são capazes de lidar com problemas complexos, como Big Data, de maneira muito mais rápida que os sistemas clássicos (Philip Chen; Zhang, 2014).

- Cognitive Computing:

  Campo de pesquisa que utiliza métodos da psicologia, biologia, processamento de sinais, física, teoria da informação, matemática e estatística com o objetivo de construir "máquinas que terão habilidades de raciocínio análogas ao cérebro humano"(Chen; Herrera; Hwang, 2018).

- Virtual Factory:

  Representação fisicamente precisa de uma fábrica real. Consiste em gêmeos digitais de fábricas que permitem que os fabricantes modelem, simulem, analisem e otimizem seus processos de produção, recursos e operações sem a necessidade de um protótipo físico ou planta piloto (NVIDIA, 2021).

- Genetic Engineering:

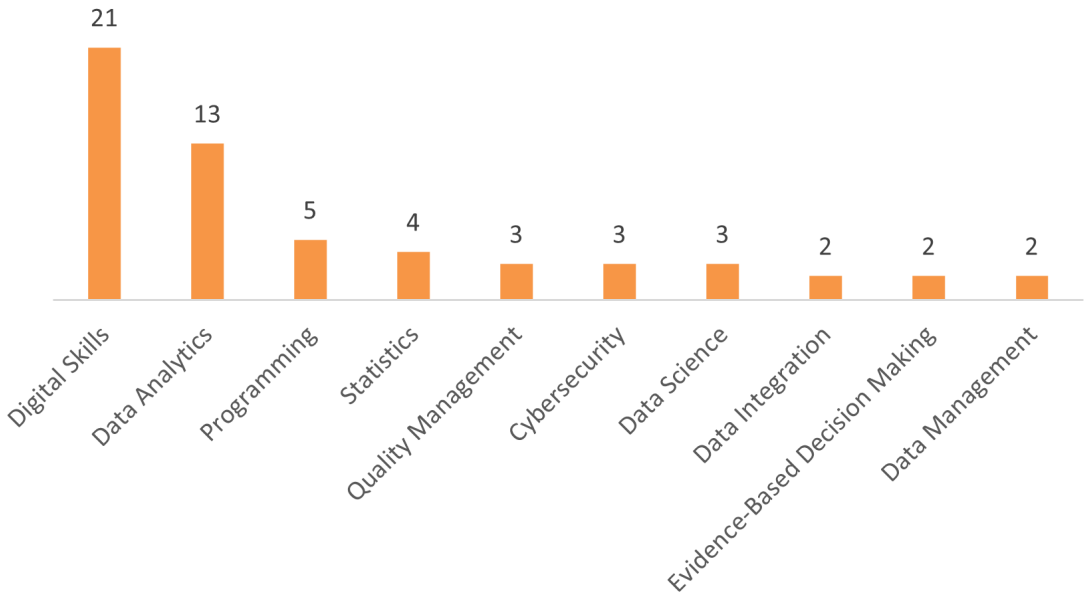
  É o conjunto de técnicas de análises moleculares utilizadas para o estudo de caracterização, expressão e modificadores do material genético dos seres vivos (Cordeiro, 2003).

- Drones:

  Aeronaves sem pilotos humanos a bordo (Bai *et al.*, 2020). Possibilitam inspeções visuais automatizadas, monitoramento de estoques, entre outros.

5.3.2 *Hard skills* identificadas

Figura 17 – Hard Skills mais recorrentes da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

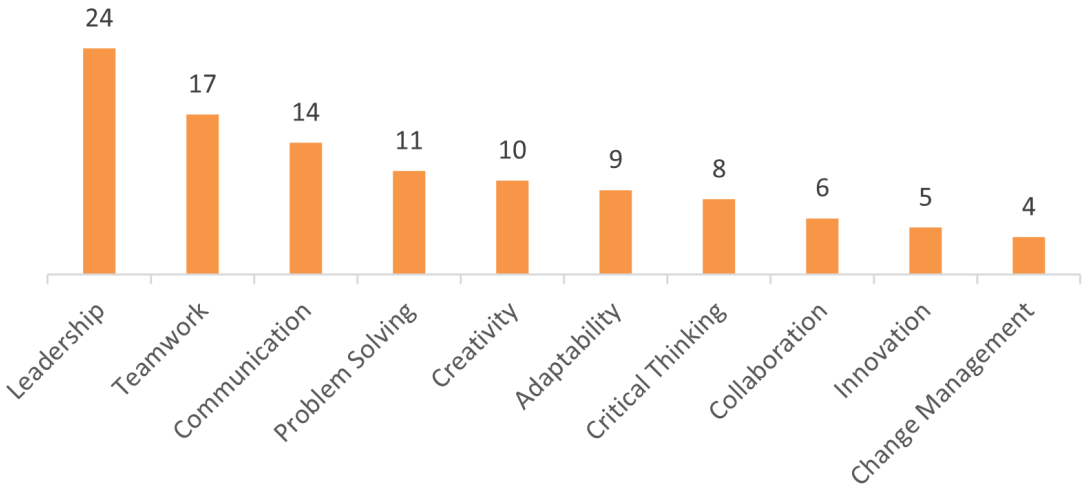
A Figura 17 mostra as *hard skills* mais levantadas pelos autores dos artigos revisados. 26 artigos da amostra abordaram ou citaram as *hard skills* mais importantes no encontro da I4.0 com a gestão da qualidade nas organizações. Durante a revisão da amostra, percebeu-se a recorrência dos termos "Digital skills", "skills 4.0", "Q4.0 skills"ou "digital age skills"para designar de forma genérica todas as novas habilidades necessárias à compreensão e manutenção das novas tecnologias surgidas na I4.0, sendo assim, esses termos foram agrupados sob o termo "Digital Skills"na fase de normalização dos resultados. Deste modo, observou-se que o termo "Digital Skills"foi o mais recorrente no que diz respeito as habilidades técnicas mais importantes da Q4.0. Alguns autores chegam a desmembrar esse termo em habilidades mais específicas, incluindo habilidades relacionadas a *analytics*, AI e CPS (Nguyen *et al.*, 2024; Rajput; Singh, 2020), no entanto muitos autores destacaram somente a necessidade do desenvolvimento destas habilidades técnicas e digitais associadas

à Q4.0 sem um detalhamento mais profundo, revelando uma possível lacuna para novos estudos.

Ademais, as habilidades de "Data Analytics"e "Programming"também se revelaram importantes aos novos profissionais da qualidade, habilidades essas fortemente associadas a importantes tecnologias emergentes da Q4.0, como o Big Data, IA, IoT, Cloud Computing, Machine Learning e muitas outras.

5.3.3 *Soft skills* identificadas

Figura 18 – Soft Skills mais recorrentes da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 18 evidencia as principais *soft skills* presentes na amostra de artigos. Do total de artigos analisados, 27 abordaram as *soft skills* vistas como as mais importantes na Q4.0. A liderança foi a habilidade mais recorrentemente citada entre os documentos, uma vez que é vista como componente que desempenha papel fundamental na implementação da Q4.0 (Antony; McDermott; Sony, 2022; Chiarini; Kumar, 2022).

Nesse novo cenário, o novo estilo de liderança exige cada vez mais que líderes atuem seguindo os princípios da gestão da qualidade, estimulem o aprendizado constante e a inovação através do uso das novas tecnologias e promovam um ambiente que favoreça transformações culturais e técnicas (Zheng *et al.*, 2024).Zheng *et al.* (2024) identifica três principais categorias no que tange à liderança no contexto da Q4.0: comportamentos orientados à tarefa, comportamentos orientados a relações e comportamentos orientados à mudança. A orientação à tarefa diz respeito à capacidade do líder de organizar e gerir a organização, garantindo a eficiência operacional; a orientação a relações foca na promoção de um ambiente colaborativo, onde há uma comunicação eficaz e a construção de equipes resilientes; e orientação à mudança enfatiza a habilidade de gerenciar transformações dentro da empresa, primordial em um cenário de inovação constante. Essas três dimensões

são importantes para gerir equipes para a adaptação às novas exigências da Q4.0, tornando o líder um agente central da mudança estratégica dentro da organização.

Além disso, o trabalho em equipe, a comunicação e a habilidade de resolução de problemas também se destacaram aparecendo mais de dez vezes entre os documentos revisados. A recorrência desses termos revela que muitas das habilidades dos profissionais tradicionais da qualidade continuam sendo vistas como fundamentais no âmbito da Q4.0. No entanto, tais habilidades passam a ter associação com a incorporação das tecnologias digitais, uma vez que a interação em tempo real entre equipes e indivíduos localizados em diferentes localidades torna-se mais eficiente e fluida. A resolução de problemas, por sua vez, ganha um caráter mais proativo, principalmente devido ao crescente uso da análise preditiva e do ML. Nesse contexto, as habilidades de adaptabilidade e gestão de mudanças surgem como necessidades emergentes ao perfil do novo profissional da qualidade, dado que são essenciais para a condução do processo de implementação das novas tecnologias.

De forma geral, a Q4.0 traz uma abordagem mais integradora e digitalizada para as *soft skills* dos novos profissionais, onde a integração de sistemas tecnológicos exige uma habilidade cada vez maior de comunicação digital e resolução de problemas baseada em dados e IA, além de um trabalho em equipe interdisciplinar e efetivo para resolver problemas complexos de forma eficiente.

5.4 O PAPEL DAS PESSOAS NA QUALIDADE 4.0

A Quarta Revolução Industrial, juntamente com o advento da Q4.0, tem gerado preocupações quanto à possível extinção de determinados postos de trabalho em virtude da incorporação de novas tecnologias. Essas apreensões não são inéditas, uma vez que preocupações semelhantes foram observadas ao longo das três revoluções industriais anteriores. No entanto, a história demonstra que, apesar de tais transformações nos modos de produção, cada revolução resultou, ao longo do tempo, na criação de mais empregos do que os que foram eliminados (Shivam; Gupta, 2023).

Atividades repetitivas e processos de inspeção manual tendem a ser fortemente automatizados nas organizações futuras (Antony *et al.*, 2022; Bonekamp; Sure, 2015). Os novos métodos de controle da qualidade exigirão um envolvimento humano significativamente reduzido. Dessa forma, a carga de trabalho dos operadores tende a diminuir consideravelmente, visto que suas atividades passam a ser apoiadas por tecnologias capazes de realizar coleta, manuseio, estruturação e análise de dados, assim como detecção de padrões, previsão de comportamentos e comunicação de resultados.

Nesse sentido, as iniciativas associadas à Q4.0 não promovem apenas o aumento da produtividade, mas também contribuem para a elevação da moral dos trabalhadores ao incorporar inteligência ao processo de monitoramento e gestão, além de, em muitos casos, permitir o gerenciamento remoto das operações (Shivam; Gupta, 2023).

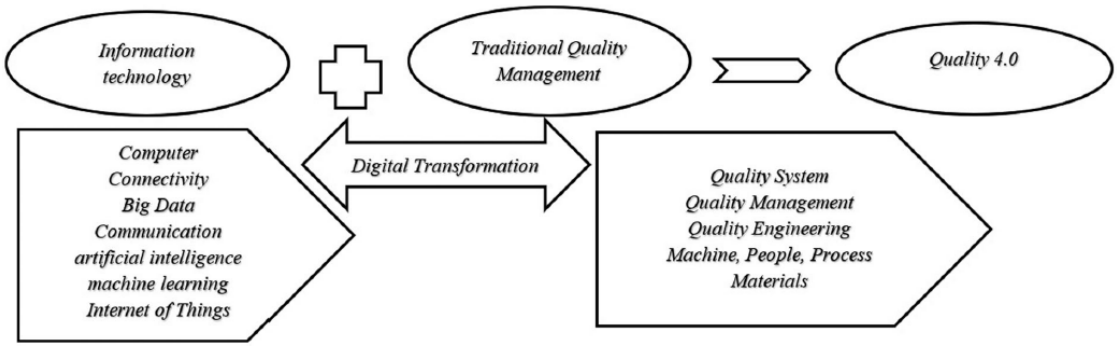
5.5 COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS ESTRUTURADOS DE QUALIDADE 4.0

As Figuras 19, 20, 21, 23, 22, 24, 25, 26 e 27 apresentam os modelos estruturados encontrados durante a RSL, isto é, os modelos com influências em teorias estruturadas da Qualidade, como o ciclo PDCA, o LSS, a ISO 9001:2015 e a *STS Theory*.

Figura 19 – Modelo 1: Os Eixos da Qualidade 4.0

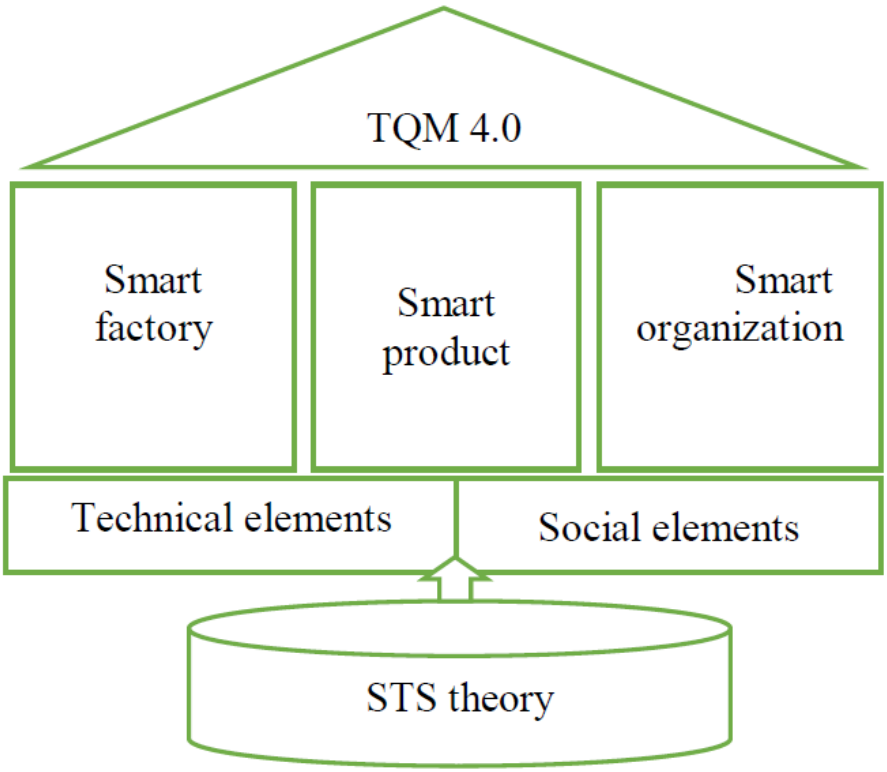
Fonte: Sureshchandar (2023)

Figura 20 – Modelo 2: Transformação Digital da Qualidade



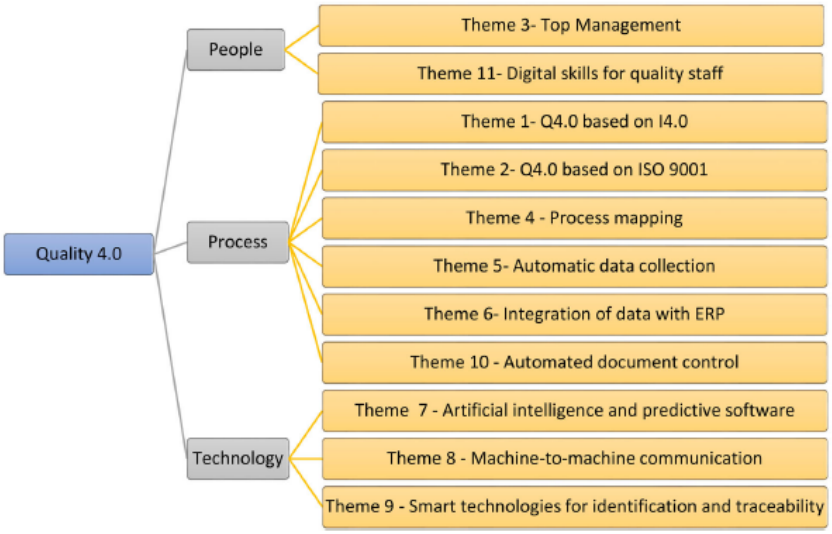
Fonte: Shivam e Gupta (2023)

Figura 21 – Modelo 3: Pilares do TQM 4.0



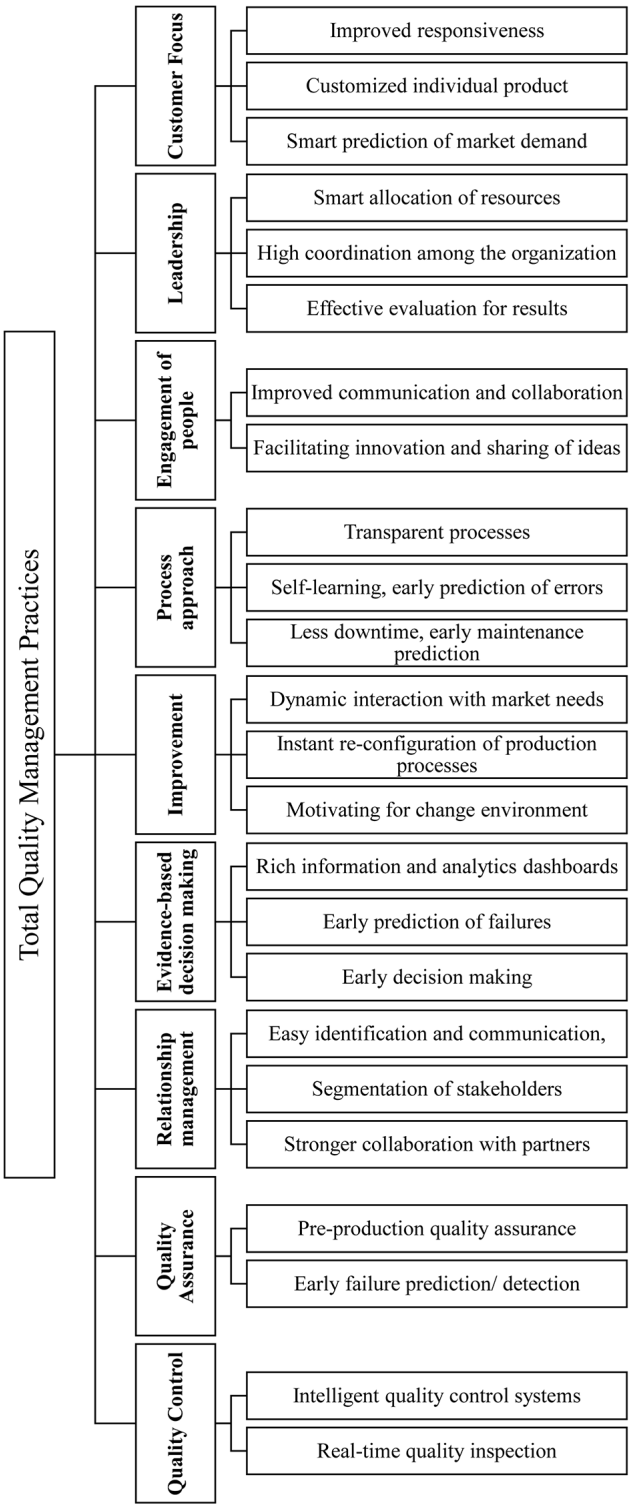
Fonte: Nguyen, Nguyen e Tucek (2023)

Figura 22 – Modelo 4: Um modelo teórico para a Q4.0



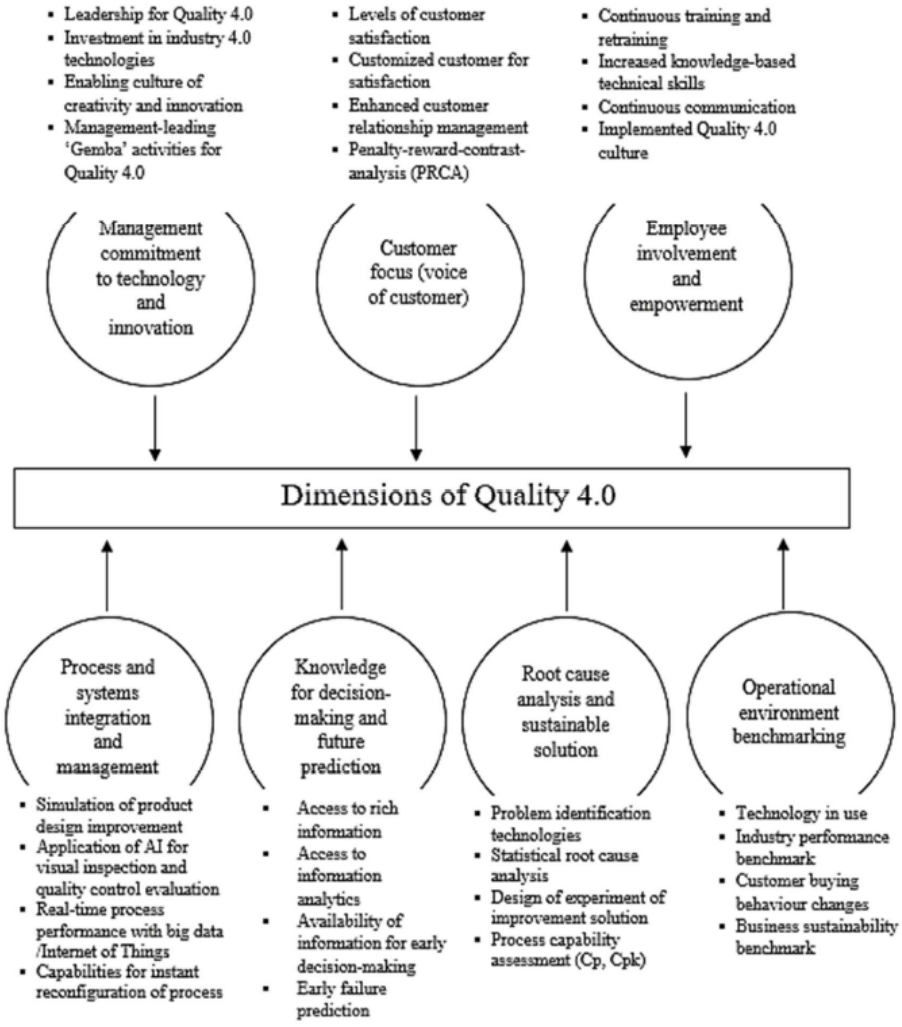
Fonte: Chiarini e Kumar (2022)

Figura 23 – Modelo 5: TQM no contexto da I4.0



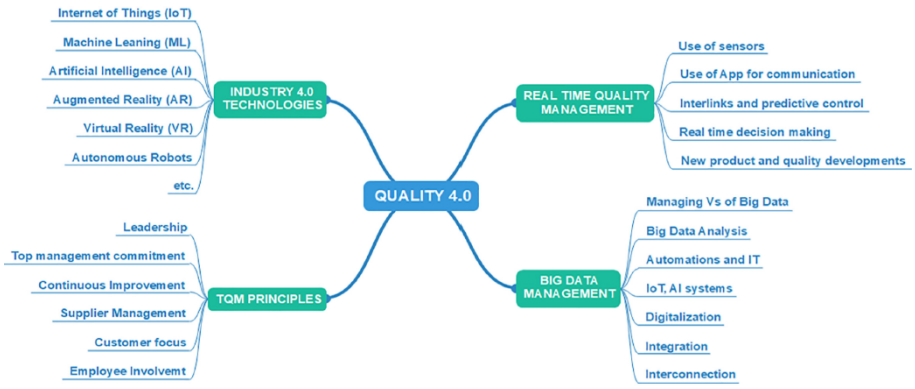
Fonte: Sader, Husti e Daróczi (2019)

Figura 24 – Modelo 6: As dimensões da Q4.0



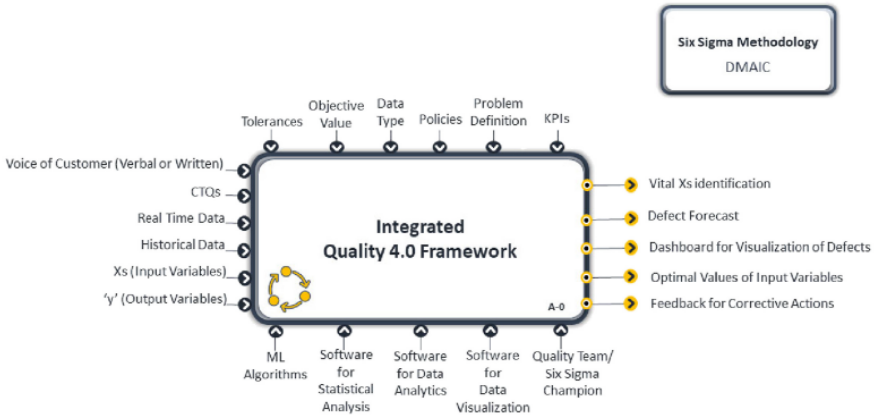
Fonte: Mtotywa (2022)

Figura 25 – Modelo 7: Estrutura conceitual da Q4.0



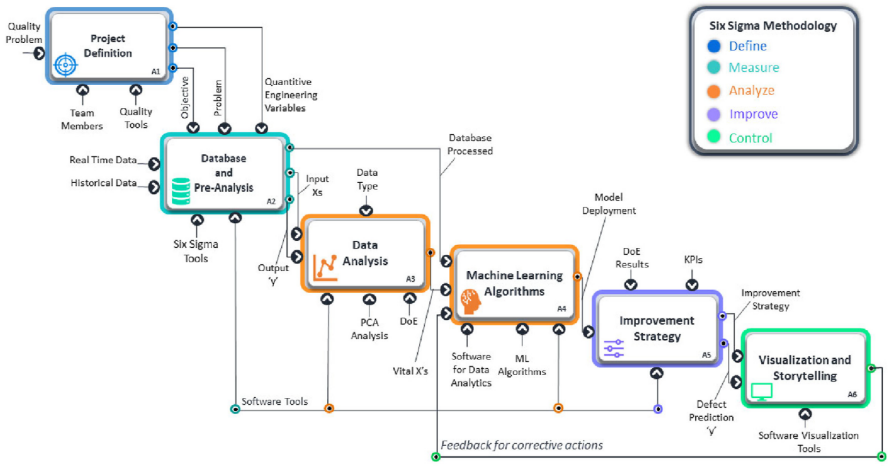
Fonte: Maganga e Taifa (2023a)

Figura 26 – Modelo 8: Estrutura integrada da Q4.0



Fonte: Santacruz *et al.* (2023)

Figura 27 – Modelo 8: Estrutura integrada da Q4.0 (Expandida)



Fonte: Santacruz *et al.* (2023)

O Quadro 4 destaca os oito modelos da Q4.0 identificados na amostragem, identificando para cada modelo suas principais características e as influências que direcionam sua formulação. Essa organização permite a identificação dos pontos de convergência entre os modelos identificados, contribuindo para uma visão geral destes na literatura estudada.

Quadro 4 – Resumo dos modelos da Q4.0 encontrados

Modelo	**Autor**	**Principais características**	**Principais influências identificadas**
Modelo 1: Os Eixos da Qualidade 4.0	Sureshchandar (2023)	Modelo composto por 12 eixos fundamentais que integram os aspectos tradicionais da gestão da qualidade com os novos moldes da I4.0. O modelo em forma de engrenagem reforça a ideia de que todos os elementos (ou eixos) devem funcionar em conjunto para obtermos um sistema da qualidade eficaz. Sendo assim, este modelo vai além da simples adoção de tecnologias modernas: ele integra competência humanas, cultura organizacional, pensamento analítico e governança de dados com as novas ferramentas da I4.0	Desenvolvido com base em fundamentos do TQM e da ISO 9001:2015, além da influência do ciclo PDCA na construção da estrutura do modelo.
Modelo 2: Transformação Digital da Qualidade	Shivam e Gupta (2023)	O modelo sugere que a Q4.0 é resultado da transformação digital aplicada à gestão tradicional da qualidade através da integração com TI. Apesar de uma organização visual interessante, esse modelo reforça conceitos já amplamente discutidos na literatura, reiterando conhecimentos consolidados sobre a integração entre a qualidade tradicional e as novas tecnologias.	Baseado em princípios de Business Process Reengineering (BPR), tecnologias da I4.0 e análise de processos de qualidade existentes.
Modelo 3: Pilares do TQM 4.0	Nguyen, Nguyen e Tucek (2023)	O modelo estrutura o TQM 4.0 como uma "casa"com pilares verticais e fundamentos horizontais apoiados sobre a teoria dos sistemas sociotécnicos (STS Theory). Essa teoria defende a integração equilibrada de tecnologia e pessoas, promovendo inovação, resiliência e adaptação. Sendo assim, esse modelo propõe ajustes no modelo do TQM tradicional, trazendo a tona a importância do papel ativo do ser humano neste sistema.	Inspirado na STS Theory, que fundamenta a integração equilibrada enttre elementos técnicos e sociais.
Modelo 4: TQM no contexto da I4.0	Sader, Husti e Daróczi (2019)	O modelo visa alinhar as princípios do TQM conforme a ISO 9001:2015 com as capacidades tecnológicas da I4.0. Ele aborda os benefícios da integração tecnológica e reconhece os limites da automação, ressaltando o papel estratégico do ser humano em decisões chave.	Baseado nos princípios da ISO 9001:2015 e do TQM, com foco na adoção de tecnologias digitais para habilitar práticas da qualidade.
Modelo 5: Um modelo teórico para a Q4.0	Chiarini e Kumar (2022)	O modelo divide a Q4.0 em três principais categorias: Pessoas, Processos e Tecnologia. Essa representação é feita a partir de um estudo conduzido pelos autores em manufaturas italianas e define a Q4.0 como uma abordagem centrada no cliente e digitalmente habilitada, integrando todas essas três categorias ao longa de toda a cadeia de valor.	Concebido a partir de princípios do TQM e na estrutura da ISO 9001 além de influência práticas do *Lean Six Sigma* (LSS) como abordagens complementares à transformação digital.

Continua...

Modelo	**Autor**	**Principais características**	**Principais influências identificadas**
Modelo 6: As dimensões da Q4.0	Mtotywa (2022)	O modelo é construído a partir de sete dimensões fundamentais da Q4.0, cada dimensão integra práticas e tecnologias específicas orientadas a transformação digital, modernização e eficiência da gestão da qualidade. O modelo é então utilizado para propor um índice de maturidade em Q4.0, que permite gerar diagnósticos e comparativos dos níveis de adoção da Q4.0 pelas organizações.	Desenvolvido com base em modelos de maturidade organizacional e fundamentos do *Six Sigma* e TQM.
Modelo 7: Estrutura conceitual da Q4.0	Maganga e Taifa (2023a)	O modelo integra quatro pilares fundamentais que relacionam elementos tradicionais da gestão da qualidade com tecnologias da I4.0. Ele tem por objetivo contornar e superar limitações de modelos propostos anteriormente, combinando sistemas de gestão da qualidade atuais, práticas operacionais e o que se percebe atualmente como uma abordagem moderna da qualidade.	Construído para superar lacunas anteriores e combina práticas do TQM, Big Data e controle em tempo real.
Modelo 8: Estrutura integrada da Q4.0	Santacruz *et al.* (2023)	O modelo proposto contempla um framework que integra a metodologia DMAIC do *Six Sigma* com as ferramentas da I4.0, especialmente com ML e *Data Analytics* com o objetivo de viabilizar a manufatura com zero defeitos. Ele segue uma estrutura sequencial de etapas para a melhoria da qualidade onde cada etapa está associada a uma das fases do DMAIC.	Formulado com base no ciclo DMAIC do *Six Sigma*, e nos conceitos de Zero-Defect Manufacturing.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.6 PROPOSTA DE UM MODELO COMBINADO DA Q4.0

A Figura 28 traz a proposta do modelo combinado da Q4.0 elaborado pelo autor. Neste modelo, a estrutura é construída a partir de uma base sólida representada pelos princípios do TQM segundo a ISO 9001:2015, que refletem a filosofia moderna da gestão da qualidade. Esses princípios (foco no cliente, liderança, engajamento dos colaboradores, abordagem de processos, melhoria contínua, tomada de decisão baseada em evidências e gestão de relacionamentos) são essenciais para garantir que a evolução da qualidade mantenha o compromisso com a excelência operacional.

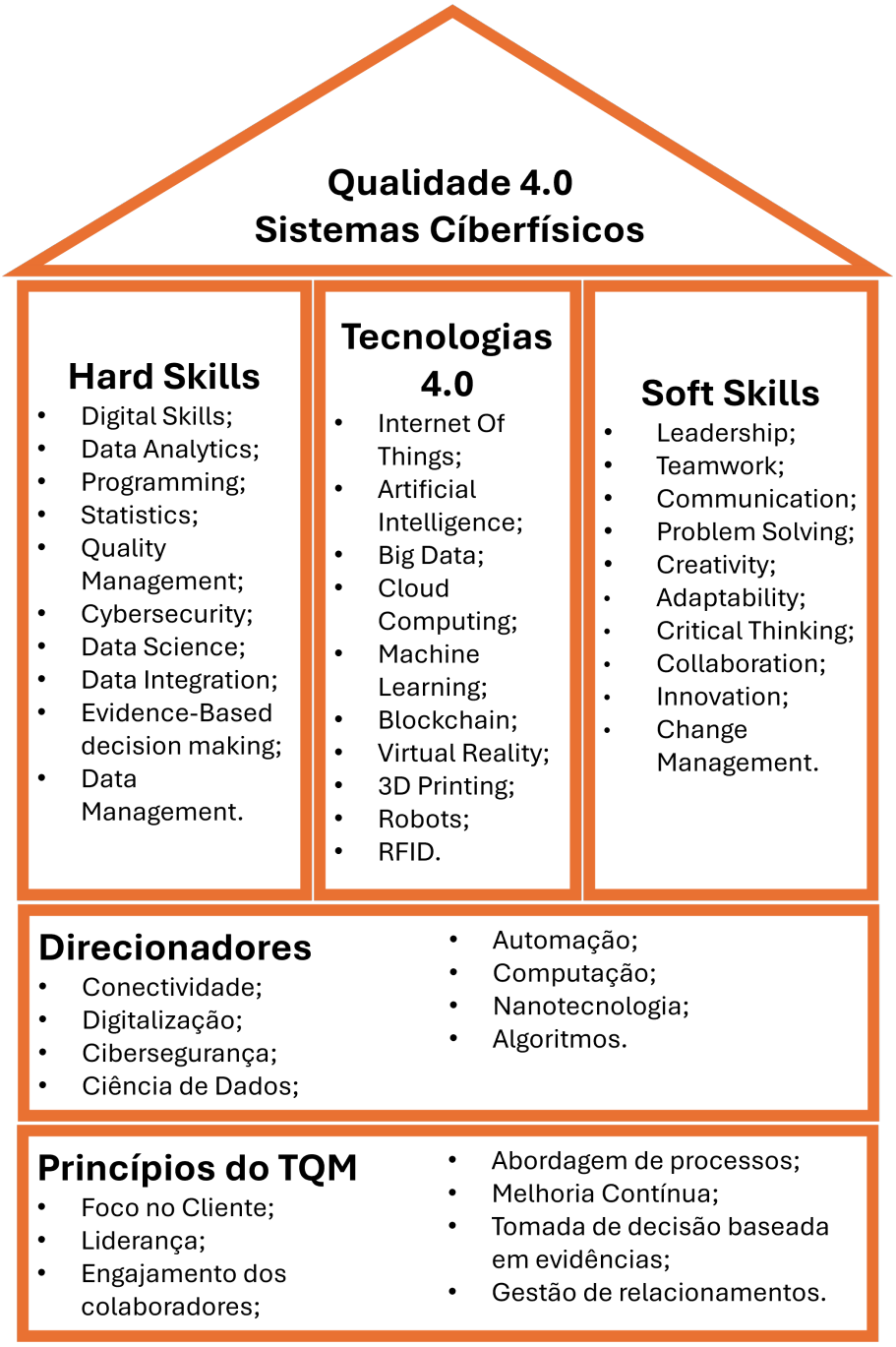
Acima dos princípios do TQM, encontra-se uma base denominada "Direcionadores", composta por termos identificados na RSL. Esses termos representam conceitos fundamentais da Q4.0 e funcionam como elo de ligação entre os princípios do TQM e as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Três pilares erguem-se sobre essa base em face a compor os elementos necessários à integração da qualidade nos CPS. O pilar central é representado pelas Tecnologias 4.0, que envolvem conceitos como IoT, IA, Big Data, CC e ML. Nas extremidades da

estrutura, os pilares das *Hard Skills* e *Soft Skills* amparam o pilar central, abarcando as competências técnicas (Digital Skills, Data Analytics, Programming, Statistics, Quality Management) e pessoais (Leadership, Teamwork, Communication, Problem Solving, Creativity, Adaptability) fundamentais para a implementação e gestão das tecnologias mencionadas.

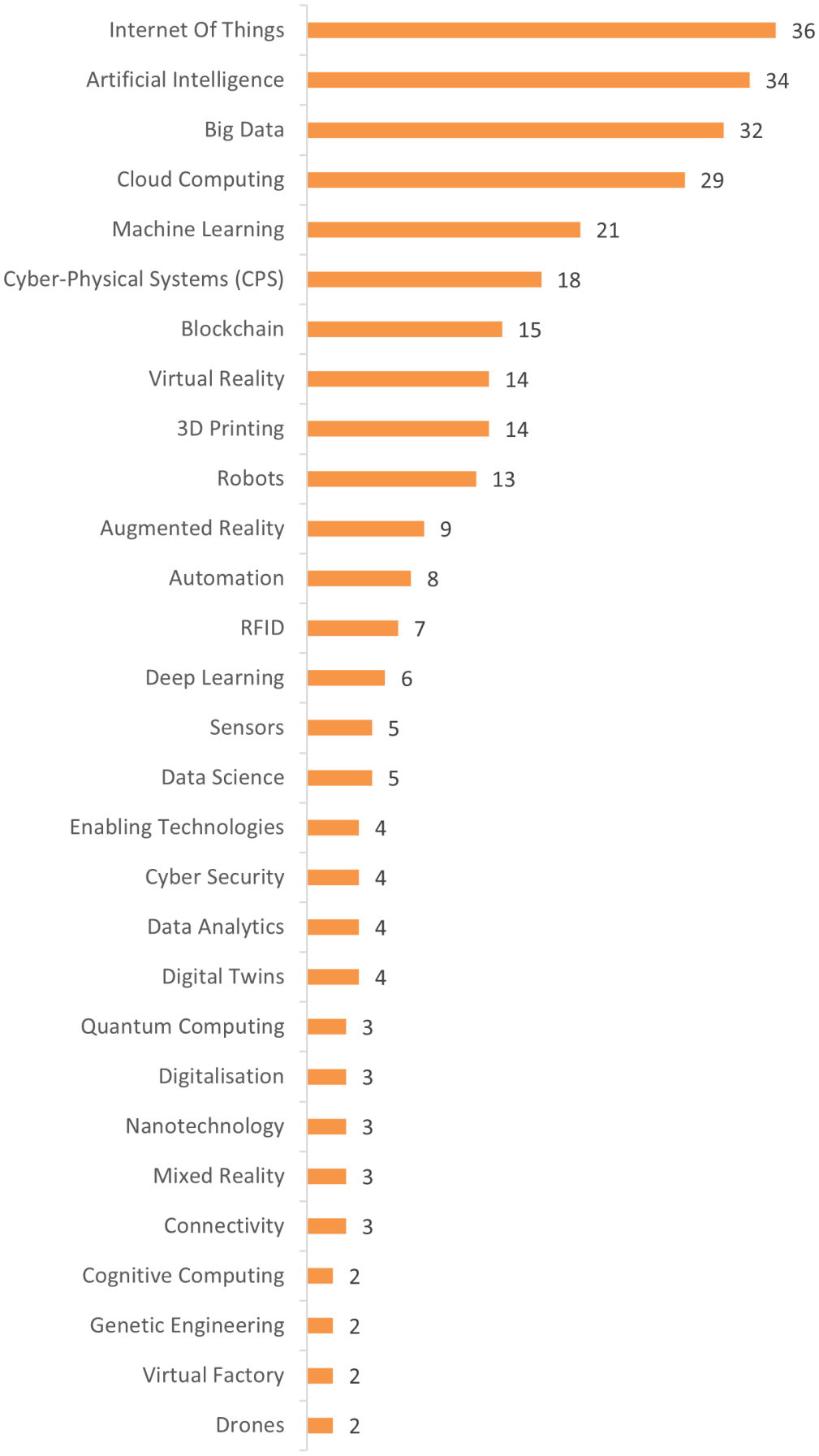
A integração das competências técnicas e sociais, essenciais à nova era digital, às tecnologias 4.0, sustentada pelos princípios da gestão da qualidade moderna, alinhados ao TQM e formalizados pela ISO 9001:2015, orienta a formação concisa de sistemas ciberfísicos robustos, capazes de operar indústrias de maneira eficiente e inovadora no contexto da I4.0.

Figura 28 – Modelo Combinado da Q4.0



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 16 – Tecnologias mais recorrentes da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi identificar os principais direcionadores da gestão da qualidade no contexto da I4.0, elaborando assim uma proposta de modelo conceitual da Q4.0 através da execução de uma análise bibliométrica seguida de revisão sistemática da literatura e análise crítica dos modelos estruturados propostos.

A análise bibliométrica permitiu o mapeamento dos principais termos, autores, fontes, países e publicações relacionadas à Q4.0. Por sua vez, a RSL resultou na seleção e avaliação crítica de 46 artigos pertinentes, dos quais foi possível identificar 29 tecnologias ou termos associados à Q4.0, além das principais competências técnicas (*hard skills*) e sociais (*soft skills*) exigidas nesse novo cenário industrial. A análise de oito modelos estruturados presentes na amostra de documentos permitiu a elaboração de um modelo combinado da Q4.0, articulando três pilares princiais: tecnologias 4.0, *hard skills* e *soft skills*, todos sustentados por fundamentos da gestão da qualidade moderna, os pilares do TQM segundo a ISO 9001:2015.

As principais contribuições deste trabalho residem na sistematização de conhecimentos dispersos sobre a Q4.0, na identificação das tecnologias e competências essenciais a essa nova era da Qualidade e na consolidação de um modelo conceitual para a Q4.0. Esse modelo pode ser utilizado como referência teórica para pesquisadores e profissionais interessados em compreender o novo contexto digital promovido pela I4.0 no âmbito da gestão da qualidade.

No entanto, o trabalho apresenta limitações: os dados analisados são provenientes apenas de artigos indexados às bases Scopus e WoS, o que pode restringir a abrangência das evidências utilizadas. Além disso, trata-se de um tema ainda emergente, o que reflete na quantidade reduzida de publicações científicas específicas disponíveis, dificultando uma exploração mais aprofundada.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a construção de análise mais aprofundada a respeito do papel do agente humano no contexto da Q4.0. Além disso, adaptações e construções de modelos que integrem o conceito de sustentabilidade à Q4.0 são pertinentes. Por fim, sugere-se a construção de ferramentas ou modelos que conduzam melhorias práticas nas organizações nessa nova era digital, a exemplo de modelos de PDCA 4.0 para melhoria de processos ou modelos de SDCA 4.0 para a condução de projetos de padronização.

REFERÊNCIAS

ACHARJYA, D. P.; GEETHA, M. K. (Ed.). **Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications**. Cham: Springer, 2017.

ALRABADI, T.; TALIB, Z.; ABDULLAH, N. The Role of Quality 4.0 in Supporting Digital Transformation: Evidence from Telecommunication Industry. **International Journal of Data and Network Science**, 2023.

AMANKWAH-AMOAH, Joseph; KHAN, Zaheer; WOOD, Geoffrey; KNIGHT, Gary. COVID-19 and digitalization: The great acceleration. **Journal of Business Research**, v. 136, p. 602–611, 2021. ISSN 0148-2963.

ANTONY, J.; KAUL, A.; BHAT, S.; SONY, M.; KAUL, V.; ZULFIQAR, M.; MCDERMOTT, O. Critical Failure Factors for Quality 4.0: An Exploratory Qualitative Study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2024.

ANTONY, J.; MCDERMOTT, O.; SONY, M. Quality 4.0 Conceptualisation and Theoretical Understanding: A Global Exploratory Qualitative Study. **The TQM Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 34, n. 5, p. 1169–1188, 2022.

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 and Business Excellence**, v. 34, n. 7-8, p. 827–846, 2023.

ANTONY, J.; SONY, M.; MCDERMOTT, O.; JAYARAMAN, R.; FLYNN, D. An exploration of organisational readiness factors for Quality 4.0: An intercontinental study and future research directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 40, n. 2, p. 582–606, 2023.

ANTONY, Jiju; SONY, Michael; FURTERER, Sandra; MCDERMOTT, Olivia; PEPPER, Matthew. Quality 4.0 and its impact on organizational performance: an integrative viewpoint. **The TQM Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 34, n. 6, p. 2069–2084, 2022.

AVILÉS-SACOTO, Sonia Valeria; VELASCO-TAPIA, Kenya Cristina; AVILÉS-SACOTO, Estefanía Caridad; ARGÜELLO-HERRERA, Juan Ignacio. Innovating for impact: Proposing quality 4.0 integration to achieve sustainable

development goals in microenterprises. **Business Strategy & Development**, v. 7, n. 2, e371, 2024.

AZEVEDO, Rogério Cabral; ENSSLIN, Leonardo. **Metodologia da Pesquisa para Engenharias**. 1. ed. [*S.l.*]: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), 2020. ISBN 978-65-00-10268-0.

BAI, Chunguang; DALLASEGA, Patrick; ORZES, Guido; SARKIS, Joseph. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107776, 2020. ISSN 0925-5273.

BONEKAMP, L.; SURE, M. Consequences of Industry 4.0 on human labour and work organisation. **Journal of Business and Media Psychology**, v. 6, n. 1, p. 33–40, 2015.

BOUSDEKIS, Alexandros; LEPENIOTI, Konstantina; APOSTOLOU, Dimitris; MENTZAS, Gregoris. Data Analytics in Quality 4.0: Literature Review and Future Research Directions. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 36, n. 1, p. 1–21, 2023.

CALVO-MORA, A.; PEDRO, E.; SUAREZ, E. Exploring Barriers To Quality 4.0 Implementation: A Multivariate Analysis. **The TQM Journal**, 2024.

CARMELI, Abraham; SPREITZER, Gretchen M. Trust, connectivity, and thriving: Implications for innovative behaviors at work. **The Journal of Applied Behavioral Science**, v. 45, n. 2, p. 145–156, 2009.

CHANDLER, A. **The visible hand: the managerial revolution in American business**. Cambridge, MA: Belknap Press, 1993.

CHEN, Min; HERRERA, Francisco; HWANG, Kai. Cognitive Computing: Architecture, Technologies and Intelligent Applications. **IEEE Access**, v. 6, p. 19774–19783, 2018.

CHIARINI, Andrea. Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research. **The TQM Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 32, n. 4, p. 603–616, 2020.

CHIARINI, Andrea; KUMAR, Maneesh. What is Quality 4.0? An exploratory sequential mixed methods study of Italian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 60, n. 16, p. 4890–4910, 2022.

CORDEIRO, Maria Cristina Rocha. **Engenharia Genética: conceitos básicos, ferramentas e aplicações**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. v. 86. (Documentos / Embrapa Cerrados). 1ª edição.

CROSBY, Philip B. **Quality is Free: The Art of Making Quality Certain**. New York: McGraw-Hill, 1979.

DA SILVA, C.; NASCIMENTO, J.; FERRAZ, M.; ROBERTO, J.; SOARES, M.; CAXIAS, C. Quality 4.0: Emerging Technologies and Applications. **GeSec**, 2023.

DALE, B. G. **Managing Quality**. 4. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2003.

DAVIS, S. **Future perfect**. [*S.l.*]: Basic Books, 1997.

DEMING, W. E. **Out of the crisis**. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.

DROR, S. QFD for Selecting Key Success Factors in the Implementation of Quality 4.0. **Quality and Reliability Engineering International**, 2022.

EFIMOVA, A.; BRIS, P. Quality 4.0 for Processes and Customers. **Quality Innovation Prosperity**, 2021.

FADILASARI, Diska Prini; GHATAK, Ranjit Roy; GARZA-REYES, Jose Arturo; JOSHI, Rohit; KANDASAMY, Jayakrishna. Adopting quality management practices in the industry 4.0 era: an investigation into the challenges. **Total Quality Management Business Excellence**, v. 35, n. 9-10, p. 1098–1123, 2024.

FEIGENBAUM, Armand V. **Total Quality Control**. New York: McGraw-Hill, 1951.

FULLER, Aidan; FAN, Zhong; DAY, Charles; BARLOW, Chris. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. **IEEE Access**, v. 8, p. 108952–108971, 2020.

GARVIN, David A. **Managing Quality: The Strategic and Competitive Edge**. New York: Free Press, 1988.

GHOBAKHLOO, Morteza. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119869, 2020. ISSN 0959-6526.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0: the Industrial Internet of Things**. Berkeley: Apress, 2016.

GLOGOVAC, M.; RUSO, J.; ARSIC, S.; RAKIC, A.; MILOSEVIC, I. Leadership for Quality 4.0 Improvement, Learning, and Innovation. **Engineering Management Journal**, 2023.

GONZALEZ, S.E.; ROMERO, D.; NOGUEZ, J.; WUEST, T. Integrated Quality 4.0 Framework for Quality Improvement Based on Six Sigma and Machine Learning Techniques Towards Zero-Defect Manufacturing. **The TQM Journal**, 2024.

HUANG, Z.; SHAHZADI, A.; KHAN, Y. Unfolding the Impact of Quality 4.0 Practices on Industry 4.0 and Circular Economy Practices: A Hybrid SEM-ANN Approach. **Sustainability**, 2022.

JACOB, D. Getting digitally connected to transform quality management. *In*: QUALITY 4.0 Impact and Strategy Handbook Connect. [*S.l.*]: ASQ (American Society for Quality), 2017.

JAGATHEESAPERUMAL, S. K.; RAHOUTI, M.; AHMAD, K.; AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M. The duo of artificial intelligence and big data for industry 4.0: review of applications, techniques, challenges, and future research directions. **IEEE Internet of Things Journal**, p. 1–33, 2021.

JAMKHANEH, H.; SHAHIN, A.; PARKOUHI, S.; SHAHIN, R. The New Concept of Quality in the Digital Era: A Human Resource Empowerment Perspective. **The TQM Journal**, 2022.

JAVAID, M.; HALEEM, A.; SINGH, R.P.; SUMAN, R. Significance of Quality 4.0 towards comprehensive enhancement in manufacturing sector. **Sensors International**, v. 2, p. 100109, 2021.

JOKOVIC, Z.; JANKOVIC, G.; JANKOVIC, S.; SUPUROVIC, A.A.; MAJSTOROVIC, V. Quality 4.0 in Digital Manufacturing - Example of Good Practice. **Quality Innovation Prosperity**, 2023.

JOSHI, S.; SHARMA, M.; LUTHRA, S.; GARZA-REYES, J.A.; ANBANANDAM, R. An assessment framework to evaluate the critical success factors to Quality 4.0 transition

in developing countries: a case experience of sustainable performance of Indian manufacturers. **The TQM Journal**, v. 36, n. 6, p. 1756–1793, 2024.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes *et al.* Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie**, v. 4, n. 0, p. 82, 2013.

KANIGEL, Robert. **The One Best Way: Frederick Winslow Taylor and the Enigma of Efficiency**. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.

KLAPUT, P.; HERCIK, R.; MACHACEK, Z.; NOSKIEVICOVA, D.D.; DOSTAL, V.; VYKYDAL, D. Mutual Combination of Selected Principles and Technologies of Industry 4.0 and Quality Management Methods - Case Study. **Quality Engineering**, 2024.

LIU, Z.; MEYENDORF, N.; MRAD, N. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *In*: PROC. Annu. Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval. Provo, UT, USA: [*s.n.*], 2018. Art. no. 020023.

MAGANGA, D.; TAIFA, I. Determining The Maturity Level For The Selected Manufacturing Industries Through Industry 4.0 Perspectives. **International Journal of Management Decision Making**, 2024.

MAGANGA, D.P.; TAIFA, I.W.R. Quality 4.0 conceptualisation: an emerging quality management concept for manufacturing industries. **The TQM Journal**, v. 35, n. 2, p. 389–413, 2023.

MAGANGA, Deusdedith Pastory; TAIFA, Ismail W.R. The Readiness of Manufacturing Industries to Transit to Quality 4.0. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 40, n. 5, p. 1152–1173, 2023.

MARGHERITA, Emanuele Gabriel; BRACCINI, Alessio Maria. The impact of Industry 4.0 technologies and the soft side of TQM on organisational performance: a multiple case study analysis on manufacturing organisations. **The TQM Journal**, Emerald Publishing Limited, v. 36, n. 3, p. 812–831, 2024.

MARTÍN, A. M.; MALEA, E. O.; THELWALL, M.; COZÁR, E. D. L. Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. **Journal of Informetrics**, v. 12, n. 4, p. 1160–1177, 2018.

MITTAL, A.; SACHAN, S.; KUMAR, V.; VARDHAN, S.; VERMA, P.; KASWAN, M.; GARZA-REYES, J.A.; ARTURO, A. Essential Organizational Variables for the Implementation of Quality 4.0: Empirical Evidence from the Indian Furniture Industry. **The TQM Journal**, 2024.

MOHER, David; LIBERATI, Alessandro; TETZLAFF, Jennifer; ALTMAN, Douglas G.; GROUP, The PRISMA. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. **BMJ**, v. 339, b2535, 2009.

MTOTYWA, Matolwandile Mzuvukile. Developing a Quality 4.0 Maturity Index for Improved Business Operational Efficiency and Performance. **Quality Innovation Prosperity**, Quality Innovation Prosperity, v. 26, n. 2, p. 101–127, 2022.

NGUYEN, Thi Anh Van; NGUYEN, Khac Hieu; TUCEK, David. Total Quality Management 4.0 Framework: Present and Future. **Operations and Supply Chain Management**, Emerald Publishing Limited, v. 16, n. 3, p. 311–322, 2023.

NGUYEN, Thi Anh Van; TUCEK, David; PHAM, Nhat Tan; NGUYEN, Khac Hieu. Quality 4.0 practices toward sustainable excellence in the manufacturing sector. **Total Quality Management Business Excellence**, v. 35, n. 13-14, p. 1593–1610, 2024.

NVIDIA. **Virtual Factories and Industrial Digitalization**. [*S.l.*: *s.n.*], 2021. Accessed: 2025-03-07. Disponível em: https://blogs.nvidia.com/blog/virtual-factories-industrial-digitalization/.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n71, 2021.

PHILIP CHEN, C.L.; ZHANG, Chun-Yang. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. **Information Sciences**, v. 275, p. 314–347, 2014. ISSN 0020-0255.

PRASHAR, A. Quality Management in Industry 4.0 Environment: A Morphological Analysis and Research Agenda. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2023.

PRITCHARD, Alan. Statistical Bibliography or Bibliometrics? **Journal of Documentation**, v. 25, n. 4, p. 348–349, 1969.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 model for circular economy and cleaner production. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 123853, 2020.

RICO, J.; 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**, 2024.

RODRIGUES, Leticia Francischini; JESUS, Rodrigo Aguiar de; SCHÜTZER, Klaus. Industrie 4.0: Uma revisão da literatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 19, n. 38, p. 33–45, 2016.

ROGALA, P.; BRZOZOWSKI, T.; PANKOWSKA, M. Insights into Quality Professionals' Adoption of Quality 4.0 in the High-Tech Industry. **The TQM Journal**, 2024.

SADER, S.; HUSTI, I.; DARÓCZI, M. Industry 4.0 as a Key Enabler toward Successful Implementation of Total Quality Management Practices. **Periodica Polytechnica Social and Management Sciences**, v. 27, n. 2, p. 131–140, 2019.

SADER, Sami; HUSTI, Istvan; DAROCZI, Miklos. A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. **Total Quality Management & Business Excellence**, Routledge, v. 33, n. 9-10, p. 1164–1182, 2022.

SANTACRUZ, Elisa Gonzalez; ROMERO, David; NOGUEZ, Julieta; WUEST, Thorsten. Integrated Quality 4.0 Framework for Quality Improvement Based on Six Sigma and Machine Learning Techniques Towards Zero-Defect Manufacturing. **Unknown Journal**, 2023.

SHEWHART, W. A. Quality control charts. **Bell System Technical Journal**, v. 5, n. 4, p. 593–602, 1926.

SHIVAM; GUPTA, Manish. Quality process reengineering in industry 4.0: A BPR perspective. **Quality Engineering**, Taylor & Francis, v. 35, n. 1, p. 110–129, 2023.

SONY, M.; ANTONY, J.; DOUGLAS, J.; MCDERMOTT, O. Motivations, Barriers and Readiness Factors for Quality 4.0 Implementation: An Exploratory Study. **The TQM Journal**, 2021.

SORDAN, J.E.; OPRIME, P.C.; PIMENTA, M.L.; ANDERSSON, R.; ANTONY, J.; GARZA-REYES, J.A.; LUZ TORTORELLA, G. Lean Six Sigma practices supported by Industry 4.0 technologies: evidence from heavy vehicle manufacturers. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 36, n. 2, p. 504–533, 2025.

STEFANOVIC, M.; WAWAK, S.; POPKOVA, E.; ERIC, M.; MILAN, M.; MITROVIC, S.; DJORDJEVIC, A.; DJORDJEVIC, M.Z. From Quality 4.0 to Quality 5.0 - The Transition Roadmap. **International Journal of Quality Research**, 2024.

SURESHCHANDAR, G.S. Quality 4.0 – A Measurement Model Using the Confirmatory Factor Analysis (CFA) Approach. **International Journal of Quality Reliability Management**, Emerald Publishing Limited, v. 40, n. 1, p. 280–303, 2023.

SURESHCHANDAR, G.S. Quality 4.0 – understanding the criticality of the dimensions using the analytic hierarchy process (AHP) technique. **International Journal of Quality Reliability Management**, v. 39, n. 6, p. 1336–1367, 2022.

TALAIE, H.; ZIAEIAN, M.; MALEKINEJAD, P. Towards Quality 4.0 in Home Appliances: Definitions, Deployment Scenarios, and Future Perspectives. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2024.

THEKKOOTE, R. Enabler Toward Successful Implementation of Quality 4.0 in Digital Transformation Era: A Comprehensive Review and Future Research Agenda. **International Journal of Quality & Reliability Management**, 2022.

TOLEDO, José Carlos de; AIRES, Miguel Ángel Borrás; MERGULHÃO, Ricardo Coser; MENDES, Glauco Henrique de Sousa. **Qualidade - Gestão e Métodos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 9788521621171.

VINODH, S.; WANKHEDE, V.; MURUGANANTHAM, G. Analysis of Critical Success Factors of Quality 4.0 Implementation in Manufacturing SMEs Using Best-Worst Method. **The TQM Journal**, v. 36, n. 5, p. 1234–1250, 2024.

VIRMANI, N.; UPADHYAY, M.; LUTHRA, S.; SINGH, S.; UPADHYAY, A. Assessing Solutions To Overcome Quality 4.0 Barriers: A Decision-Making Framework. **The TQM Journal**, 2024.

VLAD, F.; SEVERIN, I. Management Through Processes in SMEs Using Quality 4.0. **Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering**, 2022.

WANG, Lihui; TÖRNGREN, Martin; ONORI, Mauro. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 517–527, 2015. ISSN 0278-6125.

WAWAK, S.; TEIXEIRA DOMINGUES, J.P.; SAMPAIO, P. Quality 4.0 in higher education: reinventing academic-industry-government collaboration during disruptive times. **The TQM Journal**, v. 36, n. 6, p. 1569–1590, 2024.

WELLER, Christian; KLEER, Robin; PILLER, Frank T. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production Economics**, v. 164, p. 43–56, 2015. ISSN 0925-5273.

WOMACK, J.P. **A máquina que mudou o mundo**. [*S.l.*]: ELSEVIER EDITORA, 2004. ISBN 9788535212693.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018.

XU, Min; DAVID, Jeanne M; KIM, Suk Hi *et al.* The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. **International journal of financial research**, v. 9, n. 2, p. 90–95, 2018.

XU, Xun; LU, Yuqian; VOGEL-HEUSER, Birgit; WANG, Lihui. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. **Journal of manufacturing systems**, Elsevier, v. 61, p. 530–535, 2021.

ZHENG, Kaixin; DENG, Yujia; ZHANG, Min; HE, Zhen. Leadership for quality 4.0: development and validation of a multidimensional measure. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 35, n. 11-12, p. 1233–1254, 2024.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. **J. Ambient Intell. Humanized Comput.**, v. 10, n. 3, p. 1141–1153, jun. 2018.

ZONNENSHAIN, Avigdor; KENETT, Ron S. Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. **Quality Engineering**, Taylor & Francis, v. 32, n. 4, p. 614–626, 2020.