EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Transformação digital das ferramentas clássicas da qualidade no contexto da Quality 4.0: uma revisão integrativa

Ghessyca Aparecida do Bonfim
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - UTFPR
Joao Luiz Kovaleski
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) - UTFPR
Carlos Daniel Mota de Mello
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) - UTFPR
Luis Guilherme Soatos de Jesus
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) – UTFPR
Kenny Yusimy Garcia Angarita
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ) – UEM

Resumo: A transformação digital tem ampliado as possibilidades de coleta, integração e análise de dados nos sistemas de gestão da qualidade, modificando também a aplicação de ferramentas tradicionalmente utilizadas no controle e na melhoria de processos. Nesse contexto, a Quality 4.0 articula fundamentos consolidados da gestão da qualidade às tecnologias associadas à Indústria 4.0. Este estudo analisa como ferramentas clássicas da qualidade vêm incorporando tecnologias digitais e compara a intensidade dessa transformação. Para isso, foi realizada uma revisão integrativa da literatura, com seleção, extração e análise comparativa dos estudos identificados. Os resultados evidenciam trajetórias distintas de transformação. CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma apresentaram maior intensidade de incorporação digital na literatura analisada; a FMEA apresentou intensidade moderada a alta, enquanto o PDCA apresentou intensidade predominantemente moderada, ambos com evidências diretas consolidadas; e Pareto, Ishikawa, Fluxograma e 5W2H apresentaram menor intensidade, com evidências diretas ainda incipientes ou ausentes. A análise foi estruturada em cinco dimensões: integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão. A partir dos resultados, propõe-se um framework conceitual que articula tecnologias habilitadoras, dimensões analíticas e intensidade de incorporação digital. O estudo contribui para sistematizar como as capacidades associadas à Quality 4.0 vêm modificando a operacionalização das ferramentas clássicas sem substituir seus fundamentos metodológicos.

Palavras-chave: Gestão da Qualidade; Indústria 4.0; Tecnologias Digitais; Inteligência Analítica; Melhoria Contínua.

Digital Transformation of Classical Quality Tools in the Context of Quality 4.0: An Integrative Review

Abstract: Digital transformation has expanded the possibilities for data collection, integration, and analysis in quality management systems, also changing the application of tools traditionally used for process control and improvement. In this context, Quality 4.0 combines established quality management principles with technologies associated with Industry 4.0. This study analyzes how classical quality tools have incorporated digital technologies and compares the intensity of this transformation. An integrative literature review was conducted through the selection, extraction, and comparative analysis of the identified studies. The results reveal different transformation trajectories. SPC and DMAIC/Six Sigma showed the highest intensity of digital incorporation in the analyzed

literature; FMEA showed moderate-to-high intensity, while PDCA showed predominantly moderate intensity, both with consolidated direct evidence; while Pareto, Ishikawa, Flowchart, and 5W2H showed lower intensity, with direct evidence still incipient or absent. The analysis was structured into five dimensions: digital integration, data utilization, analytical intelligence, automation, and decision support. Based on the findings, a conceptual framework is proposed linking enabling technologies, analytical dimensions, and the intensity of digital incorporation. The study contributes to systematizing how capabilities associated with Quality 4.0 are changing the operationalization of classical quality tools without replacing their methodological foundations.

Keywords: Quality Management; Industry 4.0; Digital Technologies; Analytics; Continuous Improvement.

1. Introdução

A transformação digital tem promovido mudanças nos sistemas produtivos e nos modelos de gestão por meio de tecnologias associadas à Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML), Big Data Analytics, computação em nuvem e sistemas ciberfísicos. Na gestão da qualidade, a integração dessas tecnologias aos princípios e práticas tradicionais impulsionou a Quality 4.0, ampliando a conectividade, a análise de dados, a automação e o suporte à tomada de decisão (SONY; ANTONY; DOUGLAS, 2020; LIU et al., 2023).

A Quality 4.0 não pressupõe a substituição dos fundamentos tradicionais da gestão da qualidade, mas sua evolução mediante a incorporação de capacidades digitais (SONY; ANTONY; DOUGLAS, 2020). Nesse contexto, práticas de controle, melhoria contínua e solução de problemas passam a incorporar monitoramento em tempo real, integração de dados e recursos analíticos. Ferramentas como PDCA, Controle Estatístico de Processos (CEP/SPC), FMEA, DMAIC/Six Sigma, Diagrama de Pareto, Diagrama de Ishikawa, Fluxograma e 5W2H permanecem relevantes, embora apresentem diferentes intensidades de transformação digital.

Embora a literatura sobre Quality 4.0 tenha avançado na discussão de tecnologias habilitadoras, fatores de implementação e transformação dos sistemas de gestão da qualidade (SONY; ANTONY; DOUGLAS, 2020; BOUSDEKIS et al., 2023), ainda são menos frequentes análises comparativas centradas nas próprias ferramentas da qualidade. Essa lacuna é relevante, pois suas diferentes características metodológicas podem resultar em distintas possibilidades de integração digital.

Diante dessa lacuna, este artigo tem como objetivo analisar a transformação das ferramentas clássicas da gestão da qualidade no contexto da Quality 4.0, identificando as tecnologias digitais associadas, as mudanças em sua aplicação e as diferenças na intensidade de incorporação de capacidades digitais. Adicionalmente, propõe-se um framework conceitual estruturado nas dimensões de integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão.

Para isso, realizou-se uma revisão integrativa da literatura, com procedimentos sistematizados de busca, seleção, extração e síntese dos estudos. As evidências foram analisadas comparativamente para identificar tecnologias associadas, padrões de transformação e diferenças entre as ferramentas investigadas.

2. Metodologia

Este trabalho se caracteriza como uma revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e caráter exploratório descritivo. O objetivo foi compreender como as ferramentas clássicas da gestão da qualidade vêm incorporando tecnologias digitais no contexto da Quality 4.0. Para isso, o percurso metodológico envolveu a definição do problema de pesquisa, a construção da estratégia de busca, a triagem dos estudos, a extração das informações e a síntese comparativa das evidências.

A busca foi realizada na base Scopus, considerando publicações entre 2018 e 2026. Esse recorte se justifica porque a literatura sobre Quality 4.0 se consolidou a partir de 2018 e, nos últimos anos, surgiram estudos com evidências diretas para ferramentas como FMEA, PDCA e Ishikawa, que antes apareciam pouco nesse debate. A estratégia combinou termos sobre Quality 4.0, transformação digital e ferramentas da qualidade, com operadores booleanos: ("Quality 4.0" OR "Industry 4.0" OR "digital transformation") AND ("quality tools" OR "Statistical Process Control" OR SPC OR "Six Sigma" OR DMAIC OR FMEA OR PDCA OR "Deming cycle" OR "Pareto" OR "Ishikawa" OR "fishbone" OR "root cause analysis" OR "flowchart" OR "5W2H" OR "quality management").

Foram incluídos estudos que mostrassem relação substantiva entre tecnologias ou capacidades digitais e as ferramentas e práticas clássicas da qualidade, sempre com evidência direta dessa incorporação, por meio de aplicação empírica, estudo de caso, proposta metodológica ou revisão dedicada a uma ferramenta. Revisões amplas, sem esse foco específico, foram tratadas como literatura de apoio e usadas para fundamentar a discussão conceitual. Na triagem inicial, eliminaram-se duplicados, publicações fora do recorte e trabalhos sem aderência temática; na análise em texto completo, saíram os falsos positivos terminológicos e os estudos que mencionavam as ferramentas apenas de passagem. Das 383 publicações retornadas, 22 foram analisadas em profundidade e seis compuseram o corpus principal, todos com evidência direta de transformação digital em CEP/SPC, DMAIC/Six Sigma, FMEA, PDCA e Ishikawa.

Os seis estudos foram sistematizados em uma matriz de extração com informações sobre objetivo, abordagem metodológica, contexto de aplicação, ferramenta estudada, tecnologia associada, transformação observada, benefícios, limitações e principais contribuições. As evidências foram examinadas de forma comparativa a partir de cinco dimensões: integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão. A intensidade de incorporação foi interpretada de maneira qualitativa, com base na consistência e na recorrência das evidências, sem a pretensão de aplicar uma escala de maturidade validada. Para as ferramentas sem evidências diretas suficientes no corpus, a classificação assumiu caráter inferencial, apoiada na literatura de apoio e na natureza conceitual de cada ferramenta.

3. Referencial Teórico

3.1 Gestão da Qualidade Total e evolução para Quality 4.0

A gestão da qualidade evoluiu de abordagens centradas na inspeção e no controle de produtos para perspectivas orientadas à prevenção, melhoria contínua e integração da qualidade aos processos organizacionais. Nesse percurso, a Gestão da Qualidade Total (Total Quality Management – TQM) consolidou uma abordagem sistêmica fundamentada no envolvimento organizacional, orientação ao cliente, melhoria contínua e tomada de decisão baseada em informações (BRODAY, 2022; LIU et al., 2023).

Figura 1 – Framework de quatro dimensões da Quality 4.0



Fonte: Liu et al. (2023)

A Figura 1 sintetiza a evolução da gestão da qualidade em direção a abordagens mais conectadas e orientadas por dados, conforme discutido por Liu et al. (2023). Com a transformação digital associada à Indústria 4.0, novas tecnologias passaram a ampliar a geração, integração e análise de dados nos sistemas produtivos, favorecendo a emergência da Quality 4.0, caracterizada pela integração entre fundamentos consolidados da gestão da qualidade e capacidades digitais (CHIARINI, 2020; SADER; HUSTI; DARÓCZI, 2022). Essa abordagem não substitui os princípios tradicionais da qualidade, mas amplia suas capacidades por meio de maior conectividade, disponibilidade de dados e suporte analítico à tomada de decisão (SAIHI; AWAD; BEN-DAYA, 2023).

Essa transição também amplia as exigências impostas às organizações. A implementação da Quality 4.0 não depende exclusivamente da adoção de tecnologias, mas envolve fatores relacionados à estratégia, cultura organizacional, competências profissionais, liderança e capacidade de integração entre recursos tecnológicos e práticas de gestão. Nesse sentido, a transformação digital da qualidade deve ser compreendida como um processo simultaneamente tecnológico e organizacional (ANTONY; MCDERMOTT; SONY, 2022).

A evolução para a Quality 4.0 cria, assim, condições para modificar a maneira pela qual diferentes práticas da qualidade são executadas. Entretanto, essas transformações não ocorrem de forma homogênea, pois tecnologias, aplicações e níveis de integração variam conforme o contexto organizacional e a finalidade das práticas analisadas. Essa heterogeneidade torna necessária a compreensão das principais tecnologias associadas à transformação digital da qualidade (SADER; HUSTI; DARÓCZI, 2022).

3.2 Tecnologias habilitadoras da Quality 4.0

A operacionalização da Quality 4.0 envolve a integração de tecnologias digitais capazes de ampliar a coleta, o processamento e a análise de dados relacionados à qualidade, entre as quais se destacam Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML), computação em nuvem, sistemas ciberfísicos e Digital Twins (CHIARINI, 2020; SADER; HUSTI; DARÓCZI, 2022; SAIHI; AWAD; BEN-DAYA, 2023).

A IoT possibilita a conexão entre sensores, equipamentos e sistemas, favorecendo a aquisição contínua de dados dos processos. Associados ao Big Data, esses recursos ampliam a capacidade de integrar e analisar grandes volumes de informações para identificar padrões relevantes ao controle da qualidade (ESCOBAR; MCGOVERN; MORALES-MENENDEZ, 2021). Em um ambiente orientado por dados, técnicas de IA e ML ampliam a capacidade analítica por meio do reconhecimento de padrões, classificação e previsão, enquanto os Digital Twins permitem a representação digital de processos e sua integração com dados operacionais e recursos analíticos (CHRISTOU et al., 2022).

A relevância dessas tecnologias decorre de sua atuação complementar: dispositivos conectados geram dados, infraestruturas digitais os armazenam e processam, e recursos analíticos os transformam em informações para apoiar a decisão. A disponibilidade tecnológica, porém, não assegura sua efetiva incorporação à gestão da qualidade, pois fatores como infraestrutura, integração entre sistemas, qualidade dos dados e competências profissionais condicionam esse processo (ANTONY; MCDERMOTT; SONY, 2022; SAIHI; AWAD; BEN-DAYA, 2023).

3.3 Ferramentas clássicas da gestão da qualidade no contexto digital

As ferramentas e metodologias clássicas da gestão da qualidade permanecem relevantes diante da transformação digital. A Quality 4.0 não pressupõe sua substituição, mas amplia suas possibilidades de aplicação por meio da conectividade, da disponibilidade de dados, da capacidade analítica e da automação (CHIARINI, 2020; LIU et al., 2023). Recursos digitais podem modificar diferentes etapas de utilização dessas práticas, desde a aquisição e integração de dados até sua análise, visualização e uso no suporte à decisão. Essa

incorporação, porém, não ocorre de maneira homogênea. Métodos fortemente baseados em dados quantitativos e procedimentos estruturados favorecem a integração com aquisição automatizada e recursos analíticos, enquanto ferramentas predominantemente qualitativas, visuais ou colaborativas permanecem mais dependentes da interpretação e da participação humana.

Nesse sentido, é importante distinguir a simples digitalização da forma de utilização de uma ferramenta da ampliação efetiva de suas capacidades analíticas ou decisórias. O uso de plataformas digitais para registrar, representar ou compartilhar informações não implica, por si só, a incorporação de capacidades preditivas, inteligência analítica ou automação ao funcionamento da ferramenta. Ferramentas e métodos como CEP/SPC, DMAIC/Six Sigma, FMEA, PDCA, Pareto, Ishikawa, Fluxograma e 5W2H podem apresentar diferentes formas e intensidades de incorporação digital. Neste estudo, essa análise considera as evidências quanto à integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão, permitindo comparar as transformações documentadas na literatura sem pressupor que todas as ferramentas apresentem o mesmo grau de integração tecnológica.

4. Resultados e Discussão

4.1 Caracterização dos estudos analisados

A análise da literatura evidenciou diferentes perspectivas de investigação relacionadas à transformação digital da gestão da qualidade. Os trabalhos abordam a Quality 4.0 sob enfoques distintos, abrangendo seus fundamentos conceituais, tecnologias habilitadoras, condições de implementação e aplicações relacionadas às práticas da qualidade (SONY; ANTONY; DOUGLAS, 2020; DIAS; CARVALHO; SAMPAIO, 2022; LIU et al., 2023).
A Tabela 1 evidencia que a literatura sobre Quality 4.0 contempla desde discussões conceituais e organizacionais até aplicações relacionadas às práticas e ferramentas da qualidade. Apesar desse avanço, parcela relevante das pesquisas permanece direcionada às estruturas de implementação e às dimensões gerais da transformação digital, coexistindo com estudos voltados a aplicações mais específicas (SADER; HUSTI; DARÓCZI 2022)

Tabela 1 – Síntese das abordagens identificadas na literatura analisada

Nº	Estudo (autores, ano)	Periódico	Ferramenta/ método	Tecnologia/capacidade digital	Contribuição ao corpus
1	ESCOBAR et al. (2022)	Int. J. Lean Six Sigma	DMAIC/Six Sigma	Análise de dados, sistemas integrados	Integração digital às etapas Measure, Analyze e Control
2	ESCOBAR et al. (2025)	Quality Engineering	CEP/SPC	Aquisição de dados, Machine Learning	Evolução do SQC/SPC com aprendizado de máquina
3	BOUSDEKIS et al. (2023)	Int. J. Comput. Integr. Manuf.	CEP/SPC (analytics)	Big Data Analytics, análise preditiva	Suporte analítico ao controle e tomada de decisão
4	KLAPUT et al. (2024)	Quality Engineering	FMEA	IoT, sistemas ciberfísicos	Aplicação da FMEA em Smart Factory Line
5	PEÇAS et al. (2021)	Applied Sciences	PDCA	IoT, análise de dados, automação	Proposta conceitual PDCA 4.0
6	VO et al. (2020)	IEEE Eng. Manag. Rev.	Ishikawa (RCA)	Dispositivos inteligentes, tempo real	Estudo de caso de RCA apoiada por Indústria 4.0

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

No corpus principal desta revisão, os seis estudos apresentam evidência direta de incorporação digital a ferramentas ou métodos específicos da qualidade. As evidências concentram-se sobretudo em CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma, com presença consolidada também de estudos relacionados à FMEA, ao PDCA e ao Ishikawa (análise de causa raiz). Essa distribuição demonstra que a incorporação de recursos digitais não apresenta o mesmo nível de evidência entre as diferentes ferramentas analisadas e fundamenta a comparação desenvolvida nas seções seguintes.

Parte da literatura concentra-se na compreensão da Quality 4.0 em nível conceitual e organizacional, enquanto outros estudos avançam para aspectos relacionados à integração entre tecnologias digitais, processos e práticas de gestão da qualidade. Essa diversidade permite compreender tanto as condições que sustentam a transformação digital quanto suas aplicações em ferramentas e métodos específicos.

4.2 Tecnologias digitais associadas à transformação das ferramentas da qualidade

A análise da literatura evidencia que a transformação digital da gestão da qualidade está associada a recursos como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Machine Learning (ML), Big Data Analytics e sistemas integrados, que ampliam a aquisição, o processamento e o uso das informações da qualidade, favorecendo a integração entre dados, processos e tomada de decisão (LIU et al., 2023; BOUSDEKIS et al., 2023).

No corpus principal, porém, a presença dessas tecnologias varia conforme a ferramenta. No CEP/SPC, destacam-se recursos de aquisição de dados, aprendizagem de máquina e reconhecimento de padrões (ESCOBAR; CANTORAL-CEBALLOS; MORALES-MENENDEZ, 2025; BOUSDEKIS et al., 2023). No DMAIC/Six Sigma, os recursos digitais aparecem ligados à análise de dados e à integração de informações nas etapas dos projetos de melhoria (ESCOBAR et al., 2022). Na FMEA, a transformação se relaciona à integração de princípios da Indústria 4.0 em sistemas produtivos complexos, como demonstrou o estudo de caso em uma testbed "Smart Factory Line", apoiado no manual harmonizado AIAG e VDA (KLAPUT et al., 2024). No PDCA, documentam-se propostas conceituais que articulam as tecnologias da Indústria 4.0 às etapas do ciclo de melhoria (PEÇAS et al., 2021). No Ishikawa, evidências de estudo de caso indicam a aplicação da análise de causa raiz apoiada por dispositivos inteligentes e dados em tempo real (VO; KONGAR; SUÁREZ-BARRAZA, 2020; BARSALOU, 2023).

Para Pareto, Fluxograma e 5W2H, as evidências são restritas ou inexistentes, não permitindo associar tecnologias digitais específicas a cada ferramenta. Isso reforça que a contribuição das tecnologias não ocorre de forma homogênea, pois depende da natureza da ferramenta, dos dados utilizados e do grau de integração com os sistemas organizacionais.

Tabela 2 – Tecnologias digitais e contribuições para a gestão da qualidade

Tecnologia	Principal contribuição	Repercussão nas ferramentas
IoT / IIoT	Aquisição contínua de dados	Monitoramento e alimentação de análises
Big Data Analytics	Processamento de grandes volumes	Identificação de padrões e tendências
Inteligência Artificial	Análise avançada e suporte	Detecção, classificação e apoio à decisão
Machine Learning	Reconhecimento de padrões	Predição de desvios e falhas
Digital Twins	Representação digital de sistemas	Simulação e análise preditiva

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A síntese apresentada na Tabela 2 não implica que todas essas tecnologias estejam associadas, com o mesmo nível de evidência, a todas as ferramentas clássicas da qualidade. Os estudos analisados demonstram maior presença de recursos digitais nas abordagens orientadas por dados, particularmente CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma,

enquanto as evidências para outras ferramentas permanecem mais restritas. Essa heterogeneidade é examinada de forma específica na seção seguinte.

.4.3 Transformação digital das ferramentas clássicas da qualidade

A análise do corpus principal evidenciou que a transformação digital das ferramentas clássicas da qualidade ocorre de forma heterogênea, com maior concentração de evidências em ferramentas e métodos orientados por dados. A Tabela 3 sintetiza as transformações e as tecnologias ou capacidades digitais identificadas no corpus principal.
O Controle Estatístico de Processos (CEP/SPC) apresenta as evidências mais consistentes de incorporação digital. Os estudos demonstram sua integração com aquisição e processamento de dados, reconhecimento de padrões e técnicas de aprendizagem de máquina, ampliando as capacidades tradicionais de monitoramento e análise dos processos (ESCOBAR; CANTORAL-CEBALLOS; MORALES-MENENDEZ, 2025; BOUSDEKIS et al., 2023). Já o DMAIC/Six Sigma também apresenta evidências relevantes de integração digital. Recursos de análise de dados e sistemas de informação apoiam principalmente as etapas Measure, Analyze e Control, preservando a estrutura metodológica e ampliando sua capacidade de obtenção, tratamento e utilização de informações (ESCOBAR et al., 2022).

Tabela 3 – Síntese da transformação digital das ferramentas clássicas da qualidade

Ferramenta/método	Transformação identificada no corpus	Tecnologias/capacidades associadas
CEP/SPC	Ampliação do monitoramento, análise e reconhecimento de padrões dos processos	Aquisição e processamento de dados, ML, deep learning e reconhecimento de padrões
DMAIC/Lean Six Sigma	Integração de recursos digitais às etapas de medição, análise e controle	Análise de dados, sistemas integrados e tecnologias digitais associadas à Indústria 4.0
FMEA	Integração de princípios e tecnologias da Indústria 4.0 à aplicação da FMEA em sistema produtivo automatizado (testbed Smart Factory Line)	IoT, sistemas ciberfísicos, análise de dados e integração com o manual harmonizado AIAG & VDA
Ishikawa	Aplicação de análise de causa raiz (RCA) apoiada por tecnologias digitais e compartilhamento de dados em tempo real em contexto de Indústria 4.0	Aplicações digitais, dispositivos inteligentes e dados em tempo real
PDCA	Proposta conceitual de articulação das tecnologias da Indústria 4.0 às etapas do ciclo de melhoria contínua	IoT, análise de dados, automação e requisitos de integração digital
Pareto	Não caracterizada diretamente no corpus principal	Evidência direta insuficiente no corpus
Fluxograma	Não caracterizada diretamente no corpus principal	Evidência direta insuficiente no corpus
5W2H	Não caracterizada diretamente no corpus principal	Evidência direta insuficiente no corpus

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Na FMEA, foram identificadas evidências de integração de princípios e tecnologias da Indústria 4.0 à sua aplicação. Estudo de caso conduzido em uma testbed "Smart Factory Line" demonstrou a viabilidade e a aplicabilidade da FMEA em sistemas técnicos complexos, integrando tecnologias da Indústria 4.0 a métodos de gestão da qualidade, com base no manual harmonizado AIAG e VDA (KLAPUT et al., 2024). No PDCA, a literatura documenta propostas conceituais que estabelecem os requisitos para a articulação das tecnologias da Indústria 4.0 às etapas do ciclo de melhoria contínua, indicando a viabilidade de sua operacionalização em ambientes digitais (PEÇAS et al., 2021). Em relação ao Ishikawa, as evidências provêm de estudo de caso de análise de causa raiz (RCA) em contexto de Indústria 4.0, no qual aplicações digitais, dispositivos inteligentes e

compartilhamento de dados em tempo real apoiaram a identificação e a resolução de problemas de qualidade (VO; KONGAR; SUÁREZ-BARRAZA, 2020). Revisões de escopo sobre análise de causa raiz na Quality 4.0 corroboram o potencial de incorporação digital dessas abordagens (BARSALOU, 2023). Não é possível, entretanto, caracterizar uma transformação digital plenamente consolidada do diagrama de causa e efeito em sua forma tradicional.

Para Pareto, Fluxograma e 5W2H, não foram identificadas evidências diretas suficientes para caracterizar modalidades específicas de transformação digital. Esse resultado não indica incompatibilidade dessas ferramentas com tecnologias digitais, mas evidencia uma lacuna na literatura, indicando oportunidades para investigações sobre a incorporação de recursos digitais a essas ferramentas.

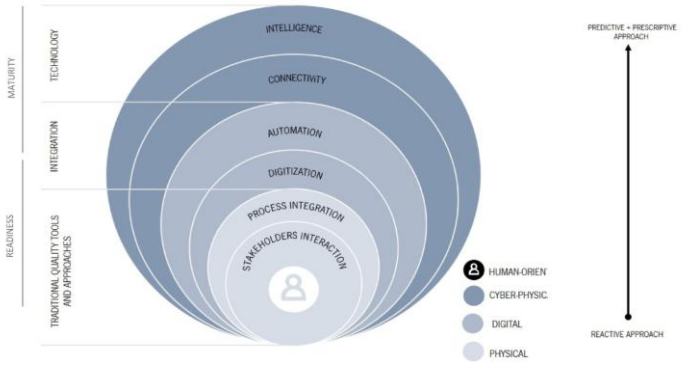
4.4 Intensidade da transformação digital das ferramentas clássicas da qualidade

A análise comparativa evidenciou diferentes intensidades de transformação digital entre as ferramentas clássicas da qualidade. Para sistematizar essas diferenças, foram consideradas cinco dimensões associadas à Quality 4.0: integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão (LIU et al., 2023).

Com base nessas dimensões, as ferramentas foram classificadas segundo a intensidade de incorporação digital identificada no corpus principal. A literatura de apoio foi utilizada para fundamentar conceitualmente as dimensões analisadas e auxiliar na interpretação dos resultados, não sendo empregada isoladamente para atribuir níveis de intensidade às ferramentas. Nos casos em que o corpus não apresentou evidências diretas suficientes, evitou-se atribuir níveis sustentados exclusivamente pela literatura de apoio, adotando-se uma classificação explicitamente inferencial, fundamentada na literatura de apoio e na natureza conceitual de cada ferramenta, e sinalizada na Tabela 4.

A classificação possui caráter qualitativo e comparativo, constituindo uma síntese analítica desta revisão, e não uma escala quantitativa ou um modelo de maturidade empiricamente validado. Essa perspectiva é coerente com a compreensão da transformação digital como um processo progressivo de incorporação de capacidades digitais (CARVALHO et al., 2024). A Figura 2 auxilia nessa interpretação ao evidenciar que a digitalização, isoladamente, não representa necessariamente um nível avançado de transformação.

Figura 2 – Níveis de capacidade utilizados no modelo conceitual de Quality 4.0



Fonte: Carvalho et al. (2024).

Para sistematizar as diferenças observadas no corpus, as evidências de incorporação digital foram organizadas segundo cinco dimensões analíticas: integração digital, uso de dados, inteligência analítica, automação e suporte à decisão. A intensidade observada em cada dimensão foi classificada qualitativa e comparativamente em baixa, moderada ou alta, admitindo-se categorias intermediárias (baixa/moderada e moderada/alta) quando as evidências apresentaram características situadas entre dois níveis. Essa classificação

representa exclusivamente a intensidade relativa de incorporação digital identificada nos estudos selecionados, não constituindo uma escala universal de maturidade digital nem permitindo generalizações para além do corpus analisado. A síntese resultante é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Intensidade da transformação digital das ferramentas da qualidade.

Ferramenta	Integr. Digital	Uso Dados	Intel. Analit.	Automação	Suporte Decisão
CEP/SPC	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
DMAIC/Six Sigma	Alta	Alta	Alta	Mod/Alta	Alta
FMEA	Mod/Alta	Moderada	Mod/Alta	Moderada	Alta
PDCA	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Mod/Alta
Ishikawa	Baixa/Mod	Baixa/Mod	Baixa/Mod	Baixa	Moderada
Pareto*	Moderada	Moderada	Baixa/Mod	Baixa	Moderada
Fluxograma*	Moderada	Baixa/Mod	Baixa	Baixa/Mod	Baixa/Mod
5W2H*	Baixa/Mod	Baixa	Baixa	Baixa	Moderada

Fonte: Elaborado pelos autores (2026). *Classificação inferencial.

Os resultados indicam maior intensidade relativa de incorporação digital para CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma. No CEP/SPC, a integração com sistemas de aquisição de dados, o monitoramento contínuo e a aplicação de métodos analíticos ampliam a capacidade de identificação de padrões, anomalias e desvios (ESCOBAR; CANTORAL-CEBALLOS; MORALES-MENENDEZ, 2025; BOUSDEKIS et al., 2023). No DMAIC/Six Sigma, as tecnologias digitais apoiam diferentes etapas do ciclo de melhoria, especialmente a análise de dados e o acompanhamento dos resultados (ESCOBAR et al., 2022).

A FMEA também apresentou intensidade relevante de incorporação digital, com maior destaque para integração digital, inteligência analítica e suporte à decisão, refletindo a integração documentada de princípios e tecnologias da Indústria 4.0 à sua aplicação em sistemas produtivos (KLAPUT et al., 2024). O PDCA apresentou intensidade predominantemente moderada nas dimensões analisadas, com maior destaque para o suporte à decisão, coerente com as propostas conceituais que articulam tecnologias da Indústria 4.0 às etapas do ciclo de melhoria contínua (PEÇAS et al., 2021).

Para Ishikawa, Fluxograma e 5W2H, observaram-se intensidades predominantemente baixas ou baixas/moderadas. No Ishikawa (análise de causa raiz), as evidências de estudo de caso em contexto de Indústria 4.0, com aplicações digitais e compartilhamento de dados em tempo real, indicam possibilidades de ampliação da capacidade analítica, embora com baixa intensidade de automação (VO; KONGAR; SUÁREZ-BARRAZA, 2020; BARSALOU, 2023). O Pareto apresentou comportamento intermediário quanto à integração digital e ao uso de dados, enquanto inteligência analítica e automação demonstraram menor intensidade. Fluxograma e 5W2H apresentaram comportamento semelhante, com a incorporação digital concentrada principalmente na organização e integração de informações e no suporte às atividades de decisão.

Cabe ressaltar que, para Pareto, Fluxograma e 5W2H, a classificação possui caráter inferencial, conforme sinalizado na Tabela 4, uma vez que o corpus principal não apresentou evidências diretas suficientes para essas ferramentas.

4.5 Framework conceitual da transformação digital

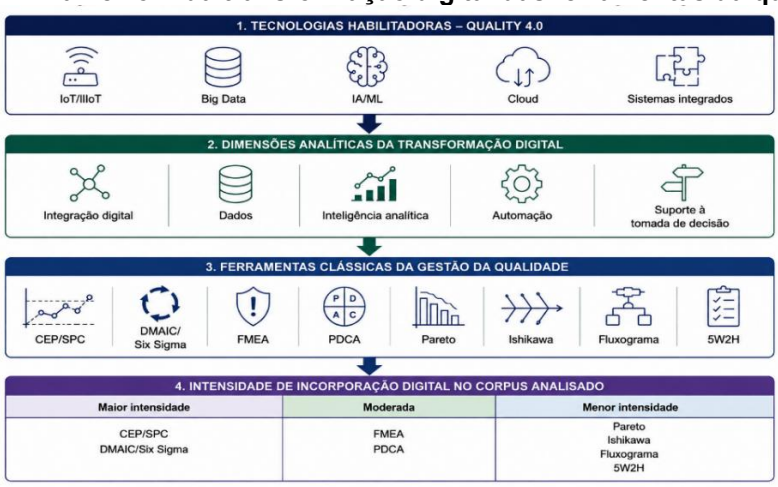
A síntese dos resultados permite compreender a transformação digital das ferramentas clássicas da gestão da qualidade como um processo multidimensional, associado à incorporação de tecnologias e capacidades da Indústria 4.0. Entre as tecnologias habilitadoras mais recorrentes destacam-se Internet das Coisas e Internet Industrial das Coisas (IoT/IIoT), Big Data, Inteligência Artificial e Machine Learning (IA/ML), computação

em nuvem, Digital Twins e sistemas digitais integrados, que ampliam a aquisição, integração, processamento e análise de dados, favorecendo aplicações da qualidade mais conectadas e orientadas por dados (SONY; ANTONY; DOUGLAS, 2020; BOUSDEKIS et al., 2023; LIU et al., 2023).

Com base nas evidências do corpus, a transformação digital foi organizada em cinco dimensões analíticas: integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão. Essas dimensões permitem diferenciar a simples digitalização de formas mais avançadas de transformação, caracterizadas pela integração de informações, uso de recursos analíticos, automação e apoio à decisão.

Os resultados evidenciaram diferentes intensidades de incorporação dessas capacidades entre as ferramentas analisadas. CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma apresentaram maior intensidade relativa de transformação digital nas cinco dimensões. A FMEA demonstrou intensidade relevante, especialmente em integração digital, inteligência analítica e suporte à decisão, enquanto o PDCA apresentou comportamento predominantemente moderado. Pareto, Ishikawa, Fluxograma e 5W2H apresentaram incorporação digital mais limitada e heterogênea, concentrada principalmente na integração, utilização de dados e suporte à decisão. Essa classificação possui caráter qualitativo e comparativo, representando a intensidade relativa identificada no corpus, e não níveis universais de maturidade. A partir dessas relações, propõe-se o framework conceitual apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Framework da transformação digital das ferramentas da qualidade



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados da revisão (2026).

Conforme sintetizado na Figura 3, o framework relaciona tecnologias habilitadoras, dimensões analíticas e transformação da aplicação das ferramentas clássicas da qualidade. As tecnologias fornecem recursos para aquisição, integração, processamento e análise das informações, enquanto as dimensões representam as capacidades por meio das quais esses recursos modificam a operacionalização das ferramentas.

Essa transformação não implica abandono dos fundamentos metodológicos tradicionais. CEP/SPC, DMAIC/Six Sigma, FMEA e PDCA preservam suas respectivas funções de controle da variabilidade, melhoria estruturada, prevenção de falhas e melhoria contínua, enquanto Pareto, Ishikawa, Fluxograma e 5W2H mantêm suas funções de priorização, análise causal, representação de processos e estruturação de ações. A mudança ocorre principalmente na ampliação das capacidades de integração, análise, automação e suporte à decisão. As menores intensidades observadas em determinadas dimensões para Pareto, Ishikawa, Fluxograma e 5W2H não representam ausência de potencial para transformação digital, mas menor consolidação dessas aplicações no corpus analisado, indicando oportunidades para investigações futuras.

Por fim, o framework deve ser compreendido como uma síntese conceitual derivada da revisão integrativa, e não como um modelo de maturidade empiricamente validado ou uma

escala quantitativa diretamente aplicável às organizações. Sua contribuição consiste em organizar as diferentes formas de incorporação de capacidades digitais às ferramentas clássicas da qualidade e evidenciar que essa transformação ocorre de maneira heterogênea.

5. Conclusões

Este estudo analisou como as ferramentas clássicas da gestão da qualidade vêm incorporando tecnologias digitais no contexto da Quality 4.0, a partir de cinco dimensões: integração digital, utilização de dados, inteligência analítica, automação e suporte à tomada de decisão.

Os resultados mostraram que essa transformação é heterogênea. CEP/SPC e DMAIC/Six Sigma apresentaram a maior intensidade de incorporação digital, seguidos por FMEA e PDCA, com níveis intermediários e evidências consolidadas. Ishikawa, Pareto, Fluxograma e 5W2H, por outro lado, apresentaram incorporação mais limitada, com evidências ainda incipientes ou ausentes, indicando que se encontram em estágios iniciais de integração com as tecnologias da Quality 4.0.

Ficou evidente também que a simples digitalização de registros não caracteriza, por si só, uma transformação mais ampla. A mudança se torna significativa quando os recursos digitais ampliam a integração dos dados, incorporam capacidades analíticas, possibilitam automação e fortalecem o suporte à decisão, sem substituir os fundamentos metodológicos das ferramentas tradicionais. Como principal contribuição, o estudo propõe um framework conceitual que articula tecnologias habilitadoras, dimensões analíticas e intensidades de transformação, ajudando a sistematizar as evidências e a compreender como as capacidades digitais vêm sendo incorporadas à gestão da qualidade. Como limitação, a classificação tem caráter qualitativo e deriva de um corpus reduzido, com distribuição desigual de estudos entre as ferramentas. Estudos futuros podem ampliar o corpus, validar empiricamente o framework em diferentes contextos organizacionais e desenvolver instrumentos para mensurar as dimensões propostas, com atenção especial a ferramentas sem evidência direta consolidada, como Pareto, Fluxograma e 5W2H.

Referências

ANTONY, J.; MCDERMOTT, O.; SONY, M. Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. **The TQM Journal**, v. 34, n. 5, p. 1169-1188, 2022. DOI: 10.1108/TQM-07-2021-0215.

BARSALOU, M. Root cause analysis in Quality 4.0: a scoping review of current state and perspectives. **TEM Journal**, v. 12, n. 1, p. 73-79, 2023. DOI: 10.18421/TEM121-10.

BOUSDEKIS, A.; LEPENIOTI, K.; APOSTOLOU, D.; MENTZAS, G. Data analytics in Quality 4.0: literature review and future research directions. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 36, n. 5, p. 678-701, 2023. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2128219.

BRODAY, E. E. The evolution of quality: from inspection to Quality 4.0. **International Journal of Quality and Service Sciences**, v. 14, n. 3, p. 368-382, 2022. DOI: 10.1108/IJQSS-09-2021-0121.

CARVALHO, A. M.; DIAS, A. R.; DIAS, A. M.; SAMPAIO, P. The Quality 4.0 Roadmap: designing a capability roadmap toward quality management in Industry 4.0. **Quality Management Journal**, v. 31, n. 2, p. 117-137, 2024. DOI: 10.1080/10686967.2024.2317478.

CHIARINI, A. Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research. **The TQM Journal**, v. 32, n. 4, p. 603-616, 2020. DOI: 10.1108/TQM-04-2020-0082.

CHRISTOU, I. T.; KEFALAKIS, N.; SOLDATOS, J. K.; DESPOTOPOULOU, A. M. End-to-end industrial IoT platform for Quality 4.0 applications. **Computers in Industry**, v. 137, art. 103591, 2022. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103591.

DIAS, A. M.; CARVALHO, A. M.; SAMPAIO, P. Quality 4.0: literature review analysis, definition and impacts of the digital transformation process on quality. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 39, n. 6, p. 1312-1335, 2022. DOI: 10.1108/IJQRM-07-2021-0247.

KLAPUT, P.; HERCIK, R.; MACHÁČEK, Z.; NOSKIEVIČOVÁ, D.; DOSTÁL, V.; VYKYDAL, D. Mutual combination of selected principles and technologies of Industry 4.0 and quality management methods: case study. **Quality** ESCOBAR, C. A.; CANTORAL-CEBALLOS, J. A.; MORALES-MENENDEZ, R. Quality 4.0: Learning quality control, the evolution of SQC/SPC. **Quality Engineering**, v. 37, n. 1, p. 92-117, 2025. DOI: 10.1080/08982112.2024.2356519.

ESCOBAR, C. A.; MACIAS, D.; MCGOVERN, M. E.; HERNANDEZ-DE-MENENDEZ, M.; MORALES-MENENDEZ, R. Quality 4.0 – an evolution of Six Sigma DMAIC. **International Journal of Lean Six Sigma**, v. 13, n. 6, p. 1200-1238, 2022. DOI: 10.1108/IJLSS-05-2021-0091.

ESCOBAR, C. A.; MCGOVERN, M. E.; MORALES-MENENDEZ, R. Quality 4.0: a review of big data challenges in manufacturing. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 32, p. 2319-2334, 2021. DOI: 10.1007/s10845-021-01765-4.

Klaput, P.; Hercík, R.; Machacek, Z.; Noskievicova, D.; Dostal, V.; Vykydal, D. Mutual combination of selected principles and technologies of Industry 4.0 and quality management methods – case study. **Quality Engineering,** v. 36, n. 2, p. 207-226, 2024.

LIU, H.-C.; LIU, R.; GU, X.; YANG, M. From total quality management to Quality 4.0: a systematic literature review and future research agenda. **Frontiers of Engineering Management**, v. 10, p. 191-205, 2023. DOI: 10.1007/s42524-022-0243-z.

PEÇAS, P.; ENCARNAÇÃO, J.; GAMBÔA, M.; SAMPAYO, M.; JORGE, D. PDCA 4.0: a new conceptual approach for continuous improvement in the Industry 4.0 paradigm. **Applied Sciences**, v. 11, n. 16, art. 7671, 2021. DOI: 10.3390/app11167671.

SADER, S.; HUSTI, I.; DARÓCZI, M. A review of Quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. **Total Quality Management & Business Excellence**, v. 33, n. 9-10, p. 1164-1182, 2022. DOI: 10.1080/14783363.2021.1944082.

SAIHI, A.; AWAD, M.; BEN-DAYA, M. Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 40, n. 2, p. 628-650, 2023. DOI: 10.1108/IJQRM-09-2021-0305.

SONY, M.; ANTONY, J.; DOUGLAS, J. A. Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: a narrative review of literature and future directions for research. **The TQM Journal**, v. 32, n. 4, p. 779-793, 2020. DOI: 10.1108/TQM-12-2019-0275.

VO, B.; KONGAR, E.; SUÁREZ-BARRAZA, M. F. Root-cause problem solving in an Industry 4.0 context. **IEEE Engineering Management Review**, v. 48, n. 1, p. 48-56, 2020. DOI: 10.1109/EMR.2020.2966980.