

INTEGRAÇÃO DO MODELO PAF COM TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: UM FRAMEWORK CONCEITUAL PARA CUSTOS DA QUALIDADE NA MANUFATURA CONECTADA

INTEGRATION OF THE PAF MODEL WITH INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES: A
CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR QUALITY COSTS IN CONNECTED
MANUFACTURING

Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas · 24/04/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/776963815](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/776963815)

Valdecil de Souza¹

Paulo Roberto Alves²

Marcos Antonio Maia Lavio de Oliveira³

RESUMO

A gestão dos custos da qualidade (GCQ) consolida-se como um pilar estratégico para a competitividade industrial, particularmente no contexto da transformação digital promovida pela Indústria 4.0. Este artigo desenvolve uma análise conceitual e propositiva ao integrar os modelos clássicos de custos da qualidade — prevenção, avaliação, falhas internas e falhas externas — às tecnologias emergentes da quarta revolução industrial. Por meio de uma revisão bibliográfica que abrange as contribuições fundamentais dos principais teóricos da qualidade (Crosby, Deming, Juran, Feigenbaum, Ishikawa e Falconi) e da análise de ferramentas tecnológicas contemporâneas (IoT, visão computacional, manutenção preditiva e sistemas QMS), propõe-se um framework integrador. Esse modelo reposiciona os investimentos em automação e análise de dados como elementos centrais das categorias de prevenção e avaliação, gerando impacto direto na redução estrutural dos custos associados a falhas. Conclui-se que a GCQ no contexto da manufatura conectada demanda não apenas a reconfiguração dos sistemas de custeio, mas também a consolidação de uma nova cultura organizacional, orientada por dados e pela tomada de decisão em tempo real.

Palavras-chave: Custos da Qualidade; Indústria 4.0; Modelo PAF; Automação; Gestão Estratégica.

ABSTRACT

Quality Cost Management (QCM) has established itself as a strategic pillar for industrial competitiveness, particularly in the context of the digital transformation driven by Industry 4.0. This article develops a conceptual and propositional analysis by integrating the classical models of quality costs—prevention, appraisal, internal failures, and external failures—with emerging technologies of the fourth industrial revolution. Through a literature review encompassing the

fundamental contributions of leading quality theorists (Crosby, Deming, Juran, Feigenbaum, Ishikawa, and Falconi), along with the analysis of contemporary technological tools (IoT, computer vision, predictive maintenance, and QMS systems), an integrative framework is proposed. This model repositions investments in automation and data analytics as central elements within the prevention and appraisal categories, generating a direct impact on the structural reduction of failure-related costs. It is concluded that QCM in the context of connected manufacturing requires not only the reconfiguration of costing systems but also the consolidation of a new organizational culture, driven by data and real-time decision-making.

Keywords: Quality Costs; Industry 4.0; PAF Model; Automation; Strategic Management.

1. INTRODUÇÃO

A gestão da qualidade evoluiu ao longo do século XX de uma abordagem centrada na inspeção final para uma filosofia de gestão total da qualidade (TQM), envolvendo todas as áreas da organização (Deming, 1986; Juran, 1990; Crosby, 1999). Paralelamente, os custos da qualidade, classificados no modelo Prevenção, Avaliação e Falhas (PAF), consolidaram-se como um instrumento essencial para justificar investimentos em qualidade e para medir a eficiência operacional.

No entanto, a emergência da Indústria 4.0 (Kagermann et al., 2016) trouxe novas variáveis para esse campo. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), visão computacional e robôs colaborativos (cobots) alteram profundamente a dinâmica dos

custos da qualidade, ao mesmo tempo que exigem uma reinterpretação dos modelos tradicionais.

Este estudo é orientado pela seguinte pergunta de pesquisa: como integrar os conceitos clássicos de custos da qualidade às tecnologias da Indústria 4.0, de modo a propor um referencial teórico-prático atualizado e aplicável à gestão industrial?

O objetivo geral é desenvolver um **framework conceitual** que articule o modelo PAF com as tecnologias digitais e automatizadas, identificando os impactos de cada tecnologia sobre as diferentes categorias de custo. Como objetivos específicos, o artigo propõe: (i) revisar a fundamentação teórica dos custos da qualidade; (ii) identificar e analisar as principais tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas à gestão da qualidade; e (iii) desenvolver um modelo integrador que subsidie a alocação de recursos e a mensuração de resultados.

A relevância deste estudo decorre do fato de que parte da literatura ainda aborda os custos da qualidade de forma estática, desconsiderando o potencial das tecnologias digitais para automação e análise de dados em tempo real. Embora existam contribuições consolidadas tanto sobre custos da qualidade quanto sobre Indústria 4.0, observa-se que a integração entre esses campos ainda é pouco explorada na literatura. Nesse contexto, este artigo propõe uma abordagem integradora, aproximando o modelo PAF das tecnologias digitais e oferecendo subsídios para pesquisas empíricas futuras e para a prática gerencial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Custos da Qualidade: Origens e Modelo PAF

Os custos da qualidade foram sistematizados a partir dos trabalhos de Crosby, Juran e Feigenbaum. Para Crosby (1979), a qualidade é “conformidade com os requisitos”, e os custos da qualidade são os gastos decorrentes da não conformidade. Juran (1990) classificou os custos em quatro categorias: prevenção, avaliação, falhas internas e falhas externas, enfatizando que os custos de prevenção e avaliação são “inevitáveis”, enquanto os custos de falhas são “evitáveis”.

Feigenbaum (1994) ampliou a visão ao introduzir o conceito de Controle da Qualidade Total, no qual os custos da qualidade devem ser gerenciados de forma integrada em toda a organização. No Brasil, Falconi (1989) consolidou a aplicação desses conceitos, destacando a importância da gestão prática e da resolução de problemas como meio de reduzir custos.

O modelo PAF (Prevenção, Avaliação, Falhas Internas, Falhas Externas) tornou-se o referencial dominante para classificação e mensuração. A Tabela 1 evidencia a lógica estruturante do modelo PAF, ao organizar os custos da qualidade em categorias que cobrem desde ações preventivas até as consequências de falhas. Observa-se que investimentos em prevenção e avaliação tendem a reduzir custos mais elevados associados às falhas internas e externas. A distinção entre falhas internas e externas reforça o impacto progressivo dos erros ao longo do processo produtivo. Assim, o modelo orienta decisões gerenciais voltadas à eficiência e à melhoria contínua.

Tabela 1 – Categorias do Modelo PAF e Exemplos

Categoria	Exemplos
-----------	----------

Prevenção	Treinamento, planejamento da qualidade, manutenção preventiva, análise de projetos
Avaliação	Inspeção de matérias-primas, testes de produto, auditorias internas
Falhas Internas	Retrabalho, sucata, paradas de produção, análise de causas raiz
Falhas Externas	Devoluções, garantias, recalls, danos à reputação

Fonte: Adaptado de Juran (1990) e Souza (2026).

Indústria 4.0 e a Transformação da Gestão da Qualidade

A Indústria 4.0 representa a integração de sistemas ciberfísicos, IoT, big data, inteligência artificial e automação nos processos produtivos (Kagermann et al., 2016). Seus impactos sobre a qualidade são significativos:

- **Monitoramento em tempo real:** sensores IoT permitem acompanhar variáveis de processo continuamente, reduzindo a variabilidade (Schneider & Popper, 2018).
- **Manutenção preditiva:** algoritmos de machine learning antecipam falhas de equipamentos, evitando paradas não planejadas (Mitchell, 2017).
- **Inspeção automatizada:** sistemas de visão computacional realizam inspeções com maior precisão e velocidade do que a inspeção manual (Porter & Heppelmann, 2019).
- **Integração de dados:** plataformas de QMS (Quality Management Software) centralizam informações sobre não

conformidades, custos e ações corretivas.

Essas tecnologias alteram a própria natureza dos custos da qualidade: atividades antes classificadas como “avaliação” (inspeção manual) podem se tornar investimentos em automação (prevenção), e falhas internas podem ser drasticamente reduzidas por meio de monitoramento contínuo.

3. METODOLOGIA

O presente artigo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza teórico-conceitual, enquadrando-se, segundo Antônio Carlos Gil (2008), como pesquisa bibliográfica, por ser elaborada a partir de material previamente publicado, especialmente livros e artigos científicos. Adota-se uma abordagem qualitativa, com base em revisão bibliográfica de caráter sistematizado e análise lógico-conceitual, com vistas à construção de um framework integrador. Para tanto, foram consultadas obras clássicas da gestão da qualidade (W. Edwards Deming, Joseph M. Juran, Philip B. Crosby, Armand V. Feigenbaum, Kaoru Ishikawa, Vicente Falconi Campos), bem como publicações contemporâneas sobre Indústria 4.0 (Henning Kagermann, Michael Porter, Klaus Schwab) e normas técnicas internacionais, como a ISO 9001 e a ISO 19011.

A partir da análise do conteúdo, procedeu-se a um **mapeamento cruzado** entre as tecnologias da Indústria 4.0 e as categorias do modelo PAF, identificando pontos de interseção, substituição de atividades e novas formas de mensuração.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO: UM FRAMEWORK INTEGRADOR

4.1. Impacto das Tecnologias da Indústria 4.0 sobre as Categorias PAF

A partir da revisão, é possível sistematizar os impactos das principais tecnologias sobre cada categoria de custos da qualidade, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2 – Impacto das Tecnologias da Indústria 4.0 sobre os Custos da Qualidade

Tecnologia	Impacto sobre Prevenção	Impacto sobre Avaliação	Impacto sobre Falhas Internas	Impacto sobre Falhas Externas
IoT / Sensores	Permite monitoramento contínuo de condições; reduz necessidade de inspeções programadas	Substitui inspeções manuais por dados em tempo real	Antecipa desvios, reduz retrabalho e refugos	Rastreabilidade ampliada; reduz devoluções oriundas de por falhas internas
Visão Computacional	Integra-se a sistemas à prova de erro (poka-yoke) desde o projeto	Automatiza inspeção de 100% da produção; reduz custo unitário de inspeção	Identifica defeitos instantaneamente, evitando avanço de não conformes	Elimina envio de produtos defeituosos; reduz recalls

Manutenção Preditiva	Planejamento baseado em dados reais; evita quebras	Reduz necessidade de inspeções por amostragem pós-falha	Evita paradas não planejadas; reduz desperdício de material	Evita falhas em campo causadas por degradação de equipamentos
IA / Machine Learning	Otimiza parâmetros de processo em tempo real	Auxilia na análise de grandes volumes de dados de inspeção	Identifica causas raiz mais rapidamente	Prevê riscos de falhas externas com base em dados históricos
Robôs Colaborativos	Padronizam operações críticas	Podem realizar inspeções integradas à montagem	Reduzem variabilidade; minimizam erros humanos	Aumentam a consistência do produto entregue
QMS (Software)	Centraliza planos de ação e documentação	Automatiza coleta de indicadores de avaliação	Rastreia não conformidades e ações corretivas	Gerencia reclamações e garantias de forma integrada

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Souza (2026).

4.2. Proposição de um Framework Integrador

À luz da análise apresentada na Tabela 2, propõe-se um framework integrador orientado ao reposicionamento da gestão dos custos da qualidade no contexto da Indústria 4.0. Tal proposição organiza-se em três níveis analíticos e complementares:

- 1. Base Tecnológica (Infraestrutura 4.0):** lot, sensores, conectividade, sistemas em nuvem.

Função: Viabilizar a coleta contínua de dados e a rastreabilidade.

2. **Camada de Automação e Análise:** Visão computacional, ia, robôs colaborativos, manutenção preditiva.

Função: Executar atividades de prevenção e avaliação com alta eficiência, reduzindo a dependência de operações manuais.

3. **Camada de Gestão Integrada:** Qms, big data analytics, dashboards de custos da qualidade.

Função: Prover visibilidade e suporte à decisão, conectando os custos das diferentes categorias e permitindo análises preditivas.

Implicação central: No framework proposto, os **custos de prevenção e avaliação deixam de ser vistos apenas como despesas operacionais** e passam a ser tratados como **investimentos em ativos tecnológicos** que geram redução estrutural e sustentada dos custos de falhas internas e externas.

4.3. Desafios para a Implementação

A adoção do framework enfrenta desafios práticos:

- **Mensuração adequada:** os sistemas de custeio tradicionais nem sempre capturam os benefícios indiretos da automação (ex.: redução de variabilidade). É necessário incorporar métricas de eficiência de processo e de qualidade.
- **Cultura organizacional:** a transição para uma gestão orientada por dados exige capacitação e mudança de mentalidade, especialmente em níveis operacionais.

- **Integração de sistemas:** a fragmentação de dados entre setores (produção, qualidade, manutenção) ainda é um entrave comum.
- **Governança e qualidade dos dados:** a efetividade do modelo depende de dados confiáveis; inconsistências, ausência de padronização e baixa maturidade em data governance comprometem a análise e a tomada de decisão.
- **Cibersegurança e proteção de dados:** a digitalização e a integração de sistemas ampliam a exposição a riscos cibernéticos, exigindo investimentos adicionais e políticas robustas de segurança da informação.
- **Viabilidade econômica e retorno do investimento (ROI):** a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 demanda investimentos elevados, cujo retorno nem sempre é imediato ou facilmente mensurável nos modelos tradicionais de custos da qualidade.
- **Interoperabilidade tecnológica:** além da integração interna, há desafios na comunicação entre diferentes tecnologias, plataformas e fornecedores, o que pode limitar a escalabilidade do framework.
- **Alinhamento estratégico:** a adoção do framework requer coerência com os objetivos organizacionais; sem alinhamento estratégico, há risco de iniciativas isoladas e baixo impacto nos resultados.
- **Capacidade analítica e competências digitais:** a interpretação de dados em tempo real exige profissionais qualificados em

análise de dados, estatística e sistemas digitais, o que ainda é uma lacuna em muitas organizações.

Tais desafios encontram respaldo na literatura sobre transformação digital e Indústria 4.0, que aponta limitações relacionadas à integração de sistemas, maturidade analítica, cibersegurança e alinhamento estratégico (KAGERMANN et al., 2013; PORTER; HEPPELMANN, 2014; SCHWAB, 2016; DAVENPORT; HARRIS, 2007).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma análise conceitual sobre a integração entre a gestão de custos da qualidade e a Indústria 4.0, propondo um framework que articula as tecnologias emergentes com as categorias clássicas do modelo PAF.

A principal contribuição teórica é a demonstração de que a Indústria 4.0 não apenas altera os meios de produção, mas redefine a própria natureza dos custos da qualidade: atividades de avaliação e prevenção podem ser amplamente automatizadas, transformando-se em investimentos estratégicos com retorno mensurável na redução de falhas.

Como contribuição prática, o framework oferece um referencial para que gestores e pesquisadores possam identificar quais tecnologias têm maior impacto sobre cada categoria de custo, orientando a alocação de recursos e o desenho de sistemas de medição mais adequados à realidade digital.

Limitações do estudo incluem a ausência de validação empírica do framework, o que aponta para futuras pesquisas. Recomenda-se a realização de estudos de caso longitudinais em empresas que já

implementaram tecnologias da Indústria 4.0, para verificar na prática as relações propostas e desenvolver modelos de mensuração específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. **The second machine age**. New York: Norton, 2014.

CROSBY, P. B. **Qualidade é investimento**. 3. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1979. CROSBY, P. B. **Qualidade sem lágrimas**. 4. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1999.

DAVENPORT, T. H.; HARRIS, J. G. **Competing on analytics**. Harvard Business School Press, 2007.

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

FALCONI, V. **Gerência da Qualidade Total: Estratégia para aumentar a competitividade da empresa brasileira**. Rio de Janeiro: Bloch, 1989.

FEIGENBAUM, A. V. **Total Quality Control**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1994. ISO 9001:2015 – **Quality management systems** — Requirements.

ISO 27001:2013 – **Information security management**.

JURAN, J. M. **A Qualidade desde o Projeto**. São Paulo: Pioneira, 1990.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Indústria 4.0: A Revolução Industrial Alemã convida o mundo a participar**. São Paulo: Blucher, 2016.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative** INDUSTRIE 4.0. 2013.

MITCHELL, T. M. **Machine Learning**. New York: McGraw-Hill, 2017.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. **Produtos inteligentes e conectados: transformando as indústrias e empresas com a Indústria 4.0**. *Harvard Business Review*, v. 94, n. 11, p. 60-70, 2019.

PORTER, M. E.; HEPPELMANN, J. E. **How smart, connected products are transforming competition**. *Harvard Business Review*, 2014.

SCHNEIDER, P.; POPPER, N. **Indústria 4.0: O futuro da automação inteligente**. São Paulo: Blucher, 2018.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SOUZA, V. **Gestão de Custos da Qualidade: Abordagem para a Indústria 4.0**. 1. ed. Salto: Publicação Independente, 2026.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Readiness for the Future of Production Report**.

¹ Centro Paula Souza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2986-0480>. E-mail: valdecil.souza@hotmail.com.

² Centro Paula Souza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8362-8626>.
E-mail: pra@praconsulting.com.br

³ Centro Paula Souza. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7640-7059>.

E-mail: prof.marcosmaia@gmail.com