

PROPOSTA DE UM MODELO CONCEITUAL PARA INTEGRAÇÃO ENTRE APQP E INDÚSTRIA 4.0: UMA ABORDAGEM DE GESTÃO DO CONHECIMENTO PARA DESENVOLVIMENTO AUTOMOTIVO

PROPOSAL OF A CONCEPTUAL MODEL FOR INTEGRATION BETWEEN APQP AND INDUSTRY 4.0: A KNOWLEDGE MANAGEMENT APPROACH TO AUTOMOTIVE DEVELOPMENT

Rafaela Santos de Andrade

Pós-graduanda em Engenharia da Qualidade e Produtividade. UniSenai-SP – Brasil.
raafaelaandrade@live.com

Josué Farah

Mestrado em Engenharia de Produção. UniSenai-SP – Brasil.
josue.farah@sp.senai.br

Luís Soares Teixeira

Mestrado em Engenharia de Produção. UniSenai-SP – Brasil.
luis.teixeira@mwm.com.br

RESUMO

Este artigo propõe um modelo conceitual de gestão do conhecimento (GC) para a integração entre o APQP (Planejamento avançado da Qualidade do Produto) e as tecnologias da Indústria 4.0 no desenvolvimento de produtos automotivos, fundamentado nos processos de conversão do conhecimento de Nonaka e Takeuchi (1997) e nos pilares de GC de Probst, Raub e Romhardt (2002). O estudo contribui para a GC ao articular, em um único framework, tecnologias de I4.0, atores, entradas e saídas de informação e mecanismos de retroalimentação nas cinco fases do APQP. A pesquisa caracteriza-se como revisão bibliográfica sistemática, com protocolo adaptado das diretrizes PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021), realizada nas bases Google Acadêmico, SciELO e Revista Mecatrônica SENAI, no período de 2014 a 2025. Após a remoção de duplicidades e as etapas de triagem e elegibilidade, o portfólio reuniu sete artigos provenientes da busca sistemática e uma dissertação incorporada excepcionalmente por busca manual, devido à sua relevância direta e à escassez de estudos sobre a integração entre APQP e Indústria 4.0. Os resultados indicam que são escassos os estudos que abordam essa integração sob a ótica da GC, destacando desafios relacionados à resistência cultural, custos de implementação e escassez de mão de obra qualificada. O modelo, estruturado como matriz de fases, processos de conhecimento, atores, tecnologias e retroalimentação, oferece um ponto de partida para profissionais da indústria automotiva, devendo suas conclusões ser interpretadas com cautela até validação empírica.

Palavras-chave: APQP, Indústria 4.0, Modelo conceitual, Gestão do Conhecimento, Desenvolvimento Automotivo.

ABSTRACT

This article proposes a conceptual knowledge management (KM) model for integrating APQP (Advanced Product Quality Planning) and Industry 4.0 technologies in automotive product development, based on the knowledge conversion processes of Nonaka and Takeuchi (1997) and the KM building blocks proposed by Probst, Raub and Romhardt (2002). The study contributes to KM by articulating, within a single framework, Industry 4.0 technologies, actors, information inputs and outputs, and feedback mechanisms across the five APQP phases. The research is characterized as a systematic literature review, using a protocol adapted from the PRISMA 2020 (PAGE et al., 2021) guidelines, conducted in Google Scholar, SciELO, and Revista Mecatrônica SENAI, covering the period from 2014 to 2025. After duplicate removal and the screening and eligibility stages, the portfolio comprised seven articles from the systematic search and one dissertation exceptionally incorporated through manual due to its direct relevance and the scarcity of studies addressing the integration of APQP and Industry 4.0. The results indicate that studies addressing this integration from a KM perspective remain scarce, with challenges related to cultural resistance, implementation costs, and a shortage of qualified labor. The proposed model, structured as a matrix of phases, knowledge processes, actors, technologies, and feedback mechanisms, provides a starting point for automotive industry professionals, while its conclusions should be interpreted with caution until empirical validation.

Keywords: APQP, Industry 4.0, Conceptual model, Knowledge Management, Automotive Development.

1. INTRODUÇÃO

A gestão do conhecimento (GC) tem sido cada vez mais reconhecida como um fator crítico para a inovação e a competitividade organizacional, especialmente em setores de alta complexidade tecnológica, como o automotivo. Nesse setor, o conhecimento sobre produtos, processos e requisitos de qualidade é distribuído entre múltiplas cadeias (montadoras, fornecedores, engenharias e áreas de manufatura) e sua sistematização é essencial para garantir a consistência e a rastreabilidade das decisões ao longo do ciclo de desenvolvimento.

O APQP (Planejamento avançado da Qualidade do Produto) é uma das principais metodologias utilizadas para organizar esse conhecimento no planejamento da qualidade. Estruturado em cinco fases, ele orienta o desenvolvimento de produtos e processos, desde a definição de requisitos até a retroalimentação com base em dados de campo em termos de GC, um ciclo que abrange a criação, o compartilhamento e a retenção de conhecimento entre equipes multidisciplinares. Ao mesmo tempo, a Indústria 4.0 introduz tecnologias como IoT, Big Data, IA e Digital Twin, que criam possibilidades para a captura, conversão e aplicação de

conhecimento em tempo real, ampliando a capacidade de antecipar falhas e tomar decisões mais ágeis.

No entanto, a integração entre o APQP e as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 ainda carece de modelos estruturados que organizem esse conhecimento de forma aplicável e que explicitem, à luz da teoria de GC, quais processos de conhecimento (criação, conversão, compartilhamento e retenção), atores e fluxos de informação estão envolvidos em cada fase. Este artigo busca contribuir para essa lacuna ao propor um modelo conceitual que articula as cinco fases do APQP, as principais tecnologias da I4.0 e os processos de conhecimento subjacentes, com base na literatura existente. O modelo é apresentado como um artefato de gestão do conhecimento no sentido atribuído por Probst, Raub e Romhardt (2002) a instrumentos que apoiam a identificação, o desenvolvimento e a retenção de conhecimento organizacional que pode ser utilizado para orientar diagnósticos, planejamentos e pesquisas futuras.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre APQP, Indústria 4.0, Gestão do Conhecimento e sua integração; a Seção 3 descreve a metodologia adotada; a Seção 4 apresenta os resultados e a discussão; e a Seção 5 traz as considerações finais e implicações do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. APQP: Conceito e Estrutura

O planejamento avançado da qualidade do produto foi desenvolvido em 1995 pelas montadoras Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation com o intuito de atender à qualidade e satisfação do cliente desde o desenvolvimento do produto ou processo (AIAG, 2008). O intuito do APQP é organizar o projeto e facilitar a comunicação com a equipe, de forma que todo o planejamento fique dentro do prazo e tenha o resultado esperado.

A partir de uma cadeia de suprimentos, cada empresa é responsável por desenvolver um componente que irá compor o veículo na montadora. Dessa forma, o cliente envia ao seu fornecedor as especificações necessárias para o desenvolvimento de um produto ou serviço.

O APQP é requisito mandatório da IATF 16949:2016 (IATF, 2016), que o descreve como um guia no processo de desenvolvimento e uma forma padrão para compartilhar resultados entre organizações e clientes.

De acordo com o manual da AIAG (2008), os benefícios da metodologia incluem:

- Direcionar recursos para satisfazer o cliente;
- Promover a identificação antecipada das alterações necessárias;
- Evitar alterações de última hora;
- Fornecer um produto de qualidade dentro do prazo a um custo reduzido.

A Figura 1 ilustra as cinco fases do APQP que vão desde o planejamento até a retroalimentação e melhoria contínua (AIAG, 2008).

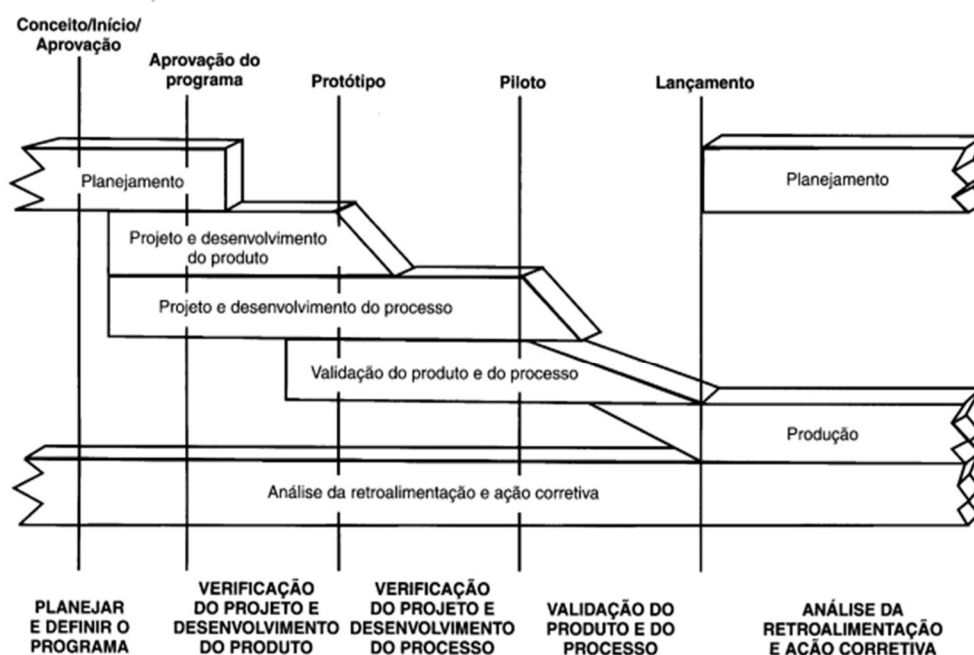


Figura 1 – Fases do APQP

Fonte: Adaptado de AIAG (2008)

2.2. Indústria 4.0 e Qualidade 4.0

A Indústria 4.0 teve início em 2011 durante a feira de Hannover na Alemanha, com o objetivo de desenvolver sistemas que permitissem a comunicação entre máquinas e seres humanos dentro das organizações, otimizando todo o processo de produção (Sátyro et al., 2018).

O conceito de Indústria 4.0 se espalhou pelo mundo após sua implementação, ganhando visibilidade em diversos países e incentivando a criação de programas tecnológicos (Tessarini Jr. & Saltorato, 2018).

A Figura 2 apresenta uma representação das mudanças referentes às quatro revoluções industriais.

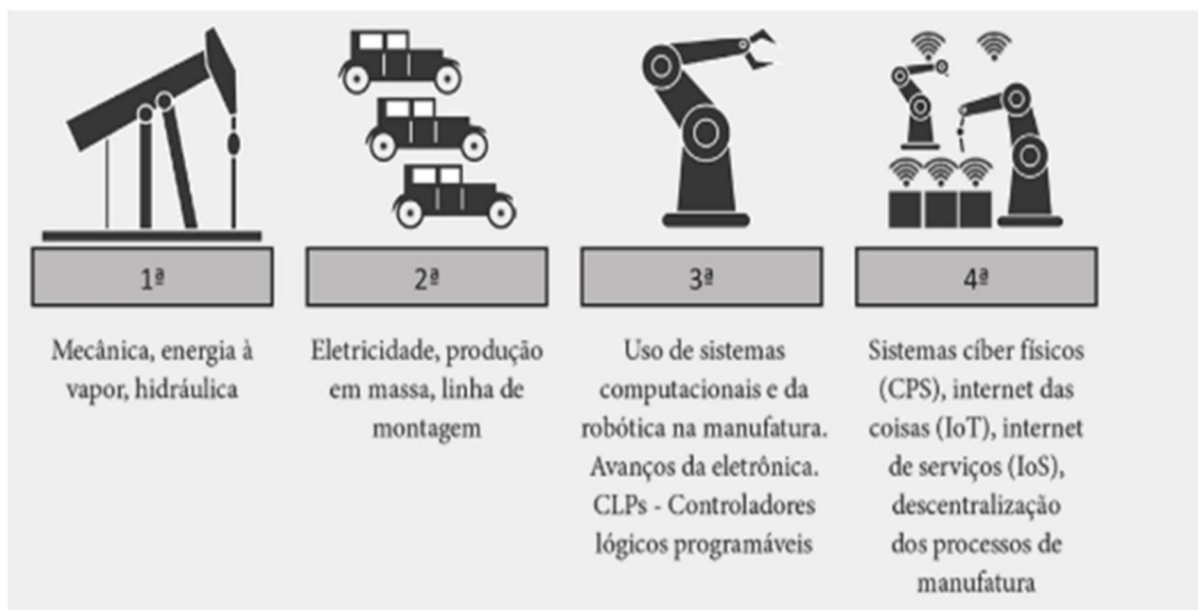


Figura 2 - As quatro revoluções industriais

Fonte: Sátyro et al. (2018)

A Indústria 4.0 está ligada à criação e disseminação de tecnologias de redes sem fio interligadas à internet, conectando não apenas humanos, mas também objetos por meio de sensores (Sátyro et al., 2018). A IoT (Internet of Things) conecta objetos do cotidiano como máquinas, veículos e eletrodomésticos à internet, permitindo acesso remoto. A IoS (Internet of Services) armazena dados a partir de comunicações eletrônicas, como na chamada "nuvem". O Big Data possibilita que a tomada de decisão e a análise de dados sejam realizadas por objetos inteligentes.

No campo da qualidade, esse movimento dá origem à Qualidade 4.0, que propõe o uso de dados em tempo real e análise preditiva para prevenção de falhas (Almeida et al., 2024). O primeiro grande impacto da Indústria 4.0 na área da qualidade consiste na digitalização do Total Quality Management (TQM), com destaque para o Big Data, que auxilia na detecção precoce de falhas durante o processo de produção (Almeida et al., 2024).

2.3. Gestão do Conhecimento: fundamentos teóricos

Nonaka e Takeuchi (1997) propõem o modelo SECI, segundo o qual o conhecimento organizacional é criado por meio de quatro modos de conversão entre conhecimento tácito e explícito: socialização (compartilhamento de experiências tácitas entre indivíduos, como o conhecimento de engenheiros experientes sobre falhas recorrentes de um componente), externalização (conversão do conhecimento tácito em conceitos explícitos, como especificações, FMEA e planos de controle), combinação (sistematização de conceitos

explícitos em um sistema de conhecimento mais complexo, como bases de dados e simulações integradas) e internalização (incorporação do conhecimento explícito em conhecimento tácito individual, por meio da prática e do aprender fazendo). Esse ciclo, chamado de espiral do conhecimento, é particularmente adequado para descrever o desenvolvimento de produtos automotivos, no qual conhecimento tácito de engenharia é progressivamente convertido em documentos formais de qualidade e, posteriormente, reincorporado pelas equipes.

Probst, Raub e Romhardt (2002), por sua vez, descrevem a GC como um conjunto de processos interdependentes identificação, aquisição, desenvolvimento, compartilhamento, utilização e retenção do conhecimento que devem ser geridos de forma integrada para que o conhecimento organizacional gere valor. Esses "pilares" oferecem uma lente complementar ao modelo SECI: enquanto este último explica como o conhecimento é convertido, os pilares de Probst, Raub e Romhardt explicam como o conhecimento é gerido ao longo de seu ciclo de vida dentro da organização, incluindo sua retenção aspecto central no APQP, cuja Fase 5 depende diretamente da retenção e reutilização de dados de campo para alimentar projetos futuros.

A adoção conjunta desses dois referenciais permite tratar o APQP não apenas como uma metodologia de qualidade, mas como um processo estruturado de gestão do conhecimento: cada uma de suas cinco fases pode ser lida como um estágio predominante da espiral SECI, apoiado por diferentes pilares de Probst, Raub e Romhardt, conforme detalhado na Seção 2.4 e operacionalizado no modelo conceitual proposto na Seção 4.5.

2.4. Integração entre APQP, Indústria 4.0 e Gestão do Conhecimento

A integração do APQP que já um requisito de norma e do cliente automotivo tradicional com as inovações tecnológicas da Indústria 4.0 possibilita uma abordagem mais proativa no gerenciamento da qualidade, permitindo a identificação precoce de falhas, a rastreabilidade digital e maior agilidade na tomada de decisões (Faria & Ibusuki, 2024).

Sob a ótica da GC, essa integração pode ser lida como uma aceleração dos processos de conversão e retenção de conhecimento descritos na Seção 2.3. As inovações da Indústria 4.0 contribuem para a digitalização dos controles de qualidade previstos nas etapas do APQP, promovendo a automatização de inspeções e o acompanhamento de indicadores de desempenho em tempo real. Como observado por Almeida et al. (2024), o primeiro grande impacto da Indústria 4.0 na área da qualidade consiste na digitalização do TQM um movimento que, em termos de Nonaka e Takeuchi (1997), amplia a capacidade de combinação

(sistematização de dados explícitos dispersos) e de externalização (conversão de observações de campo, antes tácitas, em indicadores e modelos explícitos).

Estudos como o de Cerri et al. (2025) demonstram um caso concreto de integração, com 98% de correlação entre simulação virtual e resultados físicos na Fase 3 do APQP, evidenciando o potencial da combinação entre conhecimento explícito (modelos de simulação) e conhecimento tácito de engenharia de processo para reduzir retrabalho e antecipar falhas. Ainda assim, como discutido na Seção 4.2, a literatura consultada trata majoritariamente da aplicação pontual de tecnologias a etapas isoladas do APQP, sem explicitar os atores, os fluxos de entrada e saída de conhecimento nem os mecanismos de retroalimentação envolvidos lacuna que este artigo busca endereçar.

3. METODOLOGIA

Este artigo caracteriza-se como uma Revisão Bibliográfica Sistemática, de abordagem qualitativa e objetivo exploratório-descritivo. A escolha deste método justifica-se pela necessidade de mapear e sintetizar o conhecimento existente sobre a integração entre APQP e Indústria 4.0 no setor automotivo, identificando lacunas e oportunidades de pesquisa. O protocolo de revisão foi adaptado das diretrizes PRISMA 2020 (Page et al., 2021) (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), contemplando as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, descritas a seguir.

A coleta de dados foi realizada nas bases Google Acadêmico, SciELO e Revista Mecatrônica SENAI, no período entre agosto de 2025 e março de 2026. Reconhece-se, como limitação, a abrangência restrita das bases consultadas (Seção 5.4); bases adicionais (Scopus, Web of Science) são recomendadas para estudos futuros. Foram consultados também livros, pesquisas acadêmicas, manuais e normas (APQP, IATF 16949), utilizados como literatura de apoio e não computados no portfólio sistemático.

A figura 3 a seguir representa em forma de fluxo PRISMA como foi realizado a coleta de dados.

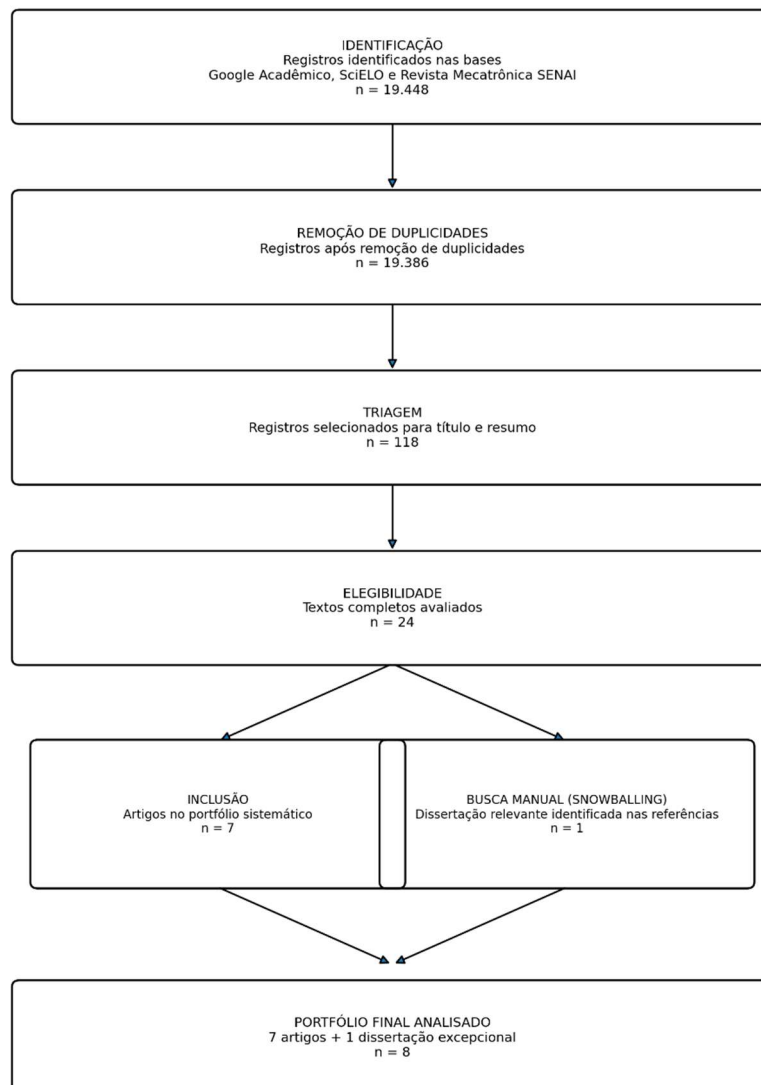


Figura 3 – Fluxograma Prisma

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de Page et al. (2021)

Foram utilizadas as seguintes strings de busca:

- "APQP" AND "Indústria 4.0"
- "APQP"
- "Indústria 4.0"
- "Qualidade 4.0"
- "Quality and Industry 4.0"

Reconhece-se que as strings isoladas ("APQP"; "Indústria 4.0"; "Qualidade 4.0") são amplas e geraram grande volume de resultados pouco específicos; seu uso teve caráter

complementar, destinado a capturar estudos de contextualização teórica (Seção 2) que não empregam necessariamente os dois termos combinados, e não à identificação de estudos de integração propriamente ditos função cumprida pela string combinada "APQP" AND "Indústria 4.0".

Foram extraídos artigos publicados entre 2014 e 2025, nos idiomas português e inglês, com texto completo disponível. Excluíram-se resumos expandidos, trabalhos de conclusão de curso, teses e dissertações, e artigos fora do escopo automotivo, ressalvada a exceção descrita adiante para a dissertação de Faria e Ibusuki (2024).

O processo de seleção seguiu as etapas:

- 1. Busca nas bases de dados;
- 2. Remoção de duplicidades entre bases e entre strings;
- 3. Triagem por título e resumo;
- 4. Avaliação de elegibilidade por leitura integral;
- 5. Avaliação de qualidade dos estudos elegíveis;
- 6. Inclusão final no portfólio.

Para a etapa 5, cada estudo elegível foi avaliado segundo quatro critérios binários, adaptados de práticas usuais em revisões sistemáticas na área de engenharia de produção: clareza do objetivo de pesquisa; explicitação do método; relevância direta para a integração APQP e Indústria 4.0 ou para um de seus constructos teóricos; e publicação em periódico ou anais com revisão por pares. Estudos que atenderam a pelo menos três dos quatro critérios foram mantidos no portfólio; nenhum estudo elegível foi excluído nesta etapa.

O fluxo de seleção, com os quantitativos por etapa, é apresentado no Quadro 1. Ao todo, as seis buscas totalizaram 19.448 registros identificados. Após a remoção de duplicidades entre bases e entre strings, restaram 19.386 registros, dos quais 118 foram selecionados para leitura de título e resumo por aderência aos critérios de inclusão, 24 tiveram o texto completo avaliado quanto à elegibilidade, e 7 compuseram o portfólio final da busca sistemática. Um oitavo estudo a dissertação de Faria e Ibusuki (2024), sobre a integração entre PLM e APQP na Indústria 4.0 foi identificado por busca manual (snowballing) a partir das referências dos artigos selecionados e incluído excepcionalmente no portfólio, em desvio deliberado e transparente do critério de exclusão de teses e dissertações. Essa exceção justifica-se pela extrema escassez de estudos que tratam especificamente da integração entre APQP e Indústria 4.0: dos 118 registros triados, este foi um dos poucos a abordar o tema de forma direta, e sua exclusão reduziria ainda mais um portfólio já pequeno, comprometendo a análise da Seção 4.

O tamanho reduzido do portfólio final (8) é, portanto, um resultado da pesquisa e não uma limitação metodológica isolada: ele evidencia de forma quantitativa, a lacuna de literatura discutida na Seção 4.2. Ainda assim, reconhece-se que um portfólio dessa dimensão limita a generalização dos achados, o que é retomado nas limitações da pesquisa (Seção 5.4).

O Quadro 1 apresenta o resumo das buscas realizadas e seus respectivos resultados.

Quadro 1 – Status das buscas realizadas

Forma de busca	Base	Filtro	Resultado	Artigos extraídos
"APQP" AND "Indústria 4.0"	Google Acadêmico	2014-2025 – Qualquer idioma – qualquer tipo	69	2
"APQP"	Google Acadêmico	2014-2025 – Qualquer idioma – qualquer tipo	3.210	1
"Indústria 4.0"	Google Acadêmico	2014-2025 – Qualquer idioma – qualquer tipo	16.000	1
"Qualidade 4.0"	Revista Mecatrônica SENAI BR	Sem filtro	30	1
"Qualidade 4.0"	SciELO	Sem filtro	135	1
"Quality and Industry 4.0"	SciELO	Sem filtro	4	1

Fonte: Elaborado pelos autores

Os critérios de inclusão e exclusão utilizados para seleção dos estudos estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Critérios de elegibilidade

Critérios de INCLUSÃO	Critérios de EXCLUSÃO
Artigos publicados entre 2014 e 2025	Publicações anteriores a 2014
Idiomas português ou inglês	Outros idiomas
Texto completo disponível	Apenas resumos
Foco em APQP – Indústria automotiva e/ou Indústria 4.0	Fora do escopo automotivo
Artigos de periódicos e anais de eventos	Livros, teses e dissertações, resumos expandidos, exceto inclusão excepcional justificada (item 3)

Fonte: Elaborado pelos autores

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Portfólio de Artigos Selecionados

O Quadro 3 apresenta os principais estudos analisados no levantamento da pesquisa, organizados por autor, ano, abordagem principal e contribuição para a integração entre APQP e Indústria 4.0. Inclui-se a dissertação de Faria e Ibusuki (2024), incorporada excepcionalmente ao portfólio conforme justificado na Seção 3.

Quadro 3 – Portfólio de artigos selecionados e suas contribuições

Autor (ano)	Abordagem	Contribuição
Tessarini Jr.; Saltorato (2018)	Revisão sistemática	Contextualiza a I4.0
Rocha; Salerno (2014)	Estudo de caso	Base teórica do APQP
Almeida et al. (2024)	Qualidade 4.0	Big Data e tecnologias habilitadoras
Goecks et al. (2020)	Revisão sistemática	IA e tomada de decisão na qualidade
Lima Jr.; Fernandes Neto (2024)	Revisão bibliográfica	Contextualiza ferramentas da qualidade (APQP, FMEA, CEP)
Cerri et al. (2025)	Estudo de caso (GM)	Integração I4.0 na Fase 3 do APQP
Cimino; Nascimento (2025)	Revisão + casos	Estudos de caso nacionais
Faria; Ibusuki (2024)	Estudo de caso (dissertação)	Integração de PLM e APQP na Indústria 4.0

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2. Análise da Lacuna entre APQP e Indústria 4.0

Os resultados indicam que, embora exista vasta literatura sobre Indústria 4.0 aplicada à qualidade (Tessarini Jr. & Saltorato, 2018; Almeida et al., 2024) e uma base consolidada sobre o APQP no setor automotivo (Rocha & Salerno, 2014; Lima Jr. & Fernandes Neto, 2024; Cerri et al., 2025), são escassos os estudos que abordam a integração entre ambos e, entre os poucos que o fazem, nenhum explicita os processos de conhecimento (no sentido de Nonaka & Takeuchi, 1997) envolvidos nessa integração.

Essa lacuna é significativa porque o APQP, por sua natureza, organiza o desenvolvimento em fases sequenciais que vão do planejamento à retroalimentação um ciclo estruturalmente análogo à espiral do conhecimento. A ausência de estudos que conectem as tecnologias da Indústria 4.0 a cada uma dessas fases, e que expliquem essa conexão em termos de atores, fluxos de conhecimento e mecanismos de retroalimentação, representa uma

oportunidade de contribuição original, que este artigo busca endereçar por meio da proposta de um modelo conceitual (Seção 4.5).

4.3. Benefícios Evidenciados pela Literatura

Apesar da escassez de estudos integrados, a literatura fornece evidências robustas dos benefícios que as tecnologias da Indústria 4.0 podem trazer para a qualidade no setor automotivo. Um dos raros casos documentados é o de Cerri et al. (2025), que alcançou 98% de correlação entre simulação virtual e resultados físicos na Fase 3 do APQP, demonstrando ganhos mensuráveis em tempo, custo e qualidade.

4.4. Desafios e Barreiras para Implementação

A literatura também aponta desafios importantes. A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 requer investimentos significativos em infraestrutura, treinamento e softwares, além de uma mudança cultural nas organizações (Cerri et al., 2025). Rocha e Salerno (2014) já apontavam desafios na aplicação disciplinada do próprio APQP, sugerindo que a complexidade da integração não é trivial.

No contexto brasileiro, Cimino e Nascimento (2025) destacam obstáculos como resistência cultural, altos custos e escassez de mão de obra qualificada. O Índice Global de Inovação 2024 posiciona o Brasil na 50ª colocação (pontuação 32,7), muito aquém de países como Suíça (1ª, 67,5) e Estados Unidos (3ª, 62,5) (Cimino & Nascimento, 2025).

4.5. Proposta de Modelo Conceitual APQP 4.0

O modelo amplia o escopo do APQP ao articular, para cada fase, não apenas as tecnologias da Indústria 4.0, mas também os processos SECI de conversão do conhecimento (Nonaka & Takeuchi, 1997), os atores envolvidos, os fluxos de entrada e saída de conhecimento e os ciclos de retroalimentação. Essa abordagem multidimensional transforma o artefato em uma ferramenta de gestão do conhecimento, superando a visão reducionista de um simples rol de ferramentas tecnológicas. O Quadro 4 consolida essa arquitetura em uma matriz analítica.

Quadro 4 – Modelo conceitual APQP 4.0: fases, processos de conhecimento, atores, tecnologias e retroalimentação

Fase APQP	Processo SECI predominante	Atores	Entradas	Tecnologias I4.0	Saídas	Retroalimentação
1. Planejamento do Produto	Socialização / Externalização	Cliente, marketing, engenharia de qualidade	Voz do cliente, histórico de falhas	Big Data, IA (Almeida et al., 2024)	Requisitos de qualidade, previsão de demanda	Ajuste de requisitos por dados de mercado
2. Projeto do Produto	Externalização	Engenharia de produto, fornecedores	Requisitos, conceitos de design	Digital Twin, simulação (Cerri et al., 2025)	FMEA automatizado, design otimizado	Validação virtual redireciona o design
3. Projeto do Processo	Combinação	Engenharia de processo, manufatura	Especificações de produto, capacidade fabril	IoT, simulação, IA (Cerri et al., 2025; Almeida et al., 2024)	Parâmetros de processo otimizados	Dados de simulação recalibram parâmetros
4. Validação do Produto e do Processo	Combinação / Internalização	Qualidade, manufatura, cliente	Protótipos, lotes-piloto	IIoT, Big Data, visão computacional (Cerri et al., 2025)	PPAP digital, inspeção automatizada	Resultados de inspeção ajustam o processo
5. Feedback	Internalização	Manufatura, qualidade, engenharia	Dados de campo, indicadores de desempenho	Machine Learning, IA (Almeida et al., 2024)	Análise preditiva de falhas, lições aprendidas	Lições retroalimentam a Fase 1 do próximo ciclo

Fonte: Elaborado pelos autores, com base em Nonaka e Takeuchi (1997), Probst, Raub e Romhardt (2002) Almeida et al. (2024) e Cerri et al. (2025)

Cada célula do Quadro 4 foi derivada da literatura do portfólio: as colunas "Tecnologias I4.0" reproduzem as associações já identificadas por Almeida et al. (2024) e Cerri et al. (2025); as colunas "Processo SECI predominante" foram inferidas pelos autores deste artigo a partir da natureza da atividade descrita em cada fase pela AIAG (2008), através do modelo de Nonaka e Takeuchi (1997), e ainda não foram validadas empiricamente junto a praticantes o que constitui uma direção prioritária de pesquisa futura (Seção 5.4). As colunas "Atores", "Entradas", "Saídas" e "Retroalimentação" foram construídas por analogia com a estrutura de

responsabilidades descrita no manual do APQP da AIAG (2008) e não constam explicitamente nos estudos revisados, o que reforça o caráter exploratório do modelo.

O ciclo de retroalimentação merece destaque: assim como na espiral do conhecimento de Nonaka e Takeuchi (1997), o conhecimento gerado na Fase 5 (internalização de lições aprendidas) não se limita a corrigir o produto ou processo em curso, mas realimenta a Fase 1 do ciclo seguinte de desenvolvimento, criando um mecanismo cumulativo de retenção organizacional de conhecimento na acepção de Probst, Raub e Romhardt (2002).

O modelo proposto não substitui o APQP tradicional, mas o potencializa ao adicionar camadas de predição, rastreabilidade digital, automação e explicitação dos fluxos de conhecimento às suas fases.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E IMPLICAÇÕES

5.1. Contribuição do Trabalho

Este artigo contribui para a gestão do conhecimento ao propor um modelo conceitual que integra APQP, Indústria 4.0 e os processos de conhecimento de Nonaka e Takeuchi (1997) e de Probst, Raub e Romhardt (2002), sistematizando oportunidades identificadas na literatura. O modelo constitui um artefato que organiza conhecimentos dispersos, oferecendo um framework orientador para profissionais e pesquisadores.

5.2. Implicações Teóricas e Práticas

Teoricamente, o estudo avança ao identificar e organizar as relações entre APQP, I4.0 e GC, preenchendo uma lacuna na literatura. Na prática, o modelo oferece um ponto de partida estruturado para que empresas automotivas possam planejar a integração entre qualidade, gestão do conhecimento e inovação digital.

5.3. Implicações Gerenciais

Para gestores, o modelo APQP 4.0 oferece um roteiro para priorizar investimentos em tecnologias I4.0 em cada fase do desenvolvimento de produtos, facilitando a alocação de recursos, o alinhamento entre áreas e a identificação dos atores responsáveis por cada fluxo de conhecimento.

5.4. Limitações da Pesquisa e Estudos Futuros

O estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. Primeiro, a busca restringiu-se a três bases (Google Acadêmico, SciELO e Revista Mecatrônica SENAI); bases adicionais, como Scopus e Web of Science, poderiam ampliar a cobertura. Segundo, o portfólio final é reduzido (8), incluindo uma dissertação incorporada excepcionalmente; embora essa exceção tenha sido tratada na Seção 3, a inclusão da dissertação limita a generalização dos achados. Terceiro, e mais importante, o modelo conceitual proposto no Quadro 4 baseia-se exclusivamente em revisão bibliográfica e em inferências dos autores sobre os processos SECI de cada fase, não incluindo validação empírica junto a organizações do setor automotivo. Suas conclusões devem, portanto, ser interpretadas como hipóteses de trabalho, e não como resultados comprovados.

Recomenda-se que pesquisas futuras apliquem o modelo em estudos de caso ou pesquisa-ação em empresas do setor automotivo, testando e refinando as associações entre fases, atores e processos de conhecimento; validem, junto a especialistas, por exemplo, por meio de painel Delphi, a classificação de cada fase do APQP nos quatro modos do modelo SECI; e ampliem a revisão sistemática para outras bases, com aplicação de instrumentos formais de avaliação da qualidade metodológica dos estudos incluídos.

6. REFERÊNCIAS

AIAG - AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. APQP - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto & Plano de Controle. 2. ed. Southfield: AIAG, 2008.

AIAG - AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. APQP - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto & Plano de Controle. 3. ed. Southfield: AIAG, 2024.

ALMEIDA, A. T. S. B.; LOPES, G. S.; NASCIMENTO, J. D. M.; IBUSUKI, U. O impacto da Indústria 4.0 na qualidade do produto e o impacto das tecnologias habilitadoras na operação. *Revista Brasileira de Mecatrônica*, v. 7, n. 1, p. 35-51, 2024.
doi:10.62899/revistabrmeatronics. v7i1.230.

CERRI, A. F.; SÁ, L. C.; MONEGATTO, F.; ZIGON, M.; ELEUTÉRIO, V.; RAMOS, G.; MARTINS, F.; DAMIÃO, E. Virtualização como Transformação Digital aplicada ao Desenvolvimento de Peças e Processos de injeção plástica na indústria automobilística: benefícios da abordagem preventiva na otimização de custo, "timing", dimensional e aparência. In: *SIMEA 2025 - SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA*, 2025, São Paulo. Anais... São Paulo: AEA, 2025.

CIMINO, C. P.; NASCIMENTO, D. R. Revisão bibliográfica sobre a Indústria 4.0: Impactos das tecnologias contemporâneas nas indústrias automotivas brasileiras e suas implicações

para otimização de processos. Revista Espacios, v. 46, n. 3, p. 207-218, 2025.
doi:10.48082/espacios-a25v46n03p16.

FARIA, A.; IBUSUKI, U. Integração de PLM e APQP na Indústria 4.0: um estudo de caso aplicado no setor automotivo. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2024.

GOECKS, L. S.; SANTOS, A. A.; KORZENOWSKI, A. L. Tendências de tomada de decisão em gestão da qualidade: uma revisão de literatura sobre a Indústria 4.0. Revista Produção, v. 30, e20200018, 2020. doi:10.1590/0103-6513.20200018.

IATF - INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. IATF 16949:2016 - Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos para organizações de produção automotiva e de peças de reposição relevantes. 1. ed. Detroit: AIAG, 2016.

LIMA JR., G. S.; FERNANDES NETO, A. P. Revisão bibliográfica sobre o impacto da automação na produtividade industrial. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2024.

NONAKA, I.; TAKEUCHI, H. Criação de conhecimento na empresa. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, v. 372, n. 71, 2021. doi: 10.1136/bmj. n71.

PROBST, G.; RAUB, S.; ROMHARDT, K. Gestão do conhecimento: os pilares do sucesso. Porto Alegre: Bookman, 2002.

ROCHA, J. R. P.; SALERNO, M. S. O papel do APQP – Advanced Planning for Product Quality no desenvolvimento de produtos: análise de casos na relação montadora-autopeças. Revista Gestão & Produção, v. 21, n. 4, p. 801-813, 2014.

SANTOS, R. M. et al. Estudos de caso da Indústria 4.0 aplicados em uma empresa automobilística. In: POSGERE, 2017, São Paulo. Anais... 2017.

SÁTYRO, W. C.; SACOMANO, J. B.; CONTADOR, J. C.; et al. (org.). Indústria 4.0: conceitos e fundamentos. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

TESSARINI JR., G.; SALTORATO, P. Impactos da indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. Revista Produção Online, v. 18, n. 2, p. 743-769, 2018. doi:10.14488/1676-1901.v18i2.2967.