REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

O CUSTO OCULTO DA FALTA DE RASTREABILIDADE NA INDÚSTRIA: ARQUITETURA DE UMA PLATAFORMA INTEGRADA PARA ANÁLISE DE CAUSA RAIZ

THE HIDDEN COST OF LACK OF TRACEABILITY IN INDUSTRY: ARCHITECTURE OF AN INTEGRATED PLATFORM FOR ROOT CAUSE ANALYSIS

Engenharias • 14/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/794381019

Fernanda Pires Tavares[1]

Siomara Dias da Rocha[2]

RESUMO

A ausência de rastreabilidade em processos industriais reduz a capacidade de identificar a origem de falhas, amplia o tempo necessário para contenção de não conformidades e favorece a recorrência de problemas. Este artigo apresenta a arquitetura conceitual de uma plataforma integrada de rastreabilidade industrial destinada à coleta de dados de máquinas, produtos, materiais, processos e inspeções, com suporte à análise de causa raiz. Adotou-se uma pesquisa aplicada, de natureza tecnológica, estruturada segundo princípios de Design Science Research. O desenvolvimento compreendeu a delimitação do problema, o levantamento de requisitos, a modelagem da arquitetura, a definição de um modelo unificado de dados e a construção de cenários simulados de avaliação. A solução é organizada em três pilares: rastreabilidade de máquinas e processos, rastreabilidade de materiais e produtos e análise de causa raiz apoiada por regras e Inteligência Artificial. Como infraestrutura transversal, foram definidos controle de acesso baseado em papéis, auditoria, persistência de dados e gestão de integrações. Em cenário simulado, a adoção da plataforma reduziu o retrabalho de 15% para 3%, o consumo adicional de matéria-prima em 15%, o atraso médio de 48 para 12 horas e elevou o Net Promoter Score em 22 pontos. Esses números representam metas hipotéticas para validação futura, e não resultados de implantação industrial. Conclui-se que a integração dos dados em um modelo único pode reduzir o tempo de investigação, ampliar a rastreabilidade e estruturar análises de causa raiz mais consistentes.

Palavras-chave: Rastreabilidade industrial; Análise de causa raiz; Indústria 4.0; Inteligência Artificial; Gestão da qualidade; Integração de dados.

ABSTRACT

The absence of traceability in industrial processes reduces the ability to identify failure origins, increases the time required to contain nonconformities, and contributes to recurring problems. This article presents the conceptual architecture of an integrated industrial traceability platform designed to collect data from machines, products, materials, processes, and inspections, supporting root cause analysis. An applied technological research approach was adopted, structured according to Design Science Research principles. The development comprised problem definition, requirements gathering, architectural modeling, definition of a unified data model, and construction of simulated evaluation scenarios. The solution is organized into three pillars: machine and process traceability, material and product traceability, and root cause analysis supported by rules and Artificial Intelligence. Role-based access control, auditing, data persistence, and integration management were defined as cross-functional infrastructure. In a simulated scenario, platform adoption reduced rework from 15% to 3%, reduced additional raw material consumption by 15%, reduced average delays from 48 to 12 hours, and increased the Net Promoter Score by 22 points. These figures represent hypothetical targets for future validation rather than results from an industrial implementation. It is concluded that integrating data into a unified model can reduce investigation time, improve traceability, and support more consistent root cause analyses.

Keywords: Industrial traceability; Root cause analysis; Industry 4.0; Artificial Intelligence; Quality management; Data integration.

1. INTRODUÇÃO

A rastreabilidade pode ser definida como a capacidade de recuperar a história, a aplicação ou a localização de um objeto por meio de informações registradas e identificáveis (ABNT, 2015a). No ambiente industrial, esse conceito ultrapassa a identificação do produto acabado, envolvendo a relação entre lotes de matérias-primas, parâmetros de processo, equipamentos, operadores, ferramentas, programas de produção, inspeções e resultados de qualidade. Dessa forma, a rastreabilidade constitui um mecanismo de conexão entre diferentes etapas do processo produtivo, permitindo reconstruir o histórico de fabricação e relacioná-lo às condições sob as quais determinado produto foi obtido.

Apesar da relevância atribuída à rastreabilidade por normas e pela literatura especializada, ainda são encontrados ambientes produtivos nos quais informações críticas permanecem distribuídas entre planilhas eletrônicas, registros físicos, sistemas departamentais e aplicações sem comunicação adequada entre si. Essa fragmentação dificulta a consolidação das informações e compromete a formação de uma fonte única de dados para consulta e análise. Nesse contexto, os sistemas de execução da manufatura (MES) desempenham papel relevante ao permitir o acompanhamento dos processos produtivos, o registro de informações operacionais e a integração de dados relacionados à fabricação e à qualidade (Kletti, 2007).

A ausência dessa integração pode tornar a investigação de falhas dependente da coleta manual de registros e da comparação entre informações produzidas em diferentes sistemas.

A dificuldade torna-se particularmente evidente diante da ocorrência de uma não conformidade. Nessa situação, o profissional

responsável pela qualidade precisa reconstruir o histórico do produto e verificar possíveis relações entre as condições de fabricação e o desvio observado. Entre as possibilidades de investigação encontram-se os seis grupos tradicionalmente associados ao diagrama de causa e efeito: Máquina, Método, Material, Mão de Obra, Medida e Meio Ambiente (Ishikawa, 1986). Quando os registros estão dispersos, cada hipótese pode exigir consultas a diferentes fontes de informação, tornando o processo de análise mais demorado e dificultando a correlação entre variáveis.

A Norma Internacional de Sistema de Gestão da Qualidade Específica para a Indústria Automotiva (IATF - 16949:2016), específica para organizações da cadeia automotiva, estabelece requisitos relacionados à identificação e à rastreabilidade dos produtos, contribuindo para a contenção e o controle de produtos não conformes, embora não determine uma arquitetura tecnológica única para sua implementação (Iatf, 2016).

Os impactos associados à deficiência de rastreabilidade não se restringem às atividades do setor da qualidade. A dificuldade de identificar a origem de uma falha pode resultar em retrabalho, desperdício de materiais, bloqueio de lotes, atrasos de entrega, utilização inadequada da capacidade produtiva e reincidência de problemas. Sob a perspectiva da gestão da qualidade, esses efeitos podem ser compreendidos no âmbito dos custos associados às falhas e à não conformidade.

Crosby (1979) destaca a importância da prevenção dos problemas de qualidade, enquanto Feigenbaum (1991) aborda a necessidade de integrar as atividades relacionadas à qualidade às diferentes áreas da organização. Assim, os efeitos econômicos decorrentes das falhas

não devem ser analisados exclusivamente pelos custos diretos de inspeção ou correção, mas também pelas perdas decorrentes da ocorrência de não conformidades ao longo do processo produtivo.

O desenvolvimento da Indústria 4.0 ampliou as possibilidades de rastreabilidade ao possibilitar a aquisição, o armazenamento e a integração de dados provenientes de diferentes pontos do processo produtivo. Sensores industriais, Internet das Coisas (IoT), sistemas de Execução de Manufatura (MES), sistemas de Planejamento de Recursos Empresariais (ERP), computação em nuvem e mecanismos de integração vertical e horizontal podem contribuir para a formação de uma infraestrutura capaz de conectar equipamentos, processos e sistemas de gestão (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Nesse contexto, o modelo de arquitetura de referência RAMI 4.0 propõe uma estrutura para organizar diferentes dimensões da integração e da interoperabilidade associadas aos sistemas industriais, constituindo uma referência para a concepção de arquiteturas de Indústria 4.0 (DIN, 2016).

Entretanto, a simples conexão entre dispositivos não assegura, por si só, a integração adequada dos dados. A existência de diferentes sistemas, equipamentos e fontes de informação exige mecanismos capazes de estabelecer relações coerentes entre os registros e seus respectivos contextos de produção. Dessa forma, uma arquitetura de rastreabilidade deve considerar não apenas a aquisição dos dados, mas também sua identificação, armazenamento, relacionamento, recuperação e utilização para fins de análise e tomada de decisão.

A perspectiva da Indústria 5.0 acrescenta a esse cenário uma abordagem orientada à colaboração entre pessoas e sistemas tecnológicos, incorporando princípios relacionados à sustentabilidade, à resiliência e ao caráter centrado no ser humano (*human-centric*) (European Commission, 2021).

A literatura recente também destaca a centralidade humana como um dos elementos estruturantes dos sistemas de manufatura associados à Indústria 5.0, enfatizando a complementaridade entre capacidades humanas, tecnologias digitais e sistemas inteligentes (Zhang et al., 2023). Sob essa perspectiva, sistemas computacionais podem ampliar a capacidade de interpretação das informações e apoiar a tomada de decisão, sem necessariamente substituir o julgamento do especialista. Essa característica é particularmente relevante na análise de não conformidades, uma vez que a identificação de correlações entre variáveis não implica, por si só, a determinação automática da causa raiz.

Diante desse contexto, este trabalho parte da premissa de que os dados relacionados a máquinas, materiais, produtos, processos e qualidade devem ser integrados de forma a permitir sua recuperação e correlação ao longo do ciclo produtivo. O objetivo é apresentar a arquitetura de uma plataforma integrada de rastreabilidade destinada a apoiar a investigação de não conformidades e a análise de causa raiz.

A proposta considera princípios de integração e interoperabilidade associados à Indústria 4.0, tomando como referência o modelo de arquitetura RAMI 4.0 (DIN, 2016), além dos requisitos da ABNT NBR ISO 9001:2015 relacionados à informação documentada, ao controle

dos processos e à identificação e rastreabilidade quando aplicáveis (ABNT, 2015).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Rastreabilidade Industrial

A rastreabilidade industrial corresponde à capacidade de recuperar a história, aplicação ou localização de um produto ou atividade por meio de informações registradas e identificáveis (ABNT, 2015a). Na gestão da qualidade, a ABNT NBR ISO 9001:2015 estabelece que, quando a rastreabilidade constitui requisito, a organização deve assegurar a identificação adequada dos produtos e manter as informações necessárias para seu acompanhamento (ABNT, 2015b).

Historicamente associada ao controle de qualidade e à necessidade de identificação de produtos e componentes, a rastreabilidade evoluiu com a incorporação de tecnologias digitais. Na Indústria 4.0, passou a envolver a integração de informações provenientes de diferentes etapas e sistemas produtivos, permitindo acompanhar materiais, processos, equipamentos e resultados de qualidade ao longo da cadeia de valor (Hermann; Pentek; Otto, 2016).

Nesse contexto, distingue-se a rastreabilidade interna, limitada aos processos sob controle da organização, da externa, que envolve fornecedores, distribuidores e demais participantes da cadeia de suprimentos. Também pode apresentar diferentes níveis de granularidade, desde o acompanhamento por produto ou lote até a rastreabilidade unitária.

2.2. Rastreabilidade e Normas Regulatórias

A rastreabilidade é contemplada por diferentes normas de gestão e requisitos setoriais. A ISO 9001:2015 estabelece requisitos relacionados à identificação e rastreabilidade quando aplicáveis, enquanto a IATF 16949:2016 apresenta requisitos adicionais para a indústria automotiva. Outros setores possuem normas específicas, como a ABNT NBR ISO 22000 para segurança de alimentos.

Embora essas normas estabeleçam os resultados esperados, em geral não determinam uma arquitetura tecnológica específica para implementação da rastreabilidade. Essa característica cria um espaço de decisão para as organizações quanto à integração de sistemas, modelos de dados, mecanismos de armazenamento e formas de recuperação das informações.

2.3. Barreiras à Rastreabilidade Efetiva

Entre as principais barreiras à rastreabilidade encontram-se a fragmentação das informações em diferentes sistemas, a utilização de registros manuais, a incompatibilidade semântica entre fontes de dados e os custos associados à implantação e manutenção das soluções. Em ambientes industriais, dados de produção, estoque, qualidade, manutenção e sensores podem permanecer distribuídos em sistemas distintos, com diferentes identificadores, formatos e granularidades temporais.

Essa fragmentação dificulta a reconstrução do histórico do produto e aumenta a dependência de intervenções manuais. A ausência de modelos de dados compartilhados também pode impedir a correlação automática entre eventos, materiais, equipamentos e resultados de qualidade. Dessa forma, a efetividade da

rastreabilidade depende não apenas da existência de registros, mas da capacidade de relacioná-los de maneira consistente.

2.4. Custo da Não Conformidade e da Falta de Rastreabilidade

Os custos da qualidade podem ser classificados em prevenção, avaliação, falhas internas e falhas externas (Crosby, 1979; Feigenbaum, 1991; Juran; Gryna, 1993). A falta de rastreabilidade pode ampliar principalmente os custos relacionados às falhas, uma vez que dificulta a delimitação do escopo das não conformidades e prolonga as investigações.

Entre os principais efeitos estão retrabalho, descarte, bloqueio de lotes, atrasos de entrega, redução da capacidade produtiva e reincidência de falhas. Parte desses custos permanece distribuída entre diferentes setores e centros de custo, dificultando sua mensuração como consequência direta da deficiência de rastreabilidade. Por isso, indicadores de tempo de investigação, extensão dos lotes bloqueados, retrabalho, descarte e custos associados às falhas são relevantes para avaliar o impacto econômico da solução.

2.5. Análise de Causa Raiz e Diagrama de Ishikawa

A análise de causa raiz (RCA) constitui uma abordagem sistemática para identificar as causas fundamentais de eventos indesejados e reduzir sua recorrência. O processo envolve, de modo geral, a detecção do problema, contenção, coleta e análise de evidências, implementação de ações corretivas e verificação da eficácia das medidas adotadas (Okes, 2009).

Entre as ferramentas utilizadas encontram-se os 5 Porquês, o Diagrama de Pareto, a FMEA e o Diagrama de Ishikawa. Este último organiza as causas potenciais de um problema em categorias analíticas, tradicionalmente representadas pelos seis fatores: Máquina, Método, Material, Mão de Obra, Medida e Meio Ambiente (Ishikawa, 1986).

A relação entre rastreabilidade e RCA é direta: a rastreabilidade fornece as evidências necessárias à investigação, enquanto a RCA permite identificar quais informações são relevantes para compreender uma falha. Assim, quanto maior a integração e a qualidade dos dados disponíveis, maior tende a ser a capacidade de realizar investigações fundamentadas em evidências.

2.6. Sistemas de Informação Industrial

Os sistemas industriais desempenham funções complementares na formação do histórico produtivo. Os sistemas MES concentram informações relacionadas à execução da produção, permitindo registrar ordens, eventos, parâmetros e genealogia dos produtos (Kletti, 2007).

Os sistemas ERP concentram informações administrativas, comerciais e logísticas, como compras, estoques, fornecedores e movimentações de materiais (Davenport, 1998). Os sistemas QMS, por sua vez, armazenam informações relacionadas à qualidade, inspeções, não conformidades e ações corretivas.

A utilização isolada desses sistemas produz lacunas na reconstrução do histórico. A integração ERP-MES-QMS, associada aos dados de sensores e sistemas de manutenção, permite relacionar materiais, processos, equipamentos e resultados de qualidade. Nesse contexto,

o conceito de fonte única de verdade (Single Source of Truth) representa a necessidade de estabelecer uma visão lógica e consistente dos dados, independentemente de sua origem.

2.7. Indústria 4.0 e Tecnologias Habilitadoras

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração entre tecnologias digitais e sistemas de manufatura, buscando maior conectividade, flexibilidade e capacidade de decisão. Entre seus princípios destacam-se as integrações vertical, horizontal e ponta a ponta (Hermann; Pentek; Otto, 2016). O modelo RAMI 4.0, definido pela DIN SPEC 91345, fornece uma referência arquitetural para organização e integração de sistemas industriais (DIN, 2016).

Nesse contexto, tecnologias como Internet das Coisas Industrial (IIoT), sensores, computação em nuvem e edge computing possibilitam a coleta e o processamento de dados em diferentes níveis do processo produtivo. Protocolos e padrões industriais, como OPC UA e ISA-95, contribuem para a interoperabilidade e organização das informações.

O Digital Twin amplia essas possibilidades ao representar virtualmente ativos, processos ou sistemas físicos, permitindo relacionar seu comportamento a dados obtidos do ambiente produtivo (Tao et al., 2019). O Blockchain também pode ser utilizado em aplicações de rastreabilidade nas quais a integridade e a confiabilidade dos registros sejam relevantes (Saberi et al., 2019). Entretanto, essas tecnologias não eliminam problemas de qualidade, semântica ou governança dos dados e devem ser utilizadas de acordo com as necessidades específicas da arquitetura proposta.

2.8. Indústria 5.0 e Colaboração Humano-Sistema

A Indústria 5.0 complementa a perspectiva tecnológica da Indústria 4.0 ao enfatizar três dimensões: humanocentrismo, sustentabilidade e resiliência (European Commission, 2021). No contexto da rastreabilidade e da análise de causa raiz, essa abordagem reforça a importância da interação entre sistemas inteligentes e especialistas humanos.

Sistemas integrados podem organizar grandes volumes de dados, identificar padrões e apoiar a investigação, mas a interpretação das evidências e a decisão sobre ações corretivas permanecem dependentes do conhecimento técnico e do contexto do processo. Assim, a plataforma de rastreabilidade deve atuar como ferramenta de suporte à decisão, preservando a autonomia e a responsabilidade do especialista.

2.9. Integração de Dados e Modelo Unificado

A integração de dados industriais pode utilizar arquiteturas ETL ou ELT, associadas a mecanismos de interoperabilidade, normalização e enriquecimento das informações. Um pipeline de rastreabilidade deve permitir a ingestão de dados provenientes de MES, ERP, QMS, sensores e outros sistemas, transformando-os em informações relacionadas e contextualizadas.

Nesse processo, a correlação temporal e genealógica é fundamental. Cada evento produtivo deve poder ser relacionado ao material utilizado, equipamento, operador, método, instrumento de medição e condições ambientais correspondentes. A partir dessa estrutura, propõe-se um modelo unificado orientado pelo Diagrama de

Ishikawa, no qual os dados são organizados segundo os fatores Máquina, Método, Material, Mão de Obra, Medida e Meio Ambiente.

Essa abordagem constitui a base conceitual da arquitetura proposta neste trabalho, pois transforma a rastreabilidade de um mecanismo de consulta histórica em uma estrutura de apoio à investigação de não conformidades e à análise de causa raiz.

2.10. Indicadores de Desempenho

A avaliação de uma plataforma de rastreabilidade deve considerar indicadores de eficácia, impacto operacional e desempenho tecnológico. Entre os principais indicadores estão o tempo médio de investigação de não conformidades, a cobertura da rastreabilidade e a taxa de identificação de causas raiz.

Também podem ser avaliados a redução de retrabalho e descarte, o tempo de contenção de lotes e os custos associados às falhas. Do ponto de vista tecnológico, destacam-se a latência de ingestão e consulta, a disponibilidade e integridade dos dados, a escalabilidade e a interoperabilidade da plataforma.

Esses indicadores permitem avaliar não apenas se os dados estão disponíveis, mas se sua integração efetivamente contribui para reduzir o tempo de investigação, ampliar a precisão da análise e melhorar os resultados operacionais.

3. METODOLOGIA

*3.*1. Delineamento da Pesquisa

O estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, de natureza tecnológica, com abordagem qualitativa e elementos quantitativos descritivos. A condução segue princípios de Design Science Research, pois tem como produto um artefato: a arquitetura conceitual de uma plataforma integrada de rastreabilidade. O trabalho foi estruturado em cinco etapas:

1. Identificação do problema e de seus impactos.
2. Levantamento dos requisitos da plataforma.
3. Modelagem da arquitetura e do fluxo de rastreabilidade.
4. Definição do modelo unificado de dados.
5. Construção de cenários simulados e indicadores de avaliação.

A proposta não foi implantada em uma linha industrial real. Assim, os resultados quantitativos apresentados representam cenários hipotéticos, elaborados para demonstrar como a solução deverá ser avaliada posteriormente.

3.2. Requisitos da Solução

Foram definidos requisitos funcionais (Quadro 1) e não funcionais (Quadro 2) para orientar a arquitetura.

Quadro 1. Requisitos funcionais.

Código	**Requisito**
RF01	Cadastrar máquinas, produtos, materiais, operações e usuários

RF02	Identificar produtos e lotes em cada etapa do processo
RF03	Coletar parâmetros e estados das máquinas
RF04	Associar dados de processo à ordem e ao produto
RF05	Registrar resultados de inspeção e não conformidades
RF06	Recuperar a genealogia completa do produto
RF07	Correlacionar falhas com os fatores do Ishikawa 6M
RF08	Emitir alertas para desvios de processo
RF09	Registrar ações de contenção, correção e prevenção
RF10	Gerar trilha de auditoria das operações

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quadro 2. Requisitos não funcionais.

Código	**Requisito**
RNF01	Controle de acesso baseado em papéis
RNF02	Integridade e persistência dos registros
RNF03	Marcação temporal sincronizada
RNF04	Disponibilidade para consulta operacional
RNF05	Escalabilidade para múltiplas linhas
RNF06	Interoperabilidade com MES, ERP e equipamentos
RNF07	Explicabilidade das recomendações de IA
RNF08	Proteção dos dados pessoais e industriais

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3. Arquitetura da Plataforma

A solução foi organizada em três pilares funcionais:

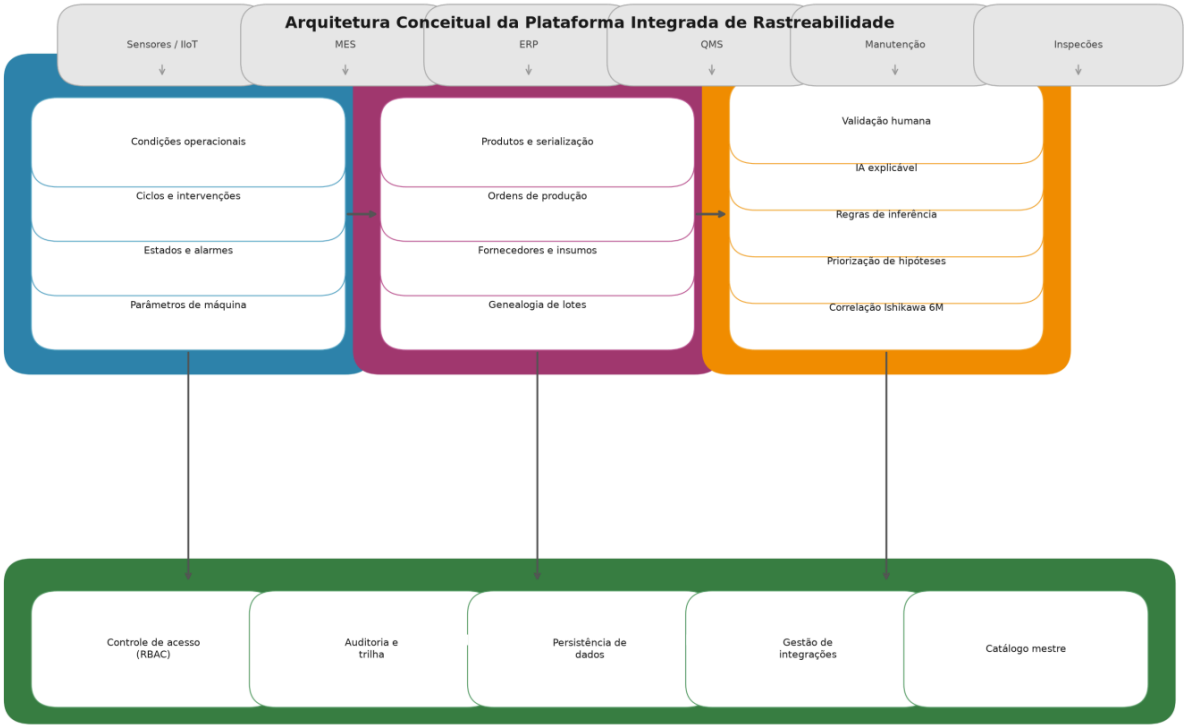
1. Rastreabilidade de máquinas e processos: coleta parâmetros, alarmes, ciclos, estados e intervenções.

2. Rastreabilidade de materiais e produtos: constrói a genealogia entre fornecedores, lotes, ordens, operações e produtos.

3. Análise de causa raiz: correlaciona os registros, organiza evidências segundo o Ishikawa 6M e prioriza hipóteses.

Os pilares compartilham uma infraestrutura transversal formada por persistência, auditoria, controle de acesso, gestão de integrações e catálogo mestre, conforme a Figura 1.

Figura 1. Arquitetura conceitual da plataforma integrada de rastreabilidade.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.4. Pipeline de Integração

A coleta de dados deve ocorrer próxima à origem. Controladores, sensores, equipamentos de inspeção e sistemas corporativos enviam eventos para uma camada de integração. Os dados são validados, contextualizados e armazenados antes de serem utilizados por painéis, alertas e modelos analíticos, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2. Pipeline de coleta, contextualização e análise.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.5. Modelo Unificado de Dados

O modelo foi estruturado em torno de entidades capazes de representar a genealogia do produto e as condições do processo, conforme o Quadro 3.

Quadro 3. Modelo unificado de dados.

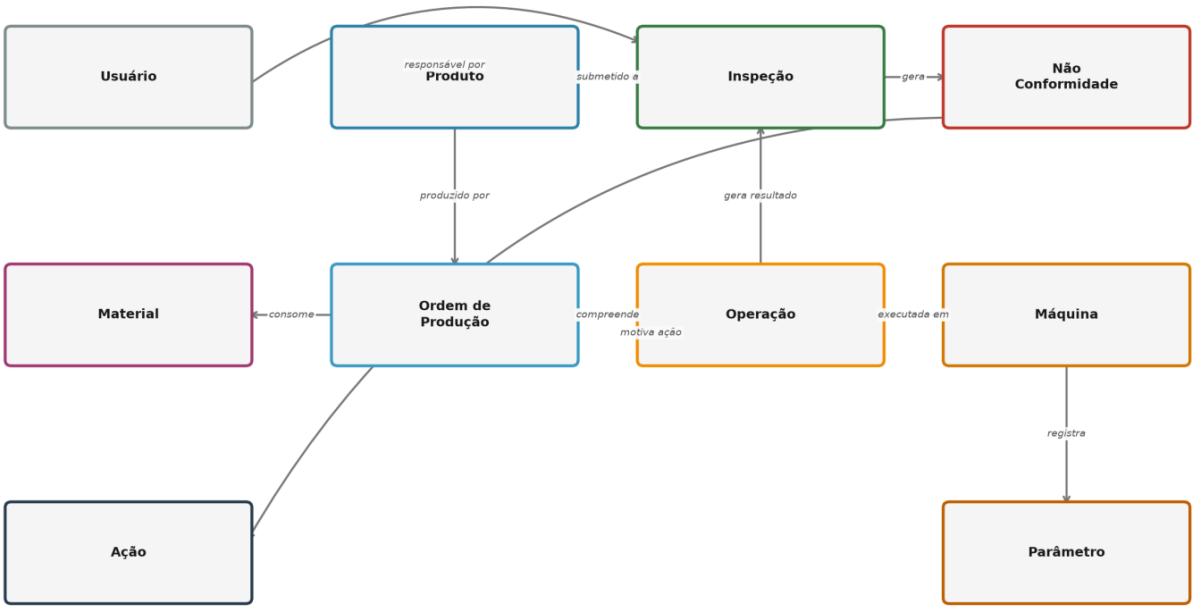
Entidade	**Função principal**
Produto	Representar o item rastreado por lote ou número de série
Ordem de produção	Vincular produto, quantidade, roteiro e período
Material	Registrar lote, fornecedor e consumo

Operação	Representar cada etapa executada no produto
Máquina	Identificar o recurso e seu histórico operacional
Parâmetro	Armazenar valor, unidade, limite e instante de coleta
Inspeção	Registrar medições e decisão de conformidade
Não conformidade	Representar o desvio e os itens potencialmente afetados
Usuário	Identificar o responsável por operações e decisões
Ação	Registrar contenção, correção e ação preventiva

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

A Figura 3 apresenta os relacionamentos principais entre essas entidades, evidenciando como a ordem de produção articula materiais, operações, máquinas, parâmetros e resultados de inspeção.

Figura 3. Relacionamentos principais do modelo de dados.

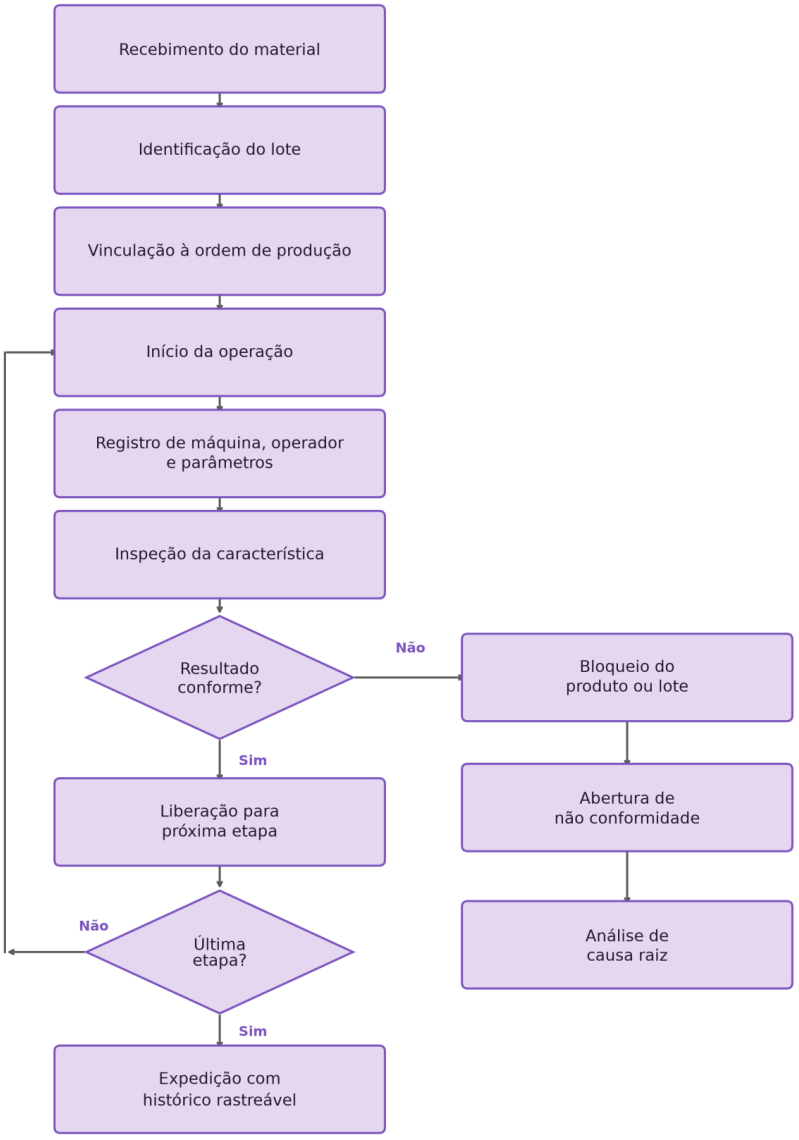


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.6. Fluxo de Rastreamento do Produto

Cada unidade ou lote recebe um identificador, associado à ordem de produção. Em cada operação, o sistema registra os recursos, materiais, parâmetros e resultados de inspeção. Essa cadeia produz a genealogia necessária para análises posteriores, conforme a Figura 4.

Figura 4. Fluxo de rastreamento ao longo da produção.

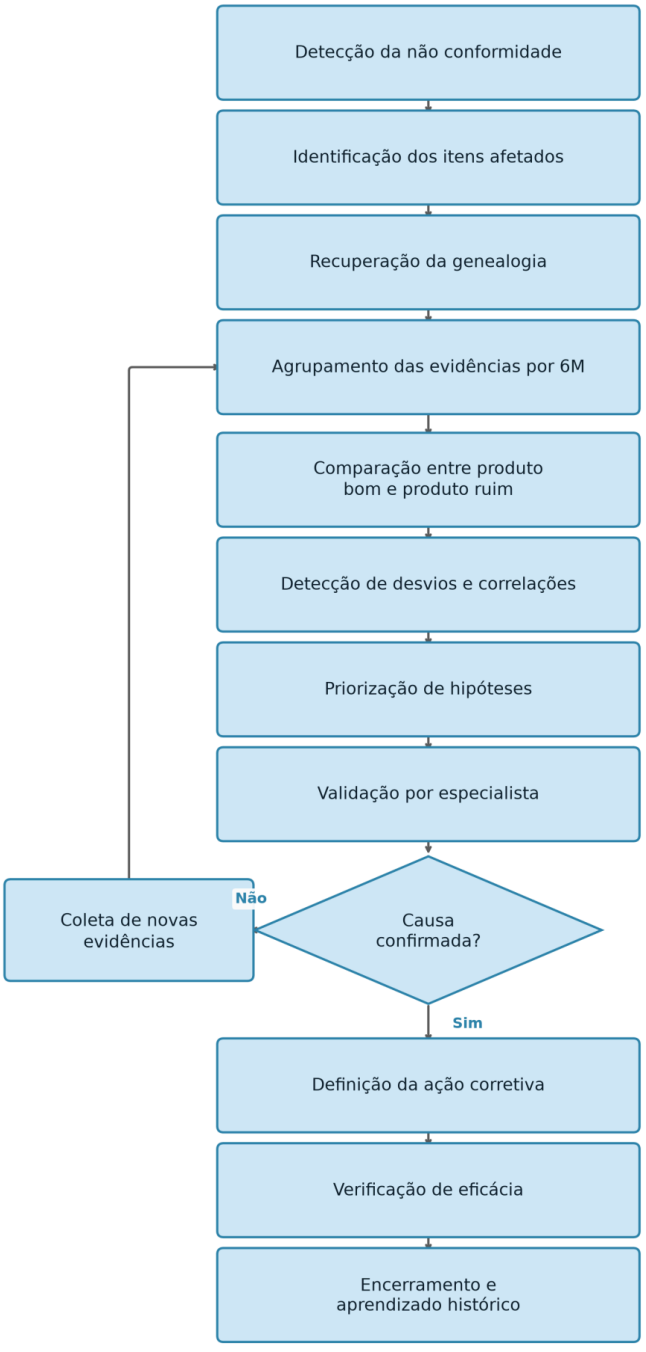


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.7. Fluxo de Análise de Causa Raiz

A análise inicia-se com uma não conformidade e com a definição do universo de produtos potencialmente afetados. Em seguida, o sistema recupera os registros relacionados aos seis grupos do Ishikawa, compara unidades conformes e não conformes e prioriza hipóteses. A Figura 5 representa esse fluxo de investigação apoiada por dados e Inteligência Artificial.

Figura 5. Fluxo de investigação apoiada por dados e IA.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.8. Uso da Inteligência Artificial

A IA proposta atua como camada auxiliar, e não como autoridade autônoma. Suas funções incluem:

- Detectar padrões anormais em séries temporais.
- Comparar populações de produtos conformes e não conformes.
- Identificar variáveis associadas à ocorrência de defeitos.
- Classificar hipóteses conforme relevância e evidência disponível.
- Recuperar casos históricos semelhantes.
- Sugerir verificações adicionais ao especialista.

Cada recomendação deve exibir os dados utilizados, a confiança estimada e as limitações conhecidas. Nenhuma disposição de produto ou alteração automática de processo deve ocorrer sem regra previamente autorizada ou validação humana.

3.9. Procedimento de Avaliação Futura

A avaliação em ambiente produtivo deverá comparar períodos anteriores e posteriores à implantação, controlando diferenças de volume e mix de produção. Recomenda-se um estudo piloto em uma linha, seguido da expansão gradual. Os indicadores propostos estão listados no Quadro 4:

Quadro 4. Indicadores

Indicador	Cálculo
Taxa de retrabalho	Unidades retrabalhadas / unidades produzidas
Taxa de sucata	Unidades descartadas / unidades produzidas
Tempo de investigação	Encerramento da causa - abertura da ocorrência
Tempo de contenção	Bloqueio completo - detecção da falha
Recorrência	Falhas repetidas / falhas encerradas
Completude do rastreio	Registros completos / operações realizadas
Precisão dos alertas	Alertas confirmados / alertas emitidos
Custo da não qualidade	Soma dos custos de falha interna e externa

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Impactos da Ausência de Rastreabilidade

A arquitetura proposta permite organizar os impactos da falta de rastreabilidade em quatro grupos principais:

- **Financeiros:** retrabalho, sucata, garantia, fretes emergenciais e perda de material.
- **Operacionais:** parada de linha, bloqueio excessivo de lotes e atraso na liberação.
- **Analíticos:** investigações demoradas, hipóteses não verificáveis e reincidência.

- **Comerciais:** reclamações, perda de confiança e redução da satisfação do cliente.

O efeito mais crítico não é necessariamente a ocorrência inicial do defeito, mas a incapacidade de delimitar sua extensão. Sem genealogia confiável, a empresa tende a bloquear uma quantidade maior de produtos do que o necessário ou, no sentido oposto, liberar produtos potencialmente afetados.

4.2. Funcionamento Esperado dos Três Pilares

- O primeiro pilar fornece visibilidade sobre parâmetros, estados e intervenções das máquinas. Seu objetivo é registrar as condições reais sob as quais cada unidade foi processada.

- O segundo pilar associa materiais, ordens e produtos em uma genealogia navegável. A partir de um produto defeituoso, torna-se possível identificar os lotes de insumos utilizados; a partir de um lote suspeito, torna-se possível localizar todos os produtos que o consumiram.

- O terceiro pilar transforma essa base histórica em evidências para a investigação. Em vez de iniciar a análise apenas com uma reunião e um diagrama em branco, o profissional recebe hipóteses associadas a dados verificáveis.

Dessa forma, a arquitetura articula os três pilares em um ciclo contínuo de registro, correlação e aprendizado, coerente com a perspectiva human-centric da Indústria 5.0 (European Commission, 2021; Zhang et al., 2023), na qual a decisão final permanece com o especialista.

4.3. Cenário Quantitativo Simulado

Para demonstrar a aplicação dos indicadores, foi construído um cenário hipotético de comparação entre uma situação inicial e uma situação posterior à implantação. Os valores não representam medição em fábrica e estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Cenário quantitativo simulado dos indicadores.

Indicador	Situação inicial	Cenário com rastreabilidade	Variação
Retrabalho	15%	3%	-12 pontos percentuais
Consumo adicional de matéria-prima	100% da referência	85% da referência	-15%
Atraso médio	48 h	12 h	-75%
NPS	52 pontos	74 pontos	+22 pontos
Tempo médio de investigação	16 h	4 h	-75%
Completude dos registros	60%	95%	+35 pontos percentuais

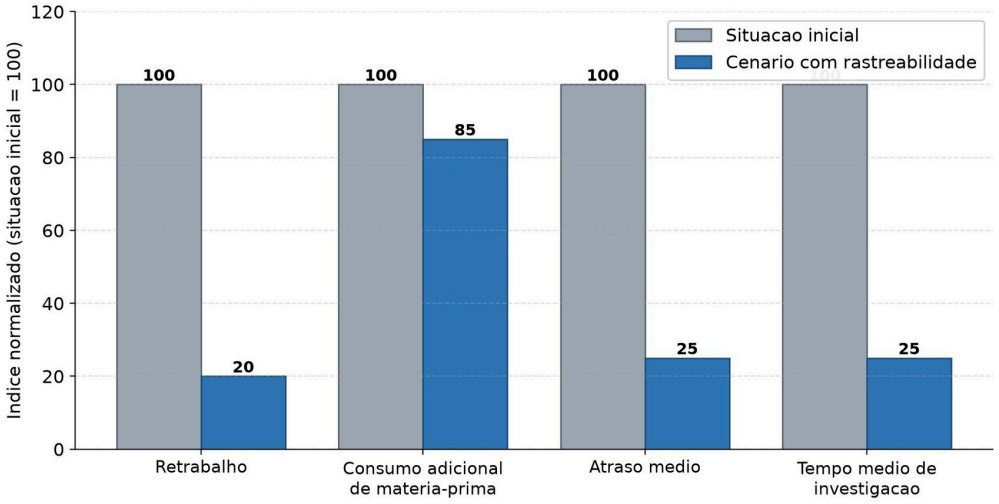
Fonte: Cenário hipotético elaborado pelos autores (2026).

Os valores reforçam que os maiores ganhos potenciais concentram-se no tempo de investigação e no atraso médio, ambos reduzidos em 75%, e na completude dos registros, que passa a sustentar todas as demais análises. A melhoria do NPS, por sua vez, indica que os efeitos internos da rastreabilidade tendem a se propagar para a percepção do cliente.

4.4. Gráfico Comparativo Normalizado

Como os indicadores possuem unidades diferentes, a Figura 6 utiliza uma escala normalizada, atribuindo 100 à situação inicial para os indicadores em que valores menores representam melhor desempenho.

Figura 6. Comparação normalizada dos indicadores operacionais.



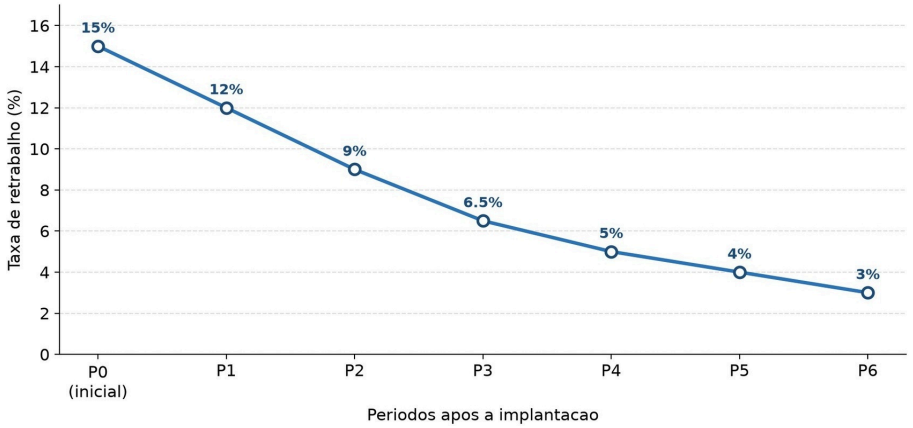
Fonte: Cenário hipotético elaborado pelos autores (2026).

O índice de retrabalho foi reduzido de 100 para 20 porque a taxa simulada passou de 15% para 3%. Atrasos e tempo de investigação foram reduzidos para 25, representando uma diminuição de 75%. O consumo adicional de matéria-prima apresentou redução mais moderada, de 15%, coerente com o fato de que parte do desperdício decorre de fatores que a rastreabilidade não elimina por completo, como variações naturais de processo. A leitura normalizada evidencia que os ganhos não são homogêneos: eles se concentram nas atividades diretamente dependentes da disponibilidade de informação.

4.5. Evolução Hipotética do Retrabalho

Para evitar uma comparação limitada a apenas dois pontos, foi estruturada uma evolução simulada de seis períodos após a implantação, apresentada na Figura 7.

Figura 7. Evolução hipotética do retrabalho ao longo de seis períodos.



Fonte: Cenário hipotético elaborado pelos autores (2026).

A redução progressiva representa o comportamento esperado de uma implantação gradual. Nos primeiros períodos, os dados tornam-se disponíveis, mas a organização ainda precisa ajustar cadastros, regras e procedimentos. Os ganhos aumentam à medida que as ações corretivas passam a utilizar o histórico consolidado. Essa curva de amadurecimento sugere que a avaliação de uma plataforma de rastreabilidade não deve ser feita imediatamente após a implantação, mas ao longo de um horizonte que permita a estabilização dos processos e a incorporação das lições aprendidas.

4.6. Análise do Tempo de Investigação

O tempo de investigação foi decomposto em quatro atividades para demonstrar onde a rastreabilidade pode gerar economia, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Decomposição do tempo de investigação.

Atividade	Processo manual	Processo integrado
Localização dos registros	5 h	0,5 h
Consolidação das informações	4 h	0,5 h
Análise das hipóteses	5 h	2 h
Elaboração do relatório	2 h	1 h
Total	**16 h**	**4 h**

Fonte: Cenário hipotético elaborado pelos autores (2026).

A principal redução ocorre na busca e na consolidação dos registros. A plataforma não elimina a necessidade de análise técnica, mas permite que o especialista dedique maior parcela do tempo à interpretação das evidências.

4.7. Comparação Entre o Processo Atual e o Processo Proposto

O Quadro 5 compara, etapa a etapa, o processo sem integração e o processo proposto, evidenciando a transição de atividades baseadas em busca manual para atividades apoiadas por dados consolidados.

Quadro 5. Comparação entre o processo atual e o processo proposto.

Etapa	Processo sem integração	Processo proposto
Coleta	Busca em planilhas e formulários	Recuperação automática
Genealogia	Reconstruída manualmente	Gerada pelo sistema
Ishikawa	Baseado em hipóteses iniciais	Alimentado por evidências

Priorização	Dependente da experiência individual	Apoiada por regras e IA
Contenção	Abrangente e demorada	Direcionada aos itens afetados
Auditoria	Registros distribuídos	Histórico único
Aprendizado	Casos encerrados e dispersos	Base histórica reutilizável

Fonte: Cenário hipotético elaborado pelos autores (2026).

A leitura do Quadro 5 reforça que a contribuição da arquitetura não se limita a acelerar tarefas isoladas, mas a alterar a natureza do processo de investigação: de um trabalho reativo e dependente de memória individual para um processo estruturado, auditável e cumulativo.

4.8. Benefícios Esperados

Os benefícios da arquitetura podem ser classificados em três níveis.

- No nível operacional, espera-se reduzir buscas manuais, tempo de contenção, retrabalho e bloqueios desnecessários.

- No nível gerencial, a plataforma consolida indicadores de custo da não qualidade e recorrência.

- No nível estratégico, forma-se uma base histórica capaz de apoiar manutenção preditiva, otimização de processo e gestão do conhecimento.

A visualização em planta baixa 3D pode ser incorporada como camada complementar, desde que tenha finalidade operacional

clara. Alertas podem ser posicionados sobre máquinas ou áreas, facilitando a localização de concentrações de falhas. Essa interface não substitui o modelo analítico; apenas apresenta espacialmente resultados previamente calculados.

4.9. Riscos e Limitações

A solução possui limitações técnicas e organizacionais. A primeira é a qualidade do dado de origem. Um sistema integrado não corrige automaticamente identificadores incorretos, sensores descalibrados ou registros omitidos.

A segunda é a heterogeneidade dos equipamentos. Máquinas legadas podem exigir adaptadores específicos, coleta indireta ou entradas manuais. A terceira é o risco de interpretar correlações produzidas pela IA como causas confirmadas.

A quarta limitação é metodológica: os resultados quantitativos deste artigo são simulados. A eficácia precisa ser confirmada por implantação controlada, medição de linha de base e comparação posterior. Também devem ser considerados segurança cibernética, segregação de funções, proteção de propriedade intelectual e privacidade de dados relacionados aos trabalhadores.

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou a arquitetura conceitual de uma plataforma integrada de rastreabilidade industrial destinada a reunir informações de máquinas, processos, materiais, produtos e qualidade em uma estrutura unificada para apoio à investigação de não conformidades e à análise de causa raiz. A proposta foi desenvolvida a partir dos princípios de integração e

interoperabilidade associados à Indústria 4.0, incorporando também a perspectiva humanocêntrica da Indústria 5.0.

A principal contribuição da arquitetura consiste na articulação de três pilares complementares: rastreabilidade de máquinas e processos; rastreabilidade de materiais e produtos; e análise de causa raiz apoiada por regras e recursos de Inteligência Artificial. A integração desses elementos permite estruturar a genealogia dos produtos e relacionar eventos produtivos, materiais, equipamentos, parâmetros, inspeções e não conformidades, criando uma base de informações capaz de apoiar investigações fundamentadas em evidências.

A proposta também evidencia que a rastreabilidade não deve ser compreendida apenas como um mecanismo de recuperação do histórico de fabricação. Quando associada a um modelo de dados integrado, ela pode constituir uma infraestrutura para análise, auditoria, aprendizagem organizacional e apoio à tomada de decisão. Nesse sentido, a integração entre sistemas MES, ERP, QMS, equipamentos e demais fontes de dados pode reduzir a dependência de consultas manuais e facilitar a reconstrução do histórico necessário à análise de falhas.

Os cenários quantitativos apresentados indicaram reduções simuladas no retrabalho, no atraso médio e no tempo de investigação, além de melhoria na completude dos registros e redução do consumo adicional de matéria-prima. Entretanto, esses valores foram construídos exclusivamente para demonstrar a aplicação dos indicadores propostos e, portanto, não devem ser interpretados como evidências de desempenho obtidas em ambiente industrial. A efetividade da arquitetura somente poderá

ser estabelecida mediante implantação controlada, definição de uma linha de base, acompanhamento longitudinal e comparação dos indicadores antes e após a implementação.

Outro aspecto relevante refere-se à utilização da Inteligência Artificial. No modelo proposto, a IA desempenha função de apoio à análise, podendo identificar padrões, comparar conjuntos de dados, recuperar casos semelhantes e auxiliar na priorização de hipóteses. A determinação da causa raiz, contudo, permanece condicionada à análise das evidências e à validação do especialista. Essa condição é fundamental para evitar que associações estatísticas ou correlações sejam interpretadas automaticamente como relações causais.

Entre as principais limitações identificadas estão a dependência da qualidade dos dados de origem, a heterogeneidade de equipamentos e sistemas legados, os requisitos de interoperabilidade, a necessidade de governança dos dados e os riscos relacionados à segurança cibernética, à proteção de informações industriais e à privacidade. Dessa forma, a implantação de uma plataforma dessa natureza exige não apenas infraestrutura tecnológica, mas também padronização de identificadores, procedimentos, responsabilidades e critérios de validação.

Como continuidade da pesquisa, recomenda-se o desenvolvimento de um protótipo funcional e sua aplicação em uma linha de produção, inicialmente em escala piloto. Essa etapa deverá contemplar a integração progressiva com sistemas MES, ERP e QMS, equipamentos industriais e fontes de dados de qualidade, bem como a validação dos indicadores de desempenho definidos neste estudo. Recomenda-se ainda avaliar a completude e confiabilidade dos dados, o tempo de investigação, a taxa de recorrência das não

conformidades, o tempo de contenção, os custos da não qualidade e a precisão dos alertas e hipóteses gerados pelo sistema.

Assim, a arquitetura proposta constitui uma base conceitual para o desenvolvimento de soluções de rastreabilidade orientadas não apenas à recuperação de informações, mas à transformação dos dados produtivos em evidências estruturadas para investigação e melhoria dos processos. A validação em ambiente industrial será a etapa necessária para verificar em que medida os benefícios projetados se confirmam em condições reais de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9000:2015: sistemas de gestão da qualidade — fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Disponível em: https://tecnologia.qualidade.faccat.br/pluginfile.php/1386/mod_folder/content/0/NORMA%20ISO%2090002015.pdf. Acesso em: 10 jun. 2026.

_____. ABNT NBR ISO 9001:2015: sistemas de gestão da qualidade: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Disponível em: https://abntcatalogo.com.br/sebrae/norma.aspx?Q=b1hQQnJoRjZRRkRLa3RXMVM2bjFMTm93TDNPVVJyR1R4eVMvaVByVi85TT0=. Acesso em: 10 jun. 2026.

CROSBY, Philip B. Quality is free: the art of making quality certain. New York: McGraw-Hill, 1979. 309 p. Disponível em: https://archive.org/details/qualityisfree00cros. Acesso em: 10 jun. 2026.

DAVENPORT, Thomas H. Putting the enterprise into the enterprise system. Harvard Business Review, Boston, v. 76, n. 4, p. 121-131, 1998. Disponível em: https://hbr.org/1998/07/putting-the-enterprise-into-the-enterprise-system. Acesso em: 14 jun. 2026.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN SPEC 91345:2016-04: reference architecture model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Berlin: DIN, 2016. 40 p. Disponível em: https://doi.org/10.31030/2436156. Acesso em: 18 jun. 2026.

EUROPEAN COMMISSION. Directorate-General for Research and Innovation. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. Disponível em: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/industry-50-towards-sustainable-human-centric-and-resilient-european-industry_en. Acesso em: 18 jun. 2026.

FEIGENBAUM, Armand Vallin. Total quality control. 3. ed. rev. New York: McGraw-Hill, 1991. 863 p. Disponível em: https://archive.org/details/totalqualitycont0000feig. Acesso em: 18 jun. 2026.

HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 49., 2016, Koloa. Proceedings [...]. Koloa: IEEE, 2016. p. 3928-3937. DOI: 10.1109/HICSS.2016.488. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7427673. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. IATF 16949:2016: quality management system requirements for automotive production and relevant service parts organizations. Southfield: International Automotive Task Force, 2016. Disponível em: https://www.aiag.org/expertise-areas/quality/iatf-16949-2016. Acesso em: 13 ago. 2026.

ISHIKAWA, Kaoru. Guide to quality control. 2. ed. rev. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986. 226 p. Disponível em: https://archive.org/details/guidetoqualityco00ishi. Acesso em: 13 ago. 2026.

JURAN, Joseph M.; GRYNA, Frank M. Quality planning and analysis: from product development through use. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1993. 634 p. A existência da 3.ª edição, publicada pela McGraw-Hill em 1993, é confirmada em catálogos bibliográficos e no Google Books.

KLETTI, Jürgen (ed.). Manufacturing execution system: MES. Berlin: Springer, 2007. 272 p. DOI: 10.1007/978-3-540-49744-8. Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-49744-8. Acesso em: 13 ago. 2026.

OKES, Duke. Root cause analysis: the core of problem solving and corrective action. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2009. 182 p. A obra foi publicada pela ASQ Quality Press em 2009 e possui ISBN 978-0-87389-764-8.

TAO, Fei; ZHANG, Meng; LIU, Yilun; NEE, A. Y. C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. CIRP Annals, v. 68, n. 1, p. 169-172, 2019. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000785061830079. Acesso em: 19 ago. 2026.

ZHANG, Chao; WANG, Zenghui; ZHOU, Guanghui; CHANG, Fengtian; MA, Dongxu; JING, Yanzhen; CHENG, Wei; DING, Kai; ZHAO, Dan. Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: a systematic review. Advanced Engineering Informatics, v. 57, art. 102121, 2023. DOI: 10.1016/j.aei.2023.102121. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034623002495. Acesso em: 19 ago. 2026.

---

[1] Discente do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus – Am. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Docente do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus - Am. Doutora em Química (PPGQ/UFAM). E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail