

Indústria 4.0 e gestão da qualidade no polo industrial de Manaus: fatores críticos para a eficiência operacional e a transformação digital.

Industry 4.0 and quality management in the Manaus industrial pole: critical
factors for operational efficiency and digital transformation.

Arthur Niedzulka Fonseca¹

Julio Cesar Soares da Silva²

Klisman Rocha Borges³

Orientadora: Profa. M.Sc. Lady Mariana Siqueira Pinheiro

RESUMO

Em um polo industrial marcado pela distância dos principais centros fornecedores e consumidores, pela diversidade dos processos e pela necessidade permanente de confiabilidade, a transformação digital precisa gerar resultados concretos e compreensíveis para quem planeja, opera e controla a produção. Partindo dessa realidade, o estudo analisa como as tecnologias da Indústria 4.0 podem fortalecer a eficiência operacional e a gestão da qualidade no Polo Industrial de Manaus, sem reduzir a inovação à simples aquisição de equipamentos. Adotou-se uma pesquisa aplicada, exploratória e descritiva, de abordagem qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e análise documental de artigos científicos, livros, normas técnicas e dados oficiais. Os resultados indicam que a Internet Industrial das Coisas, a inteligência artificial, a visão computacional e a integração entre sistemas podem ampliar a rastreabilidade, a prevenção de falhas e a capacidade de decisão, desde que apoiadas por dados confiáveis, cibersegurança, liderança e qualificação profissional. Como contribuição, apresenta-se a Matriz 4D-PIM, que articula as dimensões Digitais, Desempenho, Desenvolvimento Humano e Direcionamento Institucional. Conclui-se que a transformação digital no PIM deve ser gradual, participativa e orientada por problemas reais, para que tecnologia, pessoas e estratégia avancem de forma integrada.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Qualidade 4.0; Polo Industrial de Manaus; Transformação digital; Eficiência operacional.

ABSTRACT

In an industrial hub characterized by its distance from major supply and consumer centers, the diversity of its processes, and a constant need for reliability, digital transformation must yield

concrete, understandable results for those who plan, operate, and control production. Against this backdrop, the study analyzes how Industry 4.0 technologies can enhance operational efficiency and quality management within the Manaus Industrial Hub (PIM), without reducing innovation to the mere acquisition of equipment. An applied, exploratory, and descriptive research design with a qualitative approach was adopted, utilizing a literature review and document analysis of scientific articles, books, technical standards, and official data. The results indicate that the Industrial Internet of Things, artificial intelligence, computer vision, and system integration can improve traceability, failure prevention, and decision-making capabilities—provided they are supported by reliable data, cybersecurity, leadership, and workforce training. As a contribution, the study presents the 4D-PIM Matrix, which integrates the dimensions of Digital, Performance, Human Development, and Institutional Direction. It concludes that digital transformation within the PIM must be gradual, participatory, and driven by real-world problems to ensure that technology, people, and strategy advance in an integrated manner.

Keywords: Industry 4.0; Quality 4.0; Manaus Industrial Pole; Digital transformation; Operational efficiency.

1 INTRODUÇÃO

Nas fábricas atuais, qualidade e produtividade são construídas a cada decisão tomada no processo. Uma parada inesperada, um dado registrado incorretamente ou uma falha identificada tarde demais podem afetar custos, prazos e a confiança do cliente. É nesse cotidiano, e não apenas no discurso tecnológico, que a Indústria 4.0 ganha sentido: ao aproximar máquinas, sistemas, informações e pessoas para compreender melhor o que ocorre na produção e agir com mais rapidez e segurança. (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; LASI et al., 2014).

O conceito ganhou projeção a partir da estratégia alemã de modernização industrial apresentada por Kagermann, Wahlster e Helbig (2013). Lasi et al. (2014) destacam que a Indústria 4.0 combina sistemas ciberfísicos, comunicação em rede e inteligência descentralizada, alterando a organização da manufatura. Estudos recentes ampliam o debate ao incluir prontidão organizacional, sustentabilidade, competências profissionais, governança de dados e segurança cibernética, reconhecendo que a digitalização envolve mudanças tecnológicas, gerenciais e humanas (ISLAM; HOSSAIN; ORNOB, 2024).

Na gestão da qualidade, a transformação digital favoreceu o desenvolvimento da Qualidade 4.0, abordagem que conecta princípios tradicionais como foco no cliente, controle estatístico, gestão de riscos, análise de causa e melhoria contínua, tecnologias como Internet Industrial, inteligência artificial, visão computacional, computação, armazenamento em nuvem e análise avançada de dados. Em vez de substituir os fundamentos consolidados da

qualidade, essa integração amplia a capacidade de prevenir desvios e aprender com o processo (DIAS; CARVALHO; SAMPAIO, 2022; ANTONY; MCDERMOTT; SONY, 2022).

O Polo Industrial de Manaus (PIM) constitui um ambiente relevante para essa discussão por reunir cadeias produtivas intensivas em tecnologia, entre elas as de eletroeletrônicos, bens de informática, duas rodas, termoplásticos, metalurgia, química e componentes. O Decreto-Lei nº 288, de 28 de fevereiro de 1967, reorganizou a Zona Franca de Manaus como instrumento de desenvolvimento regional (BRASIL, 1967). Em 2025, o PIM alcançou faturamento nominal de R\$ 227,67 bilhões e média mensal de 131.401 trabalhadores efetivos, temporários e terceirizados, evidenciando sua importância econômica e social (SUFRAMA, 2026a; 2026b).

A relevância do PIM também decorre de suas particularidades. A distância dos principais centros fornecedores e consumidores aumenta a importância da confiabilidade dos processos, da previsibilidade de manutenção, da integração logística e da rastreabilidade. Ao mesmo tempo, a heterogeneidade de setores, equipamentos e níveis de maturidade digital torna inadequada a adoção de soluções únicas. Uma empresa com máquinas conectadas, mas sem dados confiáveis, competências adequadas ou governança de cibersegurança, pode digitalizar ineficiências e ampliar a exposição a riscos. (RAJ et al., 2020; ISLAM; HOSSAIN; ORNOB, 2024).

No cenário nacional, a Nova Indústria Brasil estabeleceu a transformação digital como prioridade estratégica. A missão 4 fixou a meta intermediária de transformar digitalmente 25% das empresas industriais brasileiras até 2026 e a meta de alcançar 50% até 2033, reforçando que produtividade, inovação e soberania tecnológica dependem da difusão de capacidades digitais (BRASIL, 2026). Essa política cria oportunidades para o PIM, mas também exige critérios de priorização, avaliação de maturidade e integração entre empresas, instituições de ensino, centros de pesquisa e agentes públicos.

Diante desse contexto, formula-se o seguinte problema de pesquisa: como as tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir para a eficiência operacional e a gestão da qualidade no Polo Industrial de Manaus, e quais fatores críticos condicionam sua adoção de forma integrada, segura e sustentável? A questão evita uma visão tecnocêntrica e considera que resultados dependem da articulação entre infraestrutura digital, processos, pessoas, indicadores e governança. (ANTONY et al., 2023; NIST, 2024).

A importância acadêmica deste estudo está em aproximar um debate amplamente desenvolvido no cenário internacional das condições concretas da indústria amazônica. Embora as pesquisas sobre Indústria 4.0 e Qualidade 4.0 tenham avançado, ainda são

frequentes os modelos pouco testados em ambientes produtivos reais e as análises que tratam a tecnologia sem considerar cultura, pessoas e limitações regionais. No plano profissional, compreender esses fatores pode ajudar as empresas a escolher projetos mais coerentes, reduzir investimentos desconectados das necessidades do processo e criar condições para que os trabalhadores participem da transformação. Socialmente, o tema se relaciona à qualificação, à permanência de empregos de maior complexidade e ao fortalecimento das capacidades tecnológicas da região. (SANTOS et al., 2021; BRASIL, 2026).

O objetivo geral é analisar as contribuições das tecnologias da Indústria 4.0 para a eficiência operacional e a gestão da qualidade no Polo Industrial de Manaus, identificando benefícios, barreiras e fatores críticos para sua implementação. Como objetivos específicos, pretende-se: a) apresentar os fundamentos e as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0; b) relacionar transformação digital e Qualidade 4.0; c) examinar particularidades do PIM que influenciam a adoção tecnológica; d) discutir requisitos de integração, cibersegurança, competências e governança; e) propor uma matriz de implantação gradual e indicadores de acompanhamento.

Como resposta prática a esse desafio, o artigo apresenta a Matriz 4D-PIM. A proposta reúne quatro dimensões que precisam caminhar juntas: Digital, Desempenho, Desenvolvimento Humano e Direcionamento Institucional. Em vez de perguntar apenas quais tecnologias a empresa possui, a matriz procura verificar se elas resolvem problemas reais, geram resultados mensuráveis, são compreendidas pelas pessoas e estão apoiadas por governança, segurança e cooperação. Essa leitura integrada busca tornar a transformação digital mais responsável e útil ao contexto do PIM.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Evolução industrial e fundamentos da Indústria 4.0

A evolução industrial pode ser compreendida como uma sucessão de mudanças nas bases energética, tecnológica e organizacional da produção. A Primeira Revolução Industrial consolidou a mecanização apoiada na energia a vapor; a Segunda difundiu a eletricidade, a padronização e a produção em massa; a Terceira incorporou a eletrônica, a automação e os sistemas computacionais. A Quarta Revolução Industrial diferencia-se pela conexão contínua entre o mundo físico e o digital, de modo que máquinas, produtos e sistemas participem de redes capazes de coletar, processar e utilizar dados. (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013; LASI et al., 2014).

Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) descrevem a Indústria 4.0 como uma estratégia de integração inteligente da produção, sustentada por sistemas ciberfísicos e comunicação em rede. Lasi et al. (2014) ressalta a interoperabilidade, virtualização, descentralização e capacidade de operar em tempo real. Em conjunto, esses elementos permitem que dados do processo apoiem decisões mais rápidas, coordenadas e adaptáveis.

A literatura mais recente demonstra que a Indústria 4.0 não deve ser reduzida à automação. Islam, Hossain e Ornob (2024), ao analisarem pesquisas empresariais sobre o tema, identificam conexões com inovação, cadeias de suprimentos, sustentabilidade, capital humano, maturidade e modelos de negócio. Isso significa que o investimento tecnológico precisa estar alinhado à estratégia e à criação de valor. Uma fábrica pode automatizar uma tarefa sem transformar sua lógica de decisão; a transformação ocorre quando dados confiáveis orientam processos, aprendizagem e relacionamento com clientes e fornecedores.

Na manufatura conectada, sensores, comunicação e análise de dados ampliam a capacidade de acompanhar a condição dos ativos, prever falhas e otimizar o desempenho. Entretanto, o volume de informações não garante conhecimento. A utilidade depende de contexto, qualidade da medição, integração entre sistemas e capacidade das pessoas para interpretar os sinais (ZHENG et al., 2021).

2.2 Tecnologias habilitadoras e arquitetura digital da manufatura

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 formam um sistema interdependente. Sensores e dispositivos da Internet Industrial das Coisas capturam condições do processo e dos equipamentos; redes industriais transportam os dados; plataformas de borda e de nuvem realizam armazenamento e processamento; sistemas MES, ERP e QMS contextualizam ordens, lotes, recursos e resultados; modelos analíticos identificam padrões; e interfaces de visualização apresentam informações para apoiar a decisão (ZHENG et al., 2021; CHRISTOU et al., 2022).

Os sistemas ciberfísicos conectam componentes físicos, software e comunicação. Essa integração permite relacionar alterações observadas no processo a ordens de produção, atividades de manutenção, inspeções e resultados da qualidade. Christou et al. (2022) demonstram que plataformas industriais de ponta a ponta podem apoiar aplicações de Qualidade 4.0 ao integrar coleta de dados, processamento, visualização e serviços analíticos. A principal dificuldade não é apenas conectar equipamentos, mas preservar o significado dos dados, a sincronização temporal, a rastreabilidade e a confiabilidade.

A Internet Industrial das Coisas (IIoT) possibilita o monitoramento contínuo de temperatura, pressão, vibração, corrente, velocidade, umidade e outras variáveis. A inteligência artificial pode apoiar a previsão de falhas, a classificação de defeitos, a otimização de parâmetros e o reconhecimento de anomalias. A visão computacional amplia a inspeção de características visuais e dimensionais. Gêmeos digitais permitem representar ativos ou processos para simular comportamentos e testar cenários. Entretanto, essas aplicações exigem um sistema de medição adequado, dados representativos e validação por especialistas. (ZHENG et al., 2021; CHRISTOU et al., 2022).

A integração entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (TO) é um requisito central. A TI concentra sistemas corporativos, planejamento, dados comerciais e governança; a TO controla equipamentos, redes industriais e operações em tempo real. Quando essas camadas não se integram, surgem registros duplicados, atrasos, inconsistências e perda de rastreabilidade. Uma arquitetura adequada deve definir a identificação dos ativos, os padrões de comunicação, os modelos de dados, as responsabilidades e as regras de acesso. (NIST, 2023; CHRISTOU et al., 2022).

Quadro 1 - Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 e contribuições para a qualidade

Tecnologia	Aplicação industrial	Contribuição para qualidade	Riscos e condições críticas
Internet Industrial das Coisas (IIoT) e sensores	Coleta contínua de variáveis de processo e condição dos ativos.	Detecção antecipada de tendências, rastreabilidade e manutenção baseada em condição.	Calibração, confiabilidade, conectividade e excesso de alarmes.
Integração MES, ERP e QMS	Integração de ordens, materiais, recursos, inspeções e liberação.	Rastreabilidade ponta a ponta e redução de registros manuais.	Sistemas legados, cadastros inconsistentes e baixa interoperabilidade.
Inteligência artificial	Previsão de falhas, qualidade preditiva e apoio à otimização.	Antecipação de não conformidades e priorização de causas.	Modelos opacos, dados enviesados e ausência de validação humana.
Visão computacional	Inspeção automática de presença, aparência e dimensões.	Maior frequência de inspeção e padronização de critérios.	Iluminação inadequada, base de imagens pouco representativa e falsos positivos ou negativos.
Computação em borda e nuvem	Processamento próximo ao equipamento e consolidação de dados.	Resposta rápida, escalabilidade e análise histórica.	Latência, indisponibilidade, custos e segurança.
Gêmeo digital	Representação virtual para simulação e teste de cenários.	Aprendizagem sem interferência imediata no processo real.	Modelo desatualizado, hipóteses inadequadas e elevado esforço de manutenção.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), Zheng et al. (2021), Christou et al. (2022) e NIST (2024).

2.3 Qualidade 4.0 e controle inteligente dos processos

A qualidade industrial não nasce no momento da inspeção final. Ela é construída desde a escolha dos materiais, passa pela estabilidade dos equipamentos e pela execução dos padrões e chega ao cliente por meio de um produto confiável. A ABNT NBR ISO 9001:2015 reforça essa visão ao adotar a abordagem por processos e o pensamento baseado em risco, exigindo a compreensão das interações, das responsabilidades, dos critérios e das formas de monitoramento.

Dias, Carvalho e Sampaio (2022) relacionam Qualidade 4.0 à integração entre gestão da qualidade e tecnologias digitais. Antony, McDermott e Sony (2022) mostram que o conceito envolve estratégia, liderança, competências, cultura e foco no cliente, além das ferramentas tecnológicas. Revisões mais recentes reforçam que a maturidade depende do uso efetivo dos dados para melhorar processos, e não apenas da quantidade de tecnologias instaladas (OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

O Controle Estatístico de Processo (CEP) permanece fundamental. Montgomery (2019) diferencia causas comuns, inerentes ao sistema, de causas especiais, relacionadas a eventos identificáveis. Cartas de controle, análise de capacidade e estudos do sistema de medição ajudam a compreender a variabilidade. Na Qualidade 4.0, dados mais frequentes e modelos analíticos podem detectar padrões complexos; contudo, algoritmos construídos sobre processo instável ou medição inadequada tendem a transformar ruído em recomendação.

Ferramentas tradicionais de prevenção, como o FMEA, também podem ser fortalecidas pela integração de dados de processo, manutenção e reclamações. O recurso digital facilita a atualização das análises, mas não substitui a avaliação técnica das causas, dos efeitos e das ações. Da mesma forma, visão computacional e inteligência artificial precisam ser avaliadas segundo capacidade de detecção, ocorrência de falsos alarmes, impacto operacional e possibilidade de validação humana. (ANTONY; MCDERMOTT; SONY, 2022; ZHENG et al., 2021).

A literatura recente ainda aponta lacunas de validação empírica, aplicações setoriais e incorporação dos fatores humanos na Qualidade 4.0. Por isso, a prontidão organizacional, a governança e a participação das equipes devem ser consideradas desde o planejamento dos projetos (ANTONY et al., 2023; OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

Quadro 2 - Evolução da gestão da qualidade no ambiente digital

Dimensão	Gestão da qualidade convencional	Qualidade 4.0	Critério de naturalidade
Dados	Amostragem e registros locais.	Dados integrados, frequentes e contextualizados.	Confiabilidade, rastreabilidade e governança.

Controle	Inspeção e reação após o desvio.	Monitoramento preditivo e alertas de tendência.	Capacidade de antecipar e validar decisões.
Ferramentas	CEP, FMEA, PDCA, auditorias e análise de causa.	Integração das ferramentas clássicas com analytics, IA e visão.	Tecnologia conectada ao método de qualidade.
Pessoas	Execução de procedimentos e tratamento de ocorrências.	Interpretação, validação, aprendizagem e melhoria colaborativa.	Competência, autonomia responsável e segurança psicológica.
Resultado	Conformidade do produto e correção.	Prevenção, experiência do cliente e aprendizagem em rede.	Melhoria mensurável e sustentada.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Dias, Carvalho e Sampaio (2022), Antony, McDermott e Sony (2022) e Oliveira, Pinho e Brendon (2026).

2.4 Prontidão organizacional, competências e cultura

Nenhuma transformação digital se sustenta apenas com equipamentos modernos. Para que uma solução seja incorporada à rotina, a organização precisa compreender seu propósito, preparar as pessoas e garantir os recursos necessários para mantê-la ao longo do tempo. Antony et al. (2023) identificam liderança, estratégia, infraestrutura, cultura, competências, recursos e orientação ao cliente como fatores de prontidão. Quando esses elementos não estão alinhados, surgem iniciativas isoladas, sistemas incompatíveis e projetos que perdem força após o entusiasmo inicial.

A transformação digital altera atividades e competências. Tarefas repetitivas tendem a ser automatizadas, enquanto cresce a demanda por análise de dados, resolução de problemas, comunicação interdisciplinar e interpretação de sistemas. Santos et al. (2021) destacam que gestores da qualidade precisam combinar competências técnicas, digitais e relacionais. Isso exige formação contínua e participação dos trabalhadores no desenho das soluções.

A cultura organizacional influencia a disposição para registrar falhas, testar hipóteses e questionar recomendações. Os sistemas digitais podem ampliar a transparência, mas também gerar resistência quando são percebidos como instrumentos de vigilância ou punição. Para evitar esse efeito, a governança deve esclarecer a finalidade, as responsabilidades e os critérios de uso. O trabalhador precisa participar da definição dos alertas e da validação das ações, pois conhece restrições, sinais e interações que nem sempre aparecem nos bancos de dados. (ANTONY et al., 2023; SANTOS et al., 2021).

A gestão da mudança deve considerar comunicação, treinamento, apoio da liderança e demonstração de resultados. Projetos-piloto bem delimitados favorecem aprendizagem e confiança. Em vez de iniciar pela tecnologia disponível, a organização deve começar por um problema relevante, estabelecer linha de base, definir indicadores e selecionar uma solução proporcional à capacidade de manutenção. (ANTONY et al., 2023; RAJ et al., 2020).

2.5 Cibersegurança, governança e qualidade dos dados

A conexão de ativos industriais amplia a superfície de ataque e a exposição a incidentes. Paradas, alterações indevidas de parâmetros, indisponibilidade de redes e perda de dados podem afetar a segurança, a qualidade e a continuidade operacional. Alqudhaibi et al. (2025) ressalta a importância da conscientização, do treinamento e da definição de responsabilidades em ambientes de manufatura.

O NIST Cybersecurity Framework 2.0 organiza a gestão dos riscos em seis funções: Governar, Identificar, Proteger, Detectar, Responder e Recuperar. A inclusão da função Governar reforça que a segurança precisa estar integrada à estratégia, aos papéis organizacionais e à cadeia de suprimentos (NIST, 2024).

A segurança deve ser incorporada desde o desenho da solução. Isso envolve inventário de ativos, segmentação de redes, gestão de identidades, cópias de segurança, atualização controlada, monitoramento, resposta a incidentes e critérios para fornecedores. Em ambientes legados, a proteção precisa respeitar requisitos de disponibilidade e segurança operacional, evitando mudanças que provoquem indisponibilidade não planejada. (NIST, 2023; NIST, 2024).

A governança de dados complementa a cibersegurança. Os dados precisam ter responsável, definição, unidade, frequência, origem e critérios de validação. Cadastros divergentes entre MES, ERP, QMS e planilhas comprometem as análises. A qualidade dos dados inclui completude, consistência, atualidade, precisão e rastreabilidade. Sem esses atributos, os modelos analíticos podem gerar recomendações tecnicamente sofisticadas, porém operacionalmente incorretas. (ISO, 2008; CHRISTOU et al., 2022).

2.6 Polo Industrial de Manaus: características e desafios da transformação digital

Falar em transformação digital no Polo Industrial de Manaus exige considerar a história e as particularidades do território. A Zona Franca de Manaus foi reorganizada como política de desenvolvimento regional pelo Decreto-Lei nº 288/1967, e o PIM consolidou cadeias produtivas diversificadas e intensivas em tecnologia. Sua localização, distante dos principais mercados e fornecedores, faz com que planejamento, confiabilidade, estoque, manutenção e logística tenham peso ainda maior nas decisões industriais. (SUFRAMA, 2026a; 2026b).

Entre 2020 e 2025, o faturamento nominal e a média mensal de mão de obra do PIM apresentaram crescimento expressivo, conforme a Tabela 1. Esses dados dimensionam a

relevância das decisões relacionadas à produtividade, à qualidade e à tecnologia, sem estabelecer, por si só, relação causal com a transformação digital (SUFRAMA, 2026a; 2026b).

A composição setorial exige soluções diferenciadas. Processos de montagem eletrônica demandam rastreabilidade de componentes e inspeção visual; o segmento de duas rodas combina produção seriada, manutenção e controle dimensional; termoplásticos e químicos dependem de variáveis contínuas, laboratório e controle de lotes; atividades metalúrgicas e mecânicas podem utilizar monitoramento de condição e análise de capacidade. Uma matriz comum deve preservar flexibilidade para essas particularidades. (SUFRAMA, 2026a; ZHENG et al., 2021).

O ambiente institucional também influencia a transformação. A política industrial brasileira passou a estabelecer metas explícitas de digitalização, criando espaço para programas de produtividade, financiamento, pesquisa e qualificação (BRASIL, 2026). No PIM, a articulação entre empresas, SUFRAMA, universidades, institutos de pesquisa, SENAI, integradores e fornecedores pode reduzir os custos de aprendizagem e difundir padrões. Contudo, os incentivos precisam estar vinculados a resultados mensuráveis e à capacidade local de manter as soluções.

Tabela 1 - Faturamento e mão de obra média mensal do Polo Industrial de Manaus (2020–2025)

Ano	Faturamento nominal (R\$ bilhões)	Média mensal de mão de obra (trabalhadores)
2020	119,99	94.756
2021	159,78	105.973
2022	178,03	111.300
2023	175,69	113.825
2024	205,07	124.056
2025	227,67	131.401

Fonte: elaborado pelos autores com base em SUFRAMA (2026a; 2026b).

3 METODOLOGIA

Trata-se de pesquisa, exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e análise documental. Conforme Gil (2022), a pesquisa aplicada é orientada à solução de problemas concretos; a exploratória amplia a familiaridade com o problema e favorece a formulação de interpretações; a descritiva busca caracterizar fenômenos, contextos e relações; e a abordagem qualitativa privilegia a compreensão dos significados e das condições em que os fatos ocorrem. A revisão bibliográfica utiliza conhecimentos já publicados, enquanto a pesquisa documental examina

fontes normativas, institucionais e registros ainda passíveis de tratamento analítico. Essa combinação permitiu reunir fundamentos da Indústria 4.0, da Qualidade 4.0 e do contexto institucional do Polo Industrial de Manaus, articulando-os à construção de uma proposta voltada à realidade industrial.

Foram examinados artigos científicos, livros, normas técnicas, legislação e indicadores oficiais relacionados à manufatura digital, à gestão da qualidade, às competências profissionais, à cibersegurança e ao PIM. As fontes foram selecionadas pela relevância para o problema de pesquisa e pela consistência acadêmica ou institucional.

O material foi organizado em quatro eixos: infraestrutura e integração digital; desempenho e qualidade; desenvolvimento humano; e direcionamento institucional. A síntese desses eixos orientou a construção da Matriz 4D-PIM, de suas perguntas diagnósticas, dos indicadores e do roteiro de implantação. Como não houve pesquisa de campo, os resultados possuem caráter analítico e propositivo e devem ser validados em aplicações futuras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Síntese crítica dos achados

A leitura conjunta das fontes revelou um ponto essencial: a tecnologia amplia aquilo que a organização já é capaz de fazer, mas não substitui fundamentos frágeis. Sensores, inteligência artificial, visão computacional e integração de sistemas podem ampliar a visibilidade e a velocidade do processo; porém, sem padronização, dados confiáveis, responsabilidades claras e equipes preparadas, a digitalização tende apenas a acelerar as falhas e a torná-las mais difíceis de compreender. (ZHENG et al., 2021; ANTONY et al., 2023).

As pesquisas sobre Qualidade 4.0 mostram que muitas organizações ainda encontram dificuldade para transformar projetos-piloto em práticas consolidadas. Entre as causas estão a ausência de linha de base, responsabilidade de manutenção, integração com o sistema de gestão e participação das equipes (ANTONY et al., 2023; OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

A prontidão organizacional aparece como uma condição transversal. Antony et al. (2023) demonstram que liderança, cultura, competências e recursos influenciam a adoção. Raj et al. (2020) identificam barreiras estratégicas, financeiras, tecnológicas e humanas. Em economias emergentes, esses fatores tendem a se combinar: restrições de investimento dificultam a modernização; sistemas legados elevam os custos; a falta de competências reduz a capacidade de seleção e manutenção; e a incerteza quanto ao retorno limita o escalonamento.

A cibersegurança também deve ser tratada como requisito de qualidade e continuidade. Em ambientes conectados, incidentes podem afetar parâmetros, disponibilidade, rastreabilidade e integridade do produto. O NIST CSF 2.0 reforça a governança e a comunicação dos riscos, enquanto Alqudhaibi et al. (2025) destacam a necessidade de conscientização e de responsabilidades claras. A segurança, portanto, deve ser considerada no projeto, nos contratos com fornecedores e na rotina operacional.

Outro achado é a necessidade de equilibrar padronização e flexibilidade. Uma organização precisa de arquitetura, critérios e indicadores comuns, mas as aplicações devem responder às características de cada processo. O monitoramento de vibração pode ser prioritário em máquinas rotativas; a visão computacional, em linhas de montagem; e o controle preditivo, em processos contínuos. A seleção deve partir da criticidade e do valor esperado, e não da tendência tecnológica. (ZHENG et al., 2021; RAJ et al., 2020).

Quadro 3 - Convergências da literatura e implicações para o Polo Industrial de Manaus

Achado recorrente	Evidência na literatura	Implicação para o PIM
Tecnologia sem estratégia gera baixo valor.	Projetos precisam estar ligados a objetivos, clientes e processos críticos.	Priorizar problemas mensuráveis e definir responsáveis antes da aquisição.
Dados são ativos de qualidade.	Modelos dependem de medição, contexto, sincronização e rastreabilidade.	Padronizar cadastros, unidades, lotes e integração entre TI e TO.
Pessoas são parte do sistema.	Competências, cultura e participação influenciam adoção e confiança.	Formar equipes multidisciplinares e incorporar conhecimento operacional.
Sistemas legados aumentam a complexidade.	Interoperabilidade e integração estão entre as principais barreiras.	Adotar arquitetura gradual, padrões e camadas de conexão seguras.
Cibersegurança afeta continuidade e qualidade.	Conectividade amplia riscos e exige governança.	Incluir segurança, fornecedores e resposta a incidentes desde o piloto.
Escalonamento exige evidências.	Muitos estudos e empresas permanecem em projetos isolados.	Estabelecer linha de base, metas, avaliação de retorno e aprendizagem.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Raj et al. (2020), Antony et al. (2023), Islam, Hossain e Ornob (2024), NIST (2024) e Oliveira, Pinho e Brendon (2026).

4.2 Oportunidades e restrições no contexto do PIM

No Polo Industrial de Manaus, a escala produtiva e a diversidade de segmentos abrem espaço para aplicações com impacto direto no cotidiano das fábricas. A rastreabilidade digital pode conectar materiais, componentes, parâmetros, inspeções e destinos; a manutenção preditiva pode reduzir a incerteza em ativos críticos; e a análise de dados pode apoiar decisões de produção e qualidade. O valor dessas soluções, contudo, depende de sua capacidade de responder a problemas reconhecidos por quem conhece o processo e convive diariamente com suas limitações. (ZHENG et al., 2021; SUFRAMA, 2026a).

A localização regional também reforça o valor da previsibilidade. A distância dos centros fornecedores exige planejamento de peças, materiais e transporte. A análise de dados pode apoiar previsão de consumo, manutenção e programação, mas deve considerar variabilidade logística e disponibilidade de infraestrutura. A digitalização não elimina os desafios geográficos; ela pode aumentar a capacidade de antecipá-los e coordenar respostas. (SUFRAMA, 2026b; SLACK; BRANDON-JONES; BURGESS, 2022).

Entre as restrições, destacam-se a heterogeneidade tecnológica, a dependência de fornecedores, os custos de integração, a conectividade insuficiente, a disponibilidade limitada de profissionais especializados e os sistemas legados. O desafio não é apenas financiar a aquisição, mas sustentar licenças, calibrações, modelos, redes, atualizações e treinamento. A avaliação econômica deve considerar o custo total de propriedade, o risco evitado, a disponibilidade e os ganhos de qualidade. (RAJ et al., 2020; ANTONY et al., 2023).

A evolução do faturamento e da mão de obra entre 2020 e 2025 dimensiona a importância econômica e social do PIM, mas não permite atribuir esse desempenho à digitalização. A avaliação de uma tecnologia exige comparação com uma linha de base e consideração de mudanças na demanda, no mix de produtos e nas condições operacionais. (MONTGOMERY, 2019).

A meta nacional de transformação digital cria ambiente favorável, porém o PIM precisa de critérios regionais. Soluções importadas podem não considerar conectividade, logística, qualificação e manutenção local. A cooperação entre empresas e instituições pode desenvolver laboratórios, capacitação, padrões de dados e fornecedores regionais, reduzindo dependência e ampliando a sustentabilidade do investimento. (BRASIL, 2026; SUFRAMA, 2026b).

4.3 Matriz 4D-PIM

A Matriz 4D-PIM foi concebida para ajudar empresas e equipes a enxergar a transformação digital como um percurso integrado, e não como uma coleção de tecnologias. A dimensão Digital observa infraestrutura, integração e qualidade dos dados. Desempenho verifica se o projeto produz benefícios concretos em qualidade, produtividade, confiabilidade e atendimento. Desenvolvimento Humano considera competências, participação e aprendizagem. Direcionamento Institucional reúne estratégia, governança, cibersegurança, investimentos e cooperação regional. (ABNT, 2015; ANTONY et al., 2023; NIST, 2024; OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

A matriz evita que uma dimensão avance isoladamente. Uma empresa pode apresentar alta conectividade e baixo desempenho se não escolher problemas relevantes. Pode obter resultados iniciais e perder sustentabilidade se não formar pessoas. Pode possuir equipes capacitadas e ficar exposta a riscos se não governar acessos e fornecedores. A maturidade resulta do equilíbrio entre as dimensões. (ANTONY et al., 2023; NIST, 2024; OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

Quadro 4 - Matriz 4D-PIM para transformação digital e gestão da qualidade

Dimensão	Objetivo	Perguntas diagnósticas	Indicadores sugeridos
Digital	Assegurar dados confiáveis, integração e tecnologias adequadas.	Os ativos críticos são identificados? Há integração TI-TO? Dados possuem contexto, dono e qualidade?	Percentual de ativos críticos monitorados; disponibilidade e completude dos dados; integrações automáticas; falhas de medição.
Desempenho	Vincular tecnologia a resultados operacionais e de qualidade.	Existe linha de base? O problema é crítico? O ganho é medido e validado?	OEE; FPY; refugo; Cpk; MTBF; MTTR; lead time; OTIF; custo da não qualidade.
Desenvolvimento Humano	Construir competências, participação e confiança.	As equipes participaram do desenho? Há treinamento e autonomia responsável? Alertas podem ser questionados?	Horas de capacitação; adesão; sugestões; tempo de resposta; uso efetivo do sistema.
Direcionamento Institucional	Garantir estratégia, governança, segurança e continuidade.	Há patrocinador, orçamento, regras de acesso, gestão de fornecedores e plano de escala?	Riscos tratados; incidentes; retorno; auditorias; fornecedores qualificados; projetos escalados.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em ABNT (2015), Antony et al. (2023), NIST (2024) e Oliveira, Pinho e Brendon (2026).

4.4 Roteiro de implantação gradual

A Matriz 4D-PIM pode ser aplicada por meio de um percurso simples, porém disciplinado. Primeiro, é necessário compreender o processo e reconhecer o nível de maturidade existente. Depois, escolhe-se um problema relevante, prepara-se a base de dados e a arquitetura de segurança, executa-se um projeto-piloto e, somente após a validação dos resultados, decide-se pelo escalonamento. Essa sequência evita que a pressa em modernizar transforme uma oportunidade de melhoria em mais uma fonte de complexidade. (ANTONY et al., 2023; NIST, 2024; OLIVEIRA; PINHO; BRENDON, 2026).

O diagnóstico deve mapear o fluxo, os clientes, as variáveis, os sistemas, as perdas, os riscos e as competências. A priorização deve considerar impacto, viabilidade, disponibilidade de dados, criticidade e tempo de retorno. Casos excessivamente amplos aumentam a complexidade. Um piloto apropriado deve ser pequeno o suficiente para ser controlado e relevante o suficiente para demonstrar valor. (RAJ et al., 2020; ANTONY et al., 2023).

A preparação inclui a análise do sistema de medição (MSA), a identificação dos ativos, a padronização dos dados, a integração, a segmentação das redes e a definição dos acessos. Durante o piloto, recomenda-se manter a validação humana e registrar as decisões. O resultado deve ser comparado à linha de base, considerando alterações no mix de produtos e nas condições externas. Apenas soluções tecnicamente confiáveis, economicamente justificadas e aceitas pelas equipes devem ser escaladas. (MONTGOMERY, 2019; NIST, 2023; ANTONY; MCDERMOTT; SONY, 2022).

O escalonamento exige documentação, suporte, treinamento e gestão de mudanças. A organização deve evitar replicar uma solução sem verificar diferenças entre linhas, produtos e equipamentos. A matriz deve ser revisada periodicamente porque a maturidade e riscos evoluem. (ANTONY et al., 2023; NIST, 2024).

Quadro 5 - Roteiro de implantação da Matriz 4D-PIM

Etapas	Atividades principais	Entregas	Critério para avançar
1. Diagnosticar	Mapear processo, perdas, ativos, dados, riscos, pessoas e sistemas.	Mapa do processo, linha de base e avaliação 4D.	Problema e condições atuais compreendidas.
2. Priorizar	Avaliar impacto, viabilidade, risco, custo e disponibilidade de dados.	Caso de uso, escopo, meta, equipe e patrocinador.	Benefício esperado relevante e escopo controlável.
3. Preparar	Validar medição, dados, arquitetura, acessos, contratos e treinamento.	Plano técnico, controles de segurança, responsabilidades e protocolo de teste.	Dados confiáveis e riscos controlados.
4. Pilotar e validar	Executar, acompanhar indicadores, registrar decisões e ouvir usuários.	Resultado comparado à linha de base e lições aprendidas.	Efeito demonstrado, solução estável e usuários confiantes.
5. Padronizar e escalar	Atualizar procedimentos, treinar, suportar, replicar e auditar.	Padrão, plano de expansão e revisão periódica.	Sustentabilidade técnica, humana e financeira.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Antony et al. (2023), NIST (2024) e Oliveira, Pinho e Brendon (2026).

4.5 Indicadores para avaliação dos projetos

A avaliação deve combinar indicadores operacionais, de qualidade e econômicos. O OEE reúne disponibilidade, desempenho e qualidade; o FPY acompanha a aprovação sem retrabalho; e a taxa de refugo, o custo da não qualidade e os índices Cp e Cpk ajudam a identificar perdas e estabilidade do processo. (ISO, 2014; MONTGOMERY, 2019).

Na manutenção, MTBF e MTTR mostram, respectivamente, a frequência das falhas e a capacidade de recuperação. Na logística, lead time e OTIF acompanham tempo e confiabilidade das entregas. Também podem ser utilizados indicadores de disponibilidade dos dados, ativos monitorados, capacitação, adesão e tempo de resposta. (ISO, 2014; SLACK; BRANDON-JONES; BURGESS, 2022).

Quadro 6 - Indicadores recomendados por dimensão da Matriz 4D-PIM

Dimensão	Indicadores	Finalidade	Cuidado de interpretação
Digital	Disponibilidade e completude dos dados	Verificar se os dados necessários estão acessíveis e íntegros.	Disponibilidade não significa precisão ou utilidade.
Desempenho	OEE, FPY, taxa de refugo, Cpk e custo da não qualidade	Medir produtividade, conformidade, estabilidade e perdas.	Comparar com linha de base e estratificar por produto/processo.
Confiabilidade	MTBF e MTTR	Avaliar frequência de falhas e capacidade de recuperação.	Mudanças de uso e manutenção alteram os resultados.
Cliente e fluxo	Lead time, OTIF e reclamações de clientes	Relacionar transformação a prazo, entrega e percepção do cliente.	Demanda e logística externa também influenciam.
Humano	Capacitação, adesão, sugestões e tempo de resposta	Avaliar aprendizagem, participação e uso efetivo.	Quantidade de treinamento não garante competência.
Governança	Riscos tratados, testes de recuperação e fornecedores avaliados	Acompanhar segurança e sustentabilidade do sistema.	Não reduzir a análise ao número bruto de incidentes.

Fonte: elaborado pelos autores, com base em ABNT (2015), Montgomery (2019), Antony et al. (2023) e NIST (2024).

4.6 Discussão das contribuições e limites da proposta

A maior contribuição da Matriz 4D-PIM está em reunir aspectos que muitas vezes são tratados em projetos separados. É comum encontrar iniciativas tecnicamente sofisticadas sem indicadores de valor, programas de qualidade desconectados das pessoas ou ações de capacitação que não dialogam com a estratégia. Ao colocar tecnologia, desempenho, desenvolvimento humano e direcionamento institucional no mesmo quadro de análise, a matriz favorece decisões mais equilibradas e transparentes. (ABNT, 2015; ANTONY et al., 2023; NIST, 2024).

A proposta é compatível com a abordagem por processos da ABNT NBR ISO 9001:2015 porque parte do problema, define critérios e promove avaliação e melhoria. Também se alinha ao NIST CSF ao incorporar governança e gestão de riscos. Seu diferencial está no recorte regional e na integração explícita entre desempenho e desenvolvimento humano. (ABNT, 2015; NIST, 2024).

Para o PIM, a matriz pode apoiar organizações com níveis distintos de maturidade. Empresas iniciantes podem concentrar-se em dados básicos, padronização e pilotos; organizações avançadas podem integrar modelos preditivos, gêmeos digitais e cadeias conectadas. O objetivo não é classificar empresas de forma punitiva, mas indicar prioridades e dependências. (ANTONY et al., 2023; ZHENG et al., 2021).

A proposta possui limitações, pois foi construída sem validação direta com empresas e trabalhadores do PIM. Além disso, os indicadores oficiais caracterizam a dimensão

econômica do polo, mas não medem sua maturidade digital. A aplicação da matriz deverá, portanto, adaptar critérios e linguagem às características de cada segmento.

Pesquisas futuras poderão aplicar a matriz em diferentes subsetores, comparar indicadores antes e depois dos projetos e incorporar a percepção de gestores, técnicos e operadores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou de que modo a Indústria 4.0 pode fortalecer a eficiência operacional e a gestão da qualidade no Polo Industrial de Manaus sem desconsiderar as condições humanas, tecnológicas e regionais da transformação. A revisão demonstrou que IIoT, inteligência artificial, integração entre MES, ERP e QMS, visão computacional, análise de dados e gêmeos digitais oferecem benefícios relevantes quando são aplicados a necessidades reais do processo. A aquisição isolada de equipamentos, entretanto, não garante melhoria, pois sistemas legados, custos de manutenção, qualidade dos dados, cibersegurança, carência de profissionais e resistência cultural podem limitar os resultados.

Os objetivos foram alcançados ao apresentar os fundamentos e as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, sua relação com a Qualidade 4.0, as particularidades do PIM e os fatores que favorecem ou dificultam a adoção. Como contribuição prática, foi desenvolvida a Matriz 4D-PIM, formada pelas dimensões Digitais, Desempenho, Desenvolvimento Humano e Direcionamento Institucional. A proposta orienta uma implantação gradual: conhecer a realidade, definir prioridades, preparar dados e segurança, executar projetos-piloto, avaliar indicadores, aprender e somente então ampliar a solução, valorizando também a experiência dos trabalhadores.

No contexto regional, uma transformação digital bem conduzida pode fortalecer a competitividade, a qualidade e a resiliência do PIM, especialmente quando empresas, governo, instituições de ensino, centros de pesquisa e trabalhadores atuam de forma cooperativa. A principal limitação do estudo é a ausência de pesquisa de campo em empresas específicas; por isso, recomenda-se aplicar a Matriz 4D-PIM em diferentes subsetores e comparar indicadores antes e depois dos projetos. A excelência digital não consiste em adotar a tecnologia mais recente, mas em construir processos confiáveis, decisões conscientes e ambientes de trabalho capazes de aprender continuamente.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9001: sistemas de gestão da qualidade – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALQUODHAIBI, Adel; ALBARRAK, Majed; JAGTAP, Sandeep; WILLIAMS, Nikki; SALONITIS, Konstantinos. Securing Industry 4.0: assessing cybersecurity challenges and proposing strategies for manufacturing management. *Cyber Security and Applications*, v. 3, art. 100067, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csa.2024.100067>. Acesso em: 06 jul. 2026.

ANTONY, Jiju; MCDERMOTT, Olivia; SONY, Michael. Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. *The TQM Journal*, v. 34, n. 5, p. 1169–1188, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/TQM-07-2021-0215>. Acesso em: 06 jul. 2026.

ANTONY, Jiju; SONY, Michael; MCDERMOTT, Olivia; JAYARAMAN, Raja; FLYNN, David. An exploration of organizational readiness factors for Quality 4.0: an intercontinental study and future research directions. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 40, n. 2, p. 582–606, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-10-2021-0357>. Acesso em: 06 jul. 2026.

BRASIL. Decreto-Lei nº 288, de 28 de fevereiro de 1967. Altera as disposições da Lei nº 3.173, de 6 de junho de 1957, e regula a Zona Franca de Manaus. Brasília, DF: Presidência da República, 1967. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/del0288.htm. Acesso em: 07 jul. 2026.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Inovação e transformação digital. Brasília, DF: MDIC, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/sdic/inovacao>. Acesso em: 07 jul. 2026.

CHRISTOU, Ioannis T.; KEFALAKIS, Nikos; SOLDATOS, John K.; DESPOTOPOULOU, Anna M. End-to-end industrial IoT platform for Quality 4.0 applications. *Computers in Industry*, v. 137, art. 103591, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103591>. Acesso em: 08 jul. 2026.

DIAS, Ana Margarida; CARVALHO, André M.; SAMPAIO, Paulo. Quality 4.0: literature review analysis, definition and impacts of the digital transformation process on quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 39, n. 6, p. 1312–1335, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2021-0247>. Acesso em: 12 jul. 2026.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 7. ed. Barueri: Atlas, 2022.

ISLAM, Md Nazrul; HOSSAIN, Md Mofazzal; ORNOB, Md Shafayet Shahed. Business research on Industry 4.0: a systematic review using topic modelling approach. *Future Business Journal*, v. 10, art. 111, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43093-024-00398-2>. Acesso em: 12 jul. 2026.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/IEC 25012:2008: software engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – data quality model. Geneva: ISO, 2008. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/35736.html>. Acesso em: 25 jul. 2026.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22400-2:2014: automation systems and integration – key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – part 2: definitions and descriptions. Geneva: ISO, 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/54497.html>. Acesso em: 25 jul. 2026.

KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: final report of the Industrie 4.0 Working Group. Frankfurt: acatech, 2013.

LASI, Heiner; FETTKE, Peter; KEMPER, Hans-Georg; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, v. 6, p. 239–242, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>. Acesso em: 15 jul. 2026.

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Guide to Operational Technology (OT) Security. NIST Special Publication 800-82 Rev. 3. Gaithersburg: NIST, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r3>. Acesso em: 24 jul. 2026.

NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0. Gaithersburg: NIST, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29>. Acesso em: 15 jul. 2026.

OLIVEIRA, Ana Claudia Andrade; PINHO, Alexandre Ferreira de; BRENDON, Matheus Francisco. Quality 4.0: a systematic literature review and future research agenda for the digital transformation of quality management. International Journal of Quality & Reliability Management, v. 43, n. 6, p. 1650–1673, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2025-0165>. Acesso em: 20 jul. 2026.

RAJ, Aparna; DWIVEDI, Gaurav; SHARMA, Ankit; JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Sousa; RAJAK, Suraj. Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: an inter-country comparative perspective. International Journal of Production Economics, v. 224, art. 107546, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>. Acesso em: 20 jul. 2026.

SANTOS, Gilberto; SÁ, José Carlos; FÉLIX, Maria José; BARRETO, Luis; CARVALHO, Fernando; DOIRO, Manuel; ZGODAVOVÁ, Kristína; STEFANOVIĆ, Miladin. New needed quality management skills for quality managers 4.0. Sustainability, v. 13, n. 11, art. 6149, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13116149>. Acesso em: 21 jul. 2026.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; BURGESS, Nicola. Operations management. 10. ed. Harlow: Pearson, 2022.

SUFRAMA – SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS. Indicadores de desempenho do Polo Industrial de Manaus: janeiro a dezembro de 2025. Manaus: SUFRAMA, 2026a. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/centrais-de-conteudo/indicadores/2025/IndicaDEZ25/view>. Acesso em: 21 jul. 2026.

SUFRAMA – SUPERINTENDÊNCIA DA ZONA FRANCA DE MANAUS. Relatório de Gestão Integrado 2025. Manaus: SUFRAMA, 2026b. Disponível em: <https://www.gov.br/suframa/pt-br/acesso-a-informacao/transparencia/2025/relatorio-de-gestao-integrado-rgi>. Acesso em: 21 jul. 2026.

ZHENG, Ting; ARDOLINO, Marco; BACCHETTI, Andrea; PERONA, Marco. The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, v. 59, n. 6, p. 1922–1954, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>. Acesso em: 21 jul. 2026.