

ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DA MATURIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO DAS EMPRESAS

BIBLIOGRAPHICAL STUDY OF THE MATURITY OF DIGITAL TRANSFORMATION IN THE MANAGEMENT OF COMPANIES' MAINTENANCE

JEFFERSON DE SOUZA PINTO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP

VITOR VINICIUS GRANCIERI

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à orgão de fomento:

-

ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DA MATURIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO DAS EMPRESAS

Objetivo do estudo

O objetivo do trabalho é analisar a literatura para a construção da fundamentação teórica com os conceitos de Transformação Digital e Gestão da Manutenção Complementarmente, será realizado uma análise de conteúdo sobre a temática, a fim de compreender a influência da Transformação

Relevância/originalidade

O estudo traz uma aplicação da análise de conteúdo da Transformação Digital aplicada na área de Gestão da Manutenção.

Metodologia/abordagem

O estudo desenvolve uma pesquisa bibliográfica e utiliza a análise de conteúdo baseada no Elo e Kyngäs (2008) e Bardin (2016), para obter os temas relacionados a temática da pesquisa.

Principais resultados

Houve a identificação de 41 unidades de análise que, através de categorização e classificação, obteve-se 11 temas para o estudo. Após realizar uma análise juntamente com a teoria de base, resultaram em 9 temas para a Transformação Digital na gestão da manutenção.

Contribuições teóricas/metodológicas

O trabalho, com a utilização da análise de conteúdo, traz uma visão contemporânea de como o processo da Transformação Digital pode ser aplicado na Gestão da Manutenção.

Contribuições sociais/para a gestão

O estudo traz um novo olhar para os gestores da área de manutenção, a fim de melhorar o processo de aplicação de novas tecnologias para a área supracitada.

Palavras-chave: Tecnologia, Gestão da Tecnologia, Transformação Digital, Digitalização, Manutenção

BIBLIOGRAPHICAL STUDY OF THE MATURITY OF DIGITAL TRANSFORMATION IN THE MANAGEMENT OF COMPANIES' MAINTENANCE

Study purpose

The objective of this work is to analyze the literature to build the theoretical foundation with the concepts of Digital Transformation and Maintenance Management. Additionally, a content analysis will be carried out on the topic, in order to understand the influence of

Relevance / originality

The study presents an application of the content analysis of Digital Transformation applied in the area of Maintenance Management.

Methodology / approach

The study develops bibliographic research and uses content analysis based on Elo and Kyngäs (2008) and Bardin (2016), to obtain themes related to the research theme.

Main results

Forty-one units of analysis were identified, and through categorization and classification, 11 themes were obtained for the study. After conducting an analysis alongside the underlying theory, nine themes for Digital Transformation in maintenance management emerged.

Theoretical / methodological contributions

The work, using content analysis, brings a contemporary vision of how the Digital Transformation process can be applied to Maintenance Management.

Social / management contributions

The study provides a new perspective for maintenance managers, aiming to improve the process of applying new technologies to the aforementioned area.

Keywords: Technology, Technology Management, Digital Transformation, Digitalization, Maintenance

ESTUDO BIBLIOGRÁFICO DA MATURIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO DAS EMPRESAS

1 Introdução

A gestão da manutenção é cada vez mais relevante nas indústrias, dado seu papel essencial em restaurar e manter equipamentos em condições ideais de operação. Ferramentas clássicas, como a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), têm como objetivos centrais a eliminação de falhas, a maximização da confiabilidade e a otimização da performance dos ativos. Com o avanço tecnológico e a Transformação Digital, novas abordagens têm surgido, incorporando recursos como Inteligência Artificial, Big Data, Internet das Coisas (IoT), realidade aumentada e algoritmos avançados para manutenção preditiva e gestão autônoma de ativos. Essas tecnologias possibilitam monitoramento em tempo real, diagnóstico preciso e aumento da produtividade. Contudo, sua adoção ainda enfrenta desafios, como altos custos de implementação, falta de infraestrutura e incertezas quanto ao retorno econômico, especialmente em países em desenvolvimento.

Nesse sentido, levando em consideração os benefícios e desafios na implementação da Transformação Digital na gestão da manutenção, os quais serão explorados na seção referencial teórico, este trabalho possui como objetivo o reconhecimento de lacunas no processo de Transformação Digital nesta área específica da empresa, por meio de uma análise de conteúdo baseada em revisão bibliográfica.

O objetivo do trabalho é analisar a literatura para a construção da fundamentação teórica com os conceitos de Transformação Digital e Gestão da Manutenção. Complementarmente, será realizada uma análise de conteúdo sobre a temática, a fim de compreender a influência da Transformação Digital no cenário da Gestão da Manutenção das empresas.

2 Referencial Teórico

A gestão da manutenção se faz cada vez mais presente nas indústrias. Esta afirmação possui como primícia o dever que a manutenção possui de realizar todas as atividades necessárias para restaurar um equipamento, ou mantê-lo em uma condição de operação específica (Gelders e Pintelon, 1992). Nesse sentido, para cada mudança que o cenário mundial impõe as indústrias, há necessidade de implementação de um sistema que seja capaz de contribuir com a manutenção diante do novo panorama.

Para Seiichi Nakajima (1988), por exemplo, com o avanço da tecnologia nas indústrias, a necessidade por uma gestão no setor da manutenção fez-se necessária, haja vista que a qualidade da produção não dependia mais do processo, e sim dos equipamentos instalados. Nesse sentido, ainda segundo Nakajima (1988), com o advento da automação, fez-se necessário um sistema de manutenção de equipamentos que auxilie os supervisores de manutenção nas atividades, a chamada Total Productive Maintenance (TPM) ou Manutenção Produtiva Total.

Com o uso desta ferramenta, as empresas têm buscado o duplo objetivo da TPM: falha zero e zero defeitos nos equipamentos industriais, colaborando para a redução de custos e de inventário, aumento nas taxas de operação do equipamento e, como consequência, aumento na produtividade laboral (Nakajima, 1988).

Outra ferramenta para a manutenção é a Reliability-Centered Maintenance (RCM) ou Manutenção Centrada na Confiabilidade. Para Moubray (1997), as mudanças na manutenção ocorridas nas últimas décadas do século passado foram decorrentes de um grande aumento na quantidade e variedade de ativos físicos, tais como equipamentos, edifícios e instalações em todo o mundo, como também pelo surgimento de projetos mais complexos, mudanças de visões

sobre a organização, entre outros. Nesse sentido, Moubray (1997) também apresenta a definição formal para o RCM, que é um processo usado para determinar as solicitações de manutenção de qualquer ativo em seu contexto operacional. Complementarmente, este processo implica em sete indagações a respeito do ativo ou do sistema analisado, segundo Moubray (1997), que são:

- Quais são as funções e os padrões de performance associados ao ativo em seu contexto operacional atual?
- De que maneira o ativo falha em cumprir suas funções?
- O que causa cada falha funcional?
- O que acontece quando cada falha ocorre?
- Qual é o impacto de cada falha?
- O que pode ser feito para predizer ou prevenir cada falha?
- O que deve ser feito se não existir uma atividade proativa adequada?

Em seu livro, Moubray (1997) traz um aprofundamento para cada pergunta acima, as quais devem ser respondidas não somente pela equipe de manutenção, mas também pela equipe de produção, quando há preocupações a respeito das funções, da performance desejada, e das consequências de falha dos ativos e sistemas.

Todavia, o aprofundamento no conteúdo teórico da gestão da manutenção, bem como em seus diferentes sistemas e ferramentas, não é o objetivo deste trabalho. O propósito desta pesquisa se baseia na relação entre esta área de estudo com o fenômeno da Transformação Digital nas empresas.

Como anteriormente citado, as empresas estão procurando desenvolver seus sistemas de manufatura com foco na produtividade, movidas pela pressão do mercado global (Ashjaei e Bengtsson, 2017). De acordo ainda com Ashjaei e Bengtsson (2017), um dos setores cruciais dentro da manufatura é a gestão da manutenção, no qual se realizada adequadamente, proporciona uma maior confiabilidade dos ativos. Nesse sentido, a transformação digital (*Digital Transformation* em inglês) é um processo no qual as instituições realizam mudanças significativas em sua organização através da combinação de informação, computação, comunicação e tecnologias de conectividade (Vial 2019). A pandemia do COVID-19 causou um forte impacto nas organizações, as quais foram encorajadas a adotar tecnologias digitais em larga escala e sob pressão de tempo (Priyono, Moin e Putri, 2020). Com a digitalização dos processos, as empresas economizam tempo, dinheiro e espaço. Ademais, estes autores também dizem que usar tecnologia digital para melhorar os processos e o uso de dados é essencial para o crescimento econômico, afetando a cadeia de valor ou sistemas de mercado. Outrossim, de acordo com o Guia Mundial de Gastos em Transformação Digital de 2024, a previsão é de que os gastos mundiais em Transformação Digital cheguem a quase US\$ 4 trilhões em 2027, e com a IA generativa impulsionando os investimentos, o mercado TD deverá crescer com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 16,2% no período de 2022 a 2027 (IDC, 2024).

Ademais, Paranitharan et al. (2024) mostra que há uma tendência de uso de várias ferramentas no ramo industrial com o objetivo de melhorar a manutenção preditiva de máquinas, como redes neurais artificiais, algoritmo genético, sistema de lógica Fuzzy, Case 2 Based Reasoning e entre outros. Aplicações industriais em diferentes vertentes estão utilizando estas tecnologias para a implementação de uma manutenção inteligente (Paranitharan et al., 2024). Ademais, por exemplo, é notável citar tecnologias como análise de Big Data e Inteligência Artificial, as quais têm sido utilizadas, por exemplo, no sistema preditivo de manutenção de máquinas injetoras para coletar e analisar os dados por meio de um sistema hidráulico de bombeamento Tele Maintenance (Rivera et al., 2018). Outrossim, Birgelen et al. (2018) mostra a utilização de Mapeamento Auto Organizável, sistemas de produção ciberfísicos e outras ferramentas de análise com o objetivo de identificar condições anormais e localização

de componentes de máquina que estão em monitoramento em tempo real, resultando em processo de gestão autônomo. Ademais, Masoni et al. (2017) explica como a tecnologia da realidade aumentada é capaz de melhorar o gerenciamento da manutenção, proporcionando que a mão de obra não qualificada seja apta a organizar a manutenção remota através de imagens em 3D, vídeos e textos, bem como auxilia na criação de planos de manutenção eficientes por meio de um sistema de monitoramento prognóstico. Outrossim, Rubio, Torres e Dionísio (2019) também mostraram a aplicação de IoT, Machine Learning e LABVIEW para desenvolver e comparar a política de manutenção de motores elétricos com a análise de vibrações de componentes na indústria. Além disso, Bousdekis e Mentzas (2019) relatam a aplicação do modelo Markov para identificar funções logísticas e planos da indústria manufatureira e criaram a arquitetura de Manutenção Inteligente e funções logísticas em operações de máquinas de perfuração, com o auxílio de IoT.

Portanto, é possível concluir que a gestão da manutenção tem se utilizado de tecnologias atuais para suprir as demandas mercadológicas, bem como para manter a produtividade e competitividade das empresas. No entanto, há certas limitações na implementação da Transformação Digital (tecnologia da indústria 4.0) no setor manufatureiro. A pesquisa de Raj et al. (2020), que envolveu uma abordagem DEMATEL e teste de decisão Grey, mostra 15 limitações para a implementação destas tecnologias em países desenvolvidos e em desenvolvimento: alto investimento na implementação da Indústria 4.0; falta de clareza quanto ao benefício econômico; desafio na integração de cadeia de valor; risco de violações de segurança; o baixo nível de maturidade da tecnologia desejada; desigualdade social; disrupção de empregos existentes; falta de padrões, regulamentos e formas de certificação; falta de infraestrutura; falta de competências digitais; desafios para garantir a qualidade dos dados; falta de cultura digital interna e treinamento; resistência à mudança; gestão de mudanças ineficaz; e falta de uma estratégia digital juntamente com a escassez de recursos. Saihi *et al.* (2024) também apresenta algumas barreiras para a implementação da TD, as quais também foram abordadas por Raj *et al.* (2020), que são: resistência à mudança; preocupações quanto à privacidade e segurança de informações sensíveis; falta de padronização; e restrições financeiras.

Outrossim, a transição de sistemas legados para as tecnologias da indústria 4.0 também se caracteriza como outra barreira. Venâncio *et al.* (2022) apresenta que a medida que o mundo avança em direção à indústria 4.0, recorrentemente muitas adaptações envolvem sistemas legados. Os autores ainda afirmam que estes sistemas se conectam com outros processos e subsistemas, e continuam em constante atividade, devido a sua dificuldade de substituição e importância nas operações da organização. No entanto, de acordo com Moeuf *et al.* (2017), para as empresas se manterem competitivas, é necessário atualizar os seus processos, e os sistemas legados podem atrasar a modernização e influenciar as estratégias de negócio.

Portanto, a transformação digital é crucial para o desenvolvimento econômico das empresas, como também é fundamental para que as organizações se mantenham competitivas no mercado. No entanto, há obstáculos que devem ser considerados para introduzir estas ferramentas digitais nas instituições.

3 Metodologia

O trabalho foi estruturado tomando como base o processo de análise de conteúdo abordado por Elo e Kyngäs (2008) e Bardin (2016). Elo e Kyngäs (2008) pontuam que o uso de análise de conteúdo indutivo é recomendado quando não há estudos anteriores sobre o assunto, ou quando o conhecimento está fragmentado. Ademais, de acordo ainda com Elo e Kyngäs (2008), este estudo também se utiliza de uma análise de conteúdo qualitativa, pois os dados estudados são qualitativos no âmbito da gestão da manutenção e Transformação Digital.

Ademais, os autores Elo e Kyngäs (2008) abordam que o processo de análise de conteúdo indutivo requer as seguintes etapas: “open coding”, criação de categorias e abstração. Os autores explicam que a primeira etapa contempla a criação de notas e títulos enquanto a leitura é realizada. Posteriormente, ainda segundo os autores, a segunda etapa compreende a formação das categorias, com o intuito de aumentar a compreensão do fenômeno estudado. Nesta etapa (criação de categorias), o pesquisador deve tomar decisões sobre quais itens inserir em uma mesma categoria. Por conseguinte, conforme os autores, a última etapa é a abstração, em que ocorre todo o processo de criação de sub-categorias, categorias gerais e categorias principais com a finalidade de encontrar uma descrição geral do tópico de pesquisa.

Outrossim, a análise de conteúdo proposta por Bardin (2016) é dividida em três etapas principais: pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados. A pré-análise é a fase preparatória, em que o pesquisador realiza uma leitura flutuante do material a ser estudado para se familiarizar com ele, além de selecionar os documentos que serão analisados.

A segunda etapa proposta por Bardin (2016), a respeito da exploração do material, é quando o conteúdo bruto começa a ser sistematicamente organizado. O pesquisador define as unidades de registro (palavras, frases ou temas) e inicia a codificação. Em seguida, esses dados são agrupados em categorias temáticas para permitir uma estruturação dos dados de forma lógica.

Por fim, na etapa de tratamento dos resultados, Bardin (2016) explica que os dados organizados são analisados com o objetivo de identificar padrões e significados. O pesquisador realiza inferências com base nos resultados obtidos e os interpreta à luz das hipóteses e do referencial teórico adotado. Assim, é possível construir conclusões que atendam às questões de pesquisa, promovendo coerência para o estudo.

4 Análise dos Resultados e Discussões

A presente seção apresenta, de forma detalhada, os resultados obtidos a partir do processo de análise de conteúdo, fundamentado nas abordagens de Bardin (2016) e Elo e Kyngäs (2008). As etapas foram conduzidas de maneira sistemática, desde a seleção do material até a categorização e interpretação dos dados, com o objetivo de identificar tendências, oportunidades e desafios relativos à Transformação Digital aplicada à gestão da manutenção industrial.

Com base na literatura acima, a pesquisa apresentou o seguinte processo científico: conforme Bardin (2016), o processo de análise de conteúdo desta pesquisa compreendeu as etapas de pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados. Na etapa de preparação, foram selecionados 15 documentos para análise, utilizando a base de dados da Scopus. Foi utilizado os termos “Digital Transformation” e “Maintenance Management” para a pesquisa na Scopus. Além disso, também foi utilizado somente o termo “Maintenance Management” para coletar artigos que continham conteúdos relevantes sobre gestão da manutenção. Na etapa de exploração do material, obteve-se 41 unidades de análise que, por meio de categorização e classificação do conteúdo, resultou em 11 temas para o estudo. Na etapa de tratamento dos resultados, após realizar uma análise dos resultados e relacionar a teoria de base com os objetivos da pesquisa, obteve-se 9 temas para o estudo.

Nesse sentido, para fins de visualização do processo de análise de conteúdo realizado, foi construído um fluxograma (Figura 1) que possui as etapas de sub-categorias, categorias gerais e categorias principais, explicadas por Elo e Kyngäs (2008).

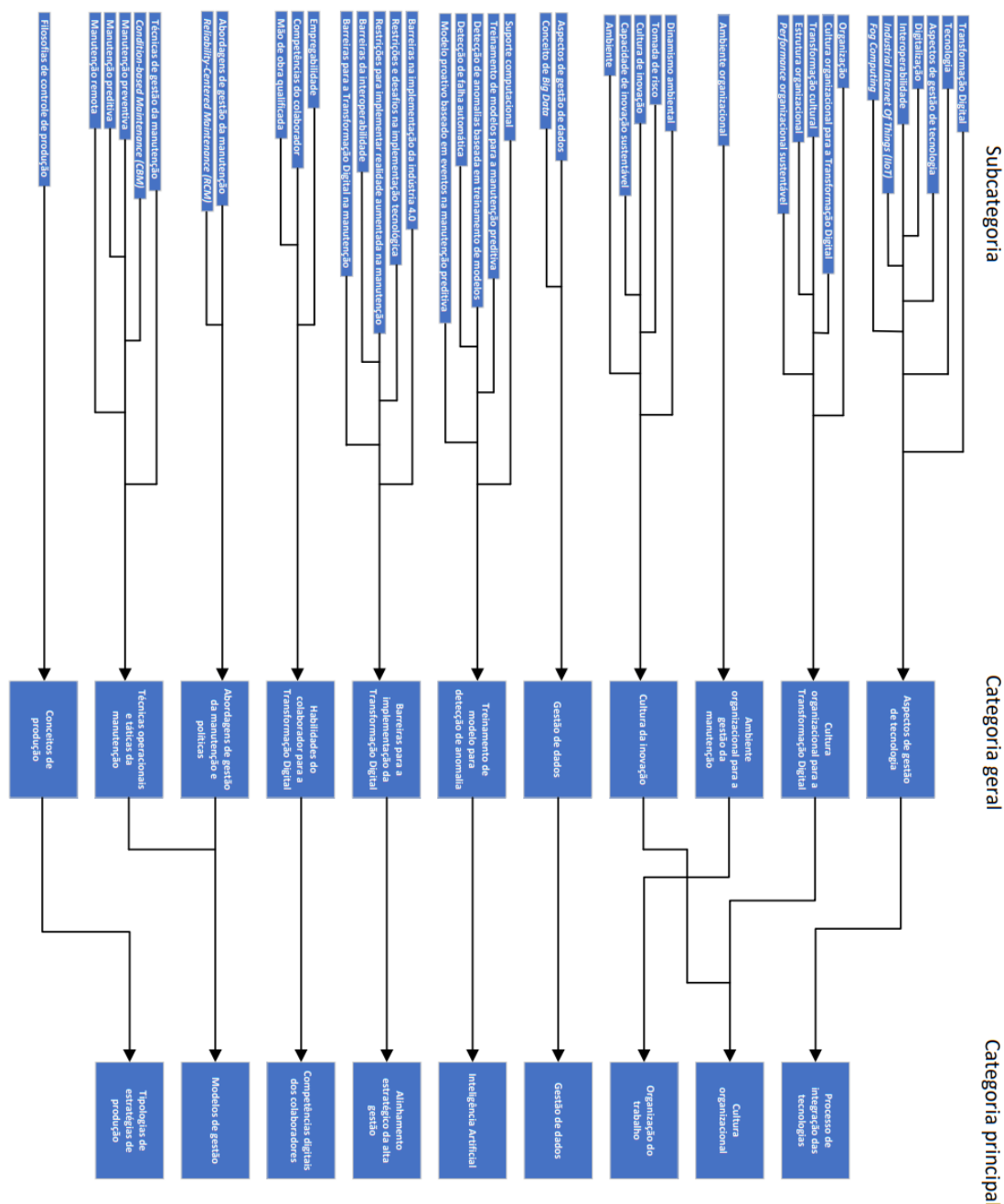


Figura 1: Fluxograma de análise de conteúdo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os 9 temas encontrados são: processo de integração das tecnologias, cultura organizacional, organização do trabalho, gestão de dados, inteligência artificial, alinhamento estratégico da alta gestão, competências digitais dos colaboradores, modelos de gestão e tipologias de estratégias de produção. Nesse sentido, é possível realizar algumas considerações para cada um dos temas encontrados, com base no referencial teórico levantado.

Em relação ao processo de integração das tecnologias, os estudos analisados indicam que a integração das tecnologias digitais à gestão da manutenção ocorre de forma gradual e, em muitos casos, fragmentada. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, Big Data Analytics, realidade aumentada e modelos probabilísticos (como Cadeias de Markov) vêm sendo incorporadas às práticas de manutenção tradicional, como TPM (Nakajima, 1988) e RCM (Moubray, 1997). A literatura sugere que a integração bem-sucedida demanda

interoperabilidade entre sistemas legados e novas plataformas digitais, o que se configura como barreira recorrente (Venâncio et al., 2022). Há relatos de casos em que a adoção de novas soluções foi limitada pela incapacidade de conectar equipamentos antigos a sistemas de monitoramento em tempo real. Por outro lado, quando essa integração é planejada e gradual, os ganhos se manifestam em redução de paradas não programadas, maior confiabilidade operacional e aumento da vida útil dos ativos (Birgelen et al., 2018). Esse alinhamento entre novas tecnologias e métodos consolidados reforça a visão de que a TD não substitui integralmente ferramentas clássicas, mas amplia sua efetividade.

A respeito da cultura organizacional, esta emerge como elemento decisivo para o sucesso da TD na manutenção. Estudos como os de Raj et al. (2020) e Saihi et al. (2024) indicam que a resistência à mudança é um dos principais entraves à adoção de novas tecnologias, especialmente em empresas com práticas consolidadas e baixa exposição a inovações digitais. A literatura aponta que a aceitação das tecnologias depende da percepção de valor que elas entregam ao trabalho cotidiano. Organizações com cultura voltada à inovação e à aprendizagem contínua tendem a incorporar mais rapidamente ferramentas digitais, enquanto ambientes rígidos e hierarquizados demonstram maior lentidão e resistência. Além disso, fomentar uma cultura de uso de dados e valorização de evidências objetivas na tomada de decisão é apontado como condição para que tecnologias como IA e Big Data se consolidem como suporte à manutenção.

O terceiro tema, organização do trabalho, traz que a Transformação Digital implica mudanças significativas na organização do trabalho em manutenção. A literatura analisada evidencia a transição de tarefas predominantemente corretivas para atividades de caráter preditivo e analítico, o que requer reconfiguração de funções, fluxos e responsabilidades. Com sistemas de monitoramento contínuo, há redistribuição das rotinas: parte da equipe atua na interpretação de dados e no planejamento de intervenções, enquanto outra permanece dedicada à execução física das atividades. Esse redesenho organizacional exige maior integração entre manutenção, produção e engenharia de processos, superando a abordagem departamentalizada. Casos apresentados por Masoni et al. (2017) e Rivera et al. (2018) mostram que, em empresas que adotaram monitoramento preditivo, houve aumento da colaboração multidisciplinar, resultando em respostas mais rápidas e decisões mais assertivas.

Em relação a gestão de dados, a análise dos estudos revelou consenso sobre o papel central da gestão eficiente de dados para o sucesso da TD na manutenção. Tecnologias como IoT e Big Data geram grandes volumes de informações, cuja utilidade depende da qualidade, padronização e integridade dos registros. Bousdekis e Mentzas (2019) destacam que, sem protocolos claros de coleta, armazenamento e tratamento, dados podem se tornar inconsistentes e inviabilizar análises preditivas. Outro ponto recorrente é a necessidade de plataformas unificadas capazes de integrar dados de diferentes fontes, formatos e origens, facilitando o cruzamento de informações para gerar insights. A segurança da informação também aparece como preocupação crítica, com menções a riscos de ciberataques e vazamento de dados sensíveis (Raj et al., 2020).

A respeito da Inteligência Artificial, esta surge na literatura como uma das tecnologias mais promissoras para manutenção preditiva e gestão autônoma de ativos. Aplicações incluem redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, sistemas fuzzy e aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado (Paranitharan et al., 2024). Rivera et al. (2018) e Rubio et al. (2019) descrevem casos em que modelos preditivos baseados em IA permitiram identificar falhas incipientes em máquinas injetoras e motores elétricos com alto grau de precisão. Contudo, a literatura também alerta para barreiras como custo elevado, escassez de especialistas e necessidade de dados históricos de alta qualidade para treinar modelos robustos.

O sexto tema, alinhamento estratégico da alta gestão, mostra que o apoio da alta gestão é fator determinante para viabilizar investimentos e promover a mudança organizacional

necessária à TD. Estudos como os de Vial (2019) e Raj et al. (2020) mostram que, sem patrocínio executivo, projetos digitais tendem a ser isolados, com impacto restrito e alta probabilidade de interrupção. A alta direção deve não apenas aprovar recursos, mas também integrar a TD ao planejamento estratégico da empresa, definindo metas claras e mensuráveis, acompanhadas de indicadores de desempenho. Essa integração estratégica fortalece a priorização de projetos e a mobilização de equipes.

Em relação às competências digitais dos colaboradores, a transição para uma manutenção digitalizada exige que os colaboradores desenvolvam competências técnicas e cognitivas voltadas à operação e interpretação de sistemas digitais. A falta dessas competências é apontada por Raj et al. (2020) como um dos principais limitadores da adoção da TD. Programas de capacitação contínua, preferencialmente integrados à jornada de trabalho, são indicados como prática essencial.

O oitavo tema, modelos de gestão, aponta que a adoção de tecnologias digitais na manutenção é potencializada quando associada a modelos de gestão estruturados. Práticas como TPM e RCM continuam relevantes, mas passam a incorporar elementos de gestão baseada em dados e processos digitais integrados. Algumas empresas, segundo Ashjaei e Bengtsson (2017), têm adaptado modelos híbridos, combinando métodos tradicionais com análises preditivas e indicadores derivados de sistemas IoT, criando ciclos de melhoria contínua mais dinâmicos.

O último tema, tipologias de estratégias de produção, mostra que a integração da Transformação Digital à manutenção precisa estar alinhada à estratégia de produção adotada pela organização. Em ambientes de produção contínua, por exemplo, a manutenção preditiva baseada em IoT e IA tende a gerar maior retorno, pois evita paradas não programadas que afetam linhas inteiras. Enquanto, em sistemas de produção sob encomenda, a ênfase recai sobre a flexibilidade e a capacidade de customizar planos de manutenção conforme demandas específicas de cada projeto.

Dessa forma, a análise de conteúdo mostra que a Transformação Digital na gestão da manutenção industrial é um processo multidimensional, no qual fatores tecnológicos, humanos e organizacionais interagem de forma complexa. O sucesso depende de: integração tecnológica planejada e gradual; cultura organizacional orientada à inovação; redesenho da organização do trabalho para incorporar análise de dados; gestão de dados robusta e segura; aplicação criteriosa de IA para gerar valor real; apoio estratégico da alta gestão; capacitação contínua dos colaboradores; modelos de gestão híbridos que integrem o tradicional ao digital; e aderência às estratégias de produção.

Esses nove temas estruturam uma visão holística da TD na manutenção e oferecem base para que empresas planejem sua jornada digital de forma consistente, mitigando riscos e potencializando benefícios.

5 Conclusões/Considerações Finais

A análise conduzida evidencia que a adoção das nove dimensões constitui um caminho estruturado e interdependente para a transformação digital nas organizações industriais. Os resultados indicam que o sucesso nesse processo depende de uma abordagem sistêmica, na qual cada dimensão reforça e sustenta as demais, permitindo que a empresa evolua de forma consistente e sustentável.

O estudo demonstra que a tecnologia, isoladamente, não garante competitividade; é a integração harmoniosa com aspectos humanos, culturais e estratégicos que potencializa seu valor. A cultura organizacional aberta à inovação, aliada ao desenvolvimento de competências digitais e ao apoio da alta gestão, cria o ambiente necessário para que soluções como a inteligência artificial e a gestão avançada de dados tragam resultados concretos.

Nesse sentido, as organizações que buscam ampliar sua maturidade digital devem adotar uma visão holística, alinhando recursos tecnológicos, humanos e estratégicos. Assim, a transformação digital deixa de ser um conjunto de iniciativas pontuais e passa a ser uma estratégia integrada, capaz de sustentar ganhos de eficiência, inovação e competitividade a longo prazo.

O presente estudo apresenta limitações decorrentes da seleção de artigos restrita à base Scopus, o que pode ter excluído contribuições relevantes de outras fontes. Além disso, a maior parte dos estudos analisados está concentrada em setores industriais de alta tecnologia, limitando a generalização para segmentos com menor grau de digitalização.

Como perspectivas de pesquisas futuras, sugere-se: estudos longitudinais sobre o impacto de programas de capacitação em competências digitais e investigações sobre a integração de múltiplas tecnologias emergentes em ambientes de manutenção complexos.

6 Referências

ASHJAEI, M.; BENGTTSSON, M. Enhancing smart maintenance management using fog computing technology. In: 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapura, 2017. 5p. **Anais...** IEEE, 10 a 13 dec. 2017.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Ed. rev. ampl. São Paulo: Edições 70, 2016.

BIRGELEN, A. V.; BURATTI, D.; MAGER, J.; NIGGEMANN, O. Self-Organizing Maps for Anomaly Localization and Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems. In: Procedia CIRP. 6p. **Anais...** 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, may 2018.

BOUSDEKIS, A.; MENTZAS, G. A Proactive Model for Joint Maintenance and Logistics Optimization in the Frame of Industrial Internet of Things. In: 6th International Symposium and 28th National Conference on Operational Research, Tessalônica, Grécia, 2017. 23p. **Anais...** Operational Research in the Digital Era – ICT Challenges, jun. 2017.

ELO, S.; KYNGÄS, H. The qualitative content analysis process. **Journal of Advanced Nursing**, 62, p.107-115, 2008.

GELDERS, L. F; PINTELON, L. M. Maintenance management decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 58, n. 3, p. 301-317, 1992.

INTERNATIONAL DATA CORPORATION (IDC). Guia mundial de gastos em transformação digital. 2024. Disponível em: [https://my.idc.com/getdoc.jsp/?containerId=prUS52305724#:~:text=NEEDHAM%2C%20Mass.%2C%20May%2030,\(ICT\)%20spending%20by%202027](https://my.idc.com/getdoc.jsp/?containerId=prUS52305724#:~:text=NEEDHAM%2C%20Mass.%2C%20May%2030,(ICT)%20spending%20by%202027). Acesso em: 03 mai. 2025.

MASONI, R.; FERRISE, F.; BORDEGONI, M.; GATTULLO, M.; UVA, A. E.; FIORENTINO, M.; CARRABBA, E.; DI DONATO, M. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. In: 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing - FAIM2017, 27 a 30 jun. 2017. **Anais...** Procedia Manufacturing, v. 11, p. 1296-1302, Módena, Itália, 2017.

MOEUF, A. *et al.* *The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0.* **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 3, p. 1118–1136, 2017.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered Maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. 8

NAKAJIMA, S. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. 1. ed. Portland: Productivity Press, 1988.

PARANITHARAN, K. P.; VELMURUGAN, K.; BALAJI, V.; VENKUMAR, P.; KUMARASAMY, R. SME 4.0: Health Monitoring of Maintenance Management Approaches in Smart Manufacturing. **Industry 4.0 Technologies: Sustainable Manufacturing Supply Chains**, v. 2, n. 1, p. 99-112, 2024.

PRIYONO, A.; MOIN, A.; PUTRI, V. N. A. O. *Identifying Digital Transformation Paths in the Business Model of SMEs during the COVID-19 Pandemic.* **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v. 6, n. 4, p. 1-22, 2020.

RAJ, A.; DWIVEDI, G.; SHARMA A.; JABBOUR, A. B. L. D. S.; RAJAK, S. 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, 17p, 2020.

RIVERA, D. L.; SCHOLZ, M. R.; FRITSCHER, M.; KRAUSS, M.; SCHILLING, K. Towards a Predictive Maintenance System of a Hydraulic Pump. In: 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing – INCOM 2018, Bergamo, Itália, 2018. 6p. **Anais... IFAC PapersOnLine**, 11 a 13 jun. 2018.

RUBIO, E. M.; TORRES, P. M. B.; DIONÍSIO, R. P. Smart Gateways for IOT-Factory Integration: trends and use case. **Technological Developments in Industry 4.0 for Business Applications**, p. 149-170, 2019.

SAIHI, A; BEN-DAYA, M.; AS'AD, R. *Advancing Maintenance Digital Transformation: A Conceptual Framework to Guide Its Effective Implementation.* **IEEE Engineering Management Review**, vol. 52, no. 1, p. 121-150, 2024.

VENÂNCIO, A. L. A. C. *et al.* *Technology prioritization framework to adapt maintenance legacy systems for Industry 4.0 requirement: an interoperability approach.* **Production**, v. 32, p. 1-21, 2022.

VIAL, G. *Understanding digital transformation: A review and a research Agenda.* **The Journal of Strategic Information Systems**, v. 28, n. 2, p. 118–144, jun. 2019.

VON BIRGELEN, A.; BURATTI, D.; MAGER, J.; NIGGEMANN, O. Self-Organizing Maps for Anomaly Localization and Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems. In: 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Stockholm, Sweden, 2018. 6p. **Anais... Procedia CIRP**, 16-18 may 2018.