

Tpm e indústria 4.0: integração de tecnologias inteligentes na manutenção

Tpm and industry 4.0: integration of smart technologies in maintenance

Jefferson José Penha D'Addario

RESUMO

O presente estudo aborda a integração entre a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Indústria 4.0, destacando o impacto das tecnologias emergentes na modernização das práticas de manutenção industrial. A TPM, consolidada como uma metodologia eficaz para a maximização da eficiência dos equipamentos, vem sendo aprimorada pelo avanço da Indústria 4.0, que introduz Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e sistemas ciberfísicos. A convergência dessas abordagens tem possibilitado a transição de modelos de manutenção corretiva e preventiva para estratégias mais preditivas e prescritivas, permitindo a identificação precoce de falhas e a redução de paradas não programadas. O estudo discute como sensores inteligentes, algoritmos de aprendizado de máquina e computação em nuvem vêm revolucionando a gestão da manutenção, otimizando a produtividade e reduzindo custos operacionais. Além disso, a pesquisa evidencia o impacto positivo dessas tecnologias na gestão da qualidade, segurança do trabalho e capacitação de colaboradores, promovendo uma cultura organizacional voltada para a melhoria contínua e inovação. A análise aponta que a adoção dessas práticas contribui para um ambiente industrial mais eficiente, sustentável e competitivo, garantindo maior previsibilidade e confiabilidade dos ativos produtivos. Conclui-se que a modernização da manutenção, viabilizada pela Indústria 4.0, representa um diferencial estratégico para empresas que buscam excelência operacional e otimização dos seus processos produtivos.

Palavras-chave: Manutenção Produtiva Total (TPM). Eficiência Operacional. Gestão da Manutenção. Disponibilidade de Equipamentos.

ABSTRACT

The present study addresses the integration between Total Productive Maintenance (TPM) and Industry 4.0, highlighting the impact of emerging technologies on the modernization of industrial maintenance practices. TPM, established as an effective methodology for maximizing equipment efficiency, has been enhanced by the advancements of Industry 4.0, which introduces the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data, and cyber-physical systems. The convergence of these approaches has enabled the transition from corrective and preventive maintenance models to more predictive and prescriptive strategies, allowing for early failure detection and a reduction in unplanned downtime. The study discusses how smart sensors, machine learning algorithms, and cloud computing are revolutionizing maintenance management, optimizing productivity, and reducing operational costs.

Furthermore, the research highlights the positive impact of these technologies on quality management, workplace safety, and employee training, fostering an organizational culture focused on continuous improvement and innovation. The analysis indicates that adopting these practices contributes to a more efficient, sustainable, and competitive industrial environment, ensuring greater predictability and reliability of productive assets. It is concluded that the modernization of maintenance, enabled by Industry 4.0, represents a strategic advantage for companies seeking operational excellence and process optimization.

Keywords: Total Productive Maintenance (TPM); Operational Efficiency; Maintenance Management; Equipment Availability.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção desempenha um papel essencial no ambiente industrial, influenciando diretamente a produtividade e a eficiência operacional. Falhas inesperadas em máquinas durante o processo produtivo podem gerar impactos significativos no cronograma de produção, resultando em atrasos, aumento de custos com horas extras e necessidade de retrabalho para minimizar perdas. Além disso, a falta de estratégias eficazes de manutenção pode comprometer a lucratividade e até mesmo a sobrevivência do negócio, uma vez que equipamentos ineficientes reduzem a capacidade produtiva e aumentam o desperdício de recursos (Marques; Brito, 2019).

Nesse contexto, empresas que adotam princípios de produção enxuta e *just-in-time* buscam constantemente a eliminação de desperdícios e a otimização dos processos industriais. A confiabilidade dos equipamentos torna-se um fator estratégico para a redução de estoques, assegurando a entrega de produtos com padrões de qualidade mais elevados e menores índices de refugo e retrabalho. Dessa forma, investir em práticas de manutenção mais eficientes não apenas melhora o desempenho operacional, mas também fortalece a competitividade e sustentabilidade das indústrias (Silva *et al.*, 2018).

Uma das metodologias mais eficazes para garantir a confiabilidade dos equipamentos e a otimização dos processos produtivos é a Manutenção Produtiva Total (TPM). Essa abordagem visa maximizar a eficiência dos ativos industriais por meio da participação ativa dos colaboradores em diferentes níveis organizacionais, promovendo uma cultura de melhoria contínua e prevenção de falhas. Seus princípios incluem a manutenção autônoma, a capacitação da equipe e a adoção de estratégias sistemáticas para reduzir falhas e perdas produtivas (Ribeiro, 2014). A aplicação da TPM tem se mostrado fundamental para minimizar desperdícios, melhorar a qualidade

dos produtos e aumentar a confiabilidade dos processos, garantindo a estabilidade operacional e contribuindo diretamente para a competitividade das empresas (Ribeiro, 2014).

Com os avanços da Indústria 4.0, novas tecnologias têm sido incorporadas aos processos industriais, promovendo um ambiente de produção mais automatizado, interconectado e inteligente. A introdução de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e computação em nuvem tem revolucionado a maneira como as indústrias gerenciam seus ativos e processos produtivos. Essas tecnologias permitem a coleta e análise de grandes volumes de dados em tempo real, facilitando a implementação de estratégias de manutenção preditiva e prescritiva, que antecipam falhas e otimizam a vida útil dos equipamentos (Borlido, 2017).

A integração da TPM com os conceitos da Indústria 4.0 representa um avanço significativo na gestão da manutenção industrial, possibilitando maior previsibilidade de falhas, redução de paradas não programadas e aumento da eficiência operacional. Sensores inteligentes aliados a sistemas de aprendizado de máquina permitem que os equipamentos sejam monitorados continuamente, identificando padrões de desgaste e sugerindo intervenções antes que ocorram falhas críticas. Além disso, a análise preditiva baseada em dados históricos e em tempo real contribui para um planejamento mais eficiente da manutenção, reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade (Viannini; Miranda Junior, 2020).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar a convergência entre a Manutenção Produtiva Total e as tecnologias emergentes da Indústria 4.0, investigando como essa integração pode aprimorar as práticas de manutenção industrial e elevar a competitividade das organizações. A pesquisa pretende demonstrar que a aplicação de soluções tecnológicas na gestão da manutenção não apenas potencializa os benefícios da TPM, mas também representa um diferencial estratégico para as empresas que buscam maior eficiência e sustentabilidade em seus processos produtivos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Manutenção Produtiva Total (TPM): conceito, pilares e benefícios

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é uma metodologia de gestão originada no Japão na década de 1970, que visa maximizar a eficiência dos equipamentos industriais por meio do envolvimento de todos os colaboradores na manutenção e melhoria contínua dos processos produtivos. O principal objetivo da TPM é eliminar perdas, reduzir paradas não programadas e garantir a qualidade dos produtos, promovendo uma cultura organizacional de responsabilidade compartilhada (Ribeiro, 2014).

De acordo com Nakajima (1989), a TPM tem como principais objetivos aumentar a confiabilidade dos equipamentos, eliminar falhas e otimizar a disponibilidade das máquinas no ambiente industrial. Para alcançar esses resultados, a metodologia promove uma gestão integrada entre operadores e equipamentos, incentivando melhorias estruturais na empresa. Nesse contexto, a capacitação técnica dos funcionários torna-se essencial, uma vez que fortalece a conscientização sobre a importância do desempenho dos ativos produtivos. No entanto, os treinamentos representam um investimento de longo prazo, proporcionando benefícios como a formação de operadores multifuncionais, maior senso de responsabilidade, redução no tempo de reparo e uma colaboração mais eficiente entre equipes operacionais e de manutenção.

A TPM é uma metodologia de gestão desenvolvida no Japão, cujo principal objetivo é maximizar a eficiência dos equipamentos industriais, reduzindo falhas e promovendo a melhoria contínua dos processos produtivos. Segundo Nakajima (1989), a TPM envolve a participação ativa de todos os colaboradores da empresa, desde os operadores até a alta gestão, criando um ambiente de trabalho onde a manutenção é vista como uma responsabilidade compartilhada. Essa abordagem visa eliminar desperdícios e melhorar o desempenho global da organização.

A estrutura da TPM é baseada em oito pilares fundamentais, que servem como diretrizes para a implementação eficaz da metodologia. O primeiro pilar, Melhoria Focada, busca eliminar perdas que impactam negativamente a eficiência produtiva, utilizando metodologias como o ciclo PDCA e o diagrama de Ishikawa para identificar e solucionar problemas na raiz (Ribeiro, 2014). A aplicação desse pilar permite ganhos expressivos na confiabilidade dos equipamentos e na redução de falhas recorrentes.

O segundo pilar, Manutenção Autônoma, incentiva os operadores a assumirem um papel mais ativo na conservação dos equipamentos, realizando inspeções diárias, limpeza e pequenas manutenções preventivas. Essa prática contribui para aumentar a conscientização sobre o estado das máquinas e prevenir falhas antes que causem

impactos na produção (Tsuchiya, 1992). Dessa forma, os operadores tornam-se mais responsáveis pelos equipamentos que utilizam diariamente.

A Manutenção Planejada representa o terceiro pilar da TPM e está voltada para o estabelecimento de estratégias sistemáticas para manutenção preventiva e preditiva. Segundo Wireman (2005), essa abordagem baseia-se na análise de dados históricos dos equipamentos, possibilitando um planejamento mais eficiente e reduzindo a necessidade de manutenções corretivas. Essa prática contribui diretamente para a confiabilidade das máquinas e a redução de paradas não programadas.

O quarto pilar, Educação e Treinamento, é essencial para garantir que os colaboradores possuam o conhecimento necessário para operar e manter os equipamentos de maneira eficiente. Para Nakajima (1989), o desenvolvimento contínuo dos funcionários melhora a capacidade técnica da equipe, reduzindo erros operacionais e fortalecendo a cultura de melhoria contínua dentro da empresa. Dessa forma, a capacitação torna-se um investimento de longo prazo para a organização.

O quinto pilar, Gestão Antecipada, visa prever falhas e melhorar continuamente os equipamentos para que atendam às demandas futuras. Segundo Shirose (1996), essa prática baseia-se na coleta e análise de dados de manutenção, permitindo que as indústrias antecipem problemas e adotem soluções antes que impactem a produção. Essa abordagem reduz custos e melhora a disponibilidade dos ativos.

O sexto pilar, Manutenção da Qualidade, está diretamente relacionado à garantia de que os equipamentos operem de forma a evitar defeitos nos produtos. Segundo Jostes e Helms (1994), falhas em equipamentos podem comprometer a qualidade final do produto, aumentando retrabalhos e desperdícios. A aplicação desse pilar garante que as condições das máquinas estejam sempre otimizadas para a produção com padrões elevados de qualidade.

A segurança também é um aspecto essencial na TPM, representado pelo sétimo pilar, Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA). Segundo Ahuja e Khamba (2008), a integração desse pilar à rotina industrial reduz acidentes de trabalho e melhora as condições ergonômicas dos operadores. Além disso, práticas sustentáveis na manutenção produtiva minimizam o impacto ambiental das operações industriais.

O oitavo pilar, Office TPM, trata da aplicação dos conceitos de melhoria contínua na gestão administrativa. Segundo Bhadury (2000), essa iniciativa busca eliminar desperdícios nos processos administrativos, garantindo maior eficiência na gestão de documentos, no controle de estoques e na comunicação entre setores.

Dessa forma, a TPM se expande além do chão de fábrica, impactando toda a estrutura organizacional.

A adoção desses oito pilares traz diversos benefícios para as organizações, incluindo o aumento da confiabilidade dos equipamentos, a redução de custos operacionais e a melhoria da qualidade dos produtos. Segundo Rodrigues e Hatakeyama (2006), a TPM promove a integração entre os setores de manutenção e produção, resultando em processos mais eficientes e uma cultura organizacional voltada para a excelência. Além disso, ao incentivar o envolvimento dos colaboradores, a metodologia melhora a motivação e o engajamento das equipes, fortalecendo a competitividade industrial.

2.2 Indústria 4.0: conceito, princípio, principais tecnologias e impacto na manufatura

A Indústria 4.0, conhecida também como Quarta Revolução Industrial, é um modelo revolucionário que engloba as variadas inovações tecnológicas, atuando principalmente nos campos de automação, controle e tecnologia. Schwab (2016) indica que a Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial, vai além de sistemas e máquinas conectadas. A diferença desta revolução em relação às anteriores é a fusão e interação de tecnologias de várias áreas do conhecimento, como físicas, digitais e biológicas.

Para Moraes e Monteiro (2017), a partir dos conceitos de inovação, a Indústria 4.0 surge como um conjunto de inovações de ruptura que apresentam grandes impactos nos conceitos de operações, sendo caracterizada pela crescente digitalização e interconexão de produtos, cadeias de valor e de modelos de negócios, centrada na produção inteligente de produtos, métodos e processos (Smart Production). A fábrica inteligente (Smart Factory) é um elemento importante da Indústria 4.0, sendo que nela domina a complexidade, é menos suscetível a interferências humanas e aumenta a eficiência da produção. Na fábrica inteligente, comunicar-se com as pessoas, máquinas e recursos será tão natural quanto em um contexto de rede social, sendo que a mudança de paradigma necessária para a Indústria 4.0 é um projeto de longo prazo e está somente começando.

A Indústria 4.0 possibilita a maior automação de tarefas, o que significa que os trabalhadores devem estar preparados para realizar novas tarefas. O mesmo se aplica à formação em engenharia, que possui um grande potencial para formar os

profissionais do futuro e conscientizá-los sobre as novas tendências e oportunidades tecnológicas. Os gestores também devem adaptar sua estratégia de gestão aos novos requisitos do mercado (Erol *et al.*, 2016).

Segundo Rübmann *et al.* (2015), esses avanços são possível devido aos avanços tecnológicos verificados na última década, conjugados com os avanços das áreas de tecnologias de informação e engenharia. Ainda segundo os autores, são nove os eixos que suportam este desenvolvimento e que permitem que sensores, máquinas, ferramentas e tecnologias de informação sejam conectados ao longo de toda a cadeia de produção: Big Data e análise de dados, robótica, simulação, Internet das Coisas, cibersegurança, computação em nuvem, sistemas de integração horizontal e vertical, realidade aumentada e processos aditivos.

A Indústria 4.0 tem potencial para impactar significativamente a gestão e o mercado de trabalho no futuro, viabilizando a criação de novos modelos de negócios com ampla influência na indústria e nos mercados. Essas transformações afetam todo o ciclo de vida do produto, redefinindo os processos de produção e as estratégias empresariais. Além disso, a adoção dessas inovações promove a otimização dos processos industriais, aprimorando a eficiência operacional e fortalecendo a competitividade das empresas no cenário global (Pereira; Romero, 2017).

A Indústria 4.0 tem provocado um impacto profundo na manufatura, transformando os processos produtivos e impulsionando ganhos em eficiência, qualidade e flexibilidade. Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), a automação e a digitalização possibilitam maior integração entre os sistemas produtivos, permitindo a tomada de decisões em tempo real e a adaptação dos processos de manufatura às demandas de mercado de maneira mais ágil. Essa evolução reduz os tempos de produção e minimiza desperdícios, contribuindo para uma gestão industrial mais sustentável.

Além da otimização da produção, a Indústria 4.0 tem gerado um impacto significativo na manutenção industrial. De acordo com Lee, Bagheri e Kao (2015), a implementação de sistemas ciberfísicos possibilita a aplicação da manutenção preditiva, na qual sensores inteligentes monitoram continuamente as condições dos equipamentos e antecipam falhas antes que comprometam a produção. Essa abordagem reduz custos operacionais e melhora a confiabilidade dos ativos industriais, evitando paradas não programadas e elevando a disponibilidade dos equipamentos.

Outro efeito direto da Indústria 4.0 na manufatura está na personalização em massa. Segundo Frank, Dalenogare e Ayala (2019), a digitalização dos processos produtivos permite que as empresas adaptem a produção às necessidades específicas dos clientes, garantindo produtos customizados sem comprometer a eficiência da linha de produção. Isso resulta em maior competitividade e na capacidade de atender a mercados cada vez mais segmentados, ampliando as oportunidades de negócios.

A adoção da Indústria 4.0 também impacta a logística dentro das plantas industriais. Para Ivanov, Dolgui e Sokolov (2019), a interconectividade entre máquinas e sistemas permite um gerenciamento mais eficiente da cadeia de suprimentos, reduzindo estoques desnecessários e melhorando o fluxo de materiais. Essa melhoria na logística interna contribui para uma produção mais enxuta e integrada, fortalecendo a competitividade das empresas no cenário global.

A Indústria 4.0 também tem gerado mudanças no perfil da mão de obra industrial. Segundo Pfeiffer, Siemsen e Abele (2021), a digitalização e automação dos processos produtivos exigem profissionais com novas competências, voltadas para a análise de dados, programação e operação de sistemas inteligentes. Isso tem levado as indústrias a investirem em programas de capacitação para preparar os trabalhadores para os desafios da manufatura digital, garantindo a adaptação ao novo cenário tecnológico.

2.3 A relação entre TPM e Indústria 4.0: modernização da manutenção

A TPM e a Indústria 4.0 representam abordagens inovadoras que, quando integradas, promovem uma transformação profunda na manutenção industrial. A TPM, criada no Japão, tem como objetivo a maximização da eficiência dos equipamentos, envolvendo todos os colaboradores na busca pela melhoria contínua dos processos produtivos. Em paralelo, a Indústria 4.0 traz consigo um conjunto de tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Big Data, que possibilitam a criação de ambientes de produção altamente inteligentes e interconectados. A combinação dessas abordagens não apenas melhora a gestão da manutenção, mas também eleva a competitividade e a eficiência operacional das empresas (Souza, 2022).

A convergência entre TPM e Indústria 4.0 modifica a abordagem tradicional da manutenção industrial, tornando-a cada vez mais preditiva e menos reativa. A

implementação de sensores IoT nos equipamentos permite a coleta contínua de dados operacionais em tempo real. Essas informações são analisadas por sistemas de IA, que identificam padrões de comportamento e antecipam possíveis falhas. Esse avanço possibilita intervenções preventivas e reduz drasticamente o número de paradas inesperadas, alinhando-se aos princípios da TPM de eliminação de perdas e maximização da produtividade (Silvestri et al., 2020).

Além da manutenção preditiva, a manutenção autônoma, um dos pilares fundamentais da TPM, é significativamente potencializada pela Indústria 4.0. Segundo Carvalho (2022), operadores equipados com dispositivos móveis, interfaces de realidade aumentada e softwares de monitoramento remoto podem acompanhar o desempenho das máquinas em tempo real, realizar inspeções periódicas e executar intervenções básicas com maior precisão e agilidade. Esse novo paradigma reduz a dependência de equipes especializadas para atividades simples, ao mesmo tempo em que aumenta a autonomia dos operadores, melhorando a confiabilidade dos equipamentos e reduzindo os tempos de resposta para correção de falhas.

A manutenção planejada também se beneficia diretamente da análise de dados históricos e em tempo real proporcionada pelo Big Data. A partir de informações detalhadas sobre o desempenho dos equipamentos, torna-se possível programar intervenções de forma otimizada, garantindo a execução da manutenção no momento certo. Essa abordagem reduz custos operacionais, aumenta a vida útil dos ativos e melhora a confiabilidade dos sistemas industriais. A capacidade de prever falhas antes que elas impactem a produção também promove maior estabilidade nos processos, minimizando perdas financeiras decorrentes de paradas não programadas (Silvestri et al., 2020).

Além dos ganhos operacionais, a capacitação dos colaboradores tem se tornado mais eficaz com o uso de tecnologias digitais aplicadas à educação corporativa. Plataformas de e-learning, simuladores virtuais e realidade aumentada possibilitam treinamentos interativos e personalizados, permitindo que os funcionários adquiram conhecimento prático de forma dinâmica e eficiente. Essas ferramentas facilitam o aprendizado de novas metodologias e tecnologias, garantindo que os trabalhadores estejam preparados para lidar com a complexidade dos sistemas da Indústria 4.0. O fortalecimento da cultura de melhoria contínua impulsionado por esses recursos consolida um ambiente de trabalho mais inovador e produtivo (Lima; Silva, 2018).

A gestão da qualidade também se beneficia da integração entre TPM e Indústria 4.0. A incorporação de sistemas de monitoramento em tempo real garante que qualquer desvio nos processos produtivos seja detectado imediatamente, possibilitando a implementação de ações corretivas sem comprometer a eficiência da produção. Essa vigilância constante contribui para a redução de defeitos nos produtos, minimiza retrabalhos e aprimora a padronização da qualidade industrial. Como resultado, as empresas conseguem elevar a satisfação dos clientes e aumentar sua competitividade no mercado global (Aguiar et al., 2019).

No que diz respeito à segurança, saúde e meio ambiente (SSMA), a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 redefine a forma como riscos são gerenciados no ambiente fabril. Sensores ambientais monitoram temperatura, níveis de ruído, qualidade do ar e vibrações em equipamentos, garantindo condições mais seguras para os trabalhadores. Além disso, dispositivos vestíveis (wearables) e algoritmos de IA são capazes de identificar padrões de comportamento que indicam fadiga ou risco ergonômico, acionando alertas preventivos para evitar acidentes e promover um ambiente de trabalho mais seguro e sustentável (Silva et al., 2021).

A gestão administrativa da manutenção também é modernizada com a integração da TPM e das tecnologias digitais. Sistemas Enterprise Resource Planning (ERP) e Computerized Maintenance Management System (CMMS) possibilitam uma visão unificada e em tempo real de todos os processos de manutenção, facilitando a tomada de decisão estratégica. Essa digitalização das operações reduz desperdícios, otimiza fluxos de trabalho e aprimora a comunicação entre os setores da empresa, tornando a gestão mais eficiente e alinhada às demandas da Indústria 4.0 (Carvalho, 2022).

Outra inovação relevante está na gestão inicial de produtos, que passa a considerar aspectos de manutenção e eficiência operacional já na fase de concepção dos projetos industriais. O uso de modelos digitais, gêmeos digitais (digital twins) e simulações computacionais possibilita a antecipação de possíveis falhas e a otimização de componentes antes mesmo de sua fabricação. Esse alinhamento entre engenharia de produto e engenharia de manutenção favorece a criação de equipamentos mais confiáveis e de fácil manutenção, reduzindo custos ao longo do ciclo de vida dos ativos industriais (Silvestri et al., 2020).

Dessa forma, a integração entre TPM e Indústria 4.0 promove um avanço significativo na modernização da manutenção industrial. Além de aumentar a eficiência operacional, essa convergência fortalece a cultura organizacional em torno

da melhoria contínua e impulsiona a inovação dentro das empresas. O uso de tecnologias avançadas não apenas otimiza os processos produtivos, mas também proporciona um ambiente mais seguro, sustentável e competitivo, garantindo que a indústria esteja preparada para os desafios da era digital.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução das práticas de manutenção industrial tem sido um fator determinante para a eficiência e competitividade das organizações. A TPM surgiu como uma metodologia capaz de reduzir falhas, otimizar processos e envolver colaboradores na busca por melhorias contínuas. No entanto, a crescente complexidade dos sistemas produtivos e a necessidade de maior previsibilidade das falhas exigiram a adoção de novas estratégias para garantir a confiabilidade operacional. Nesse cenário, a Indústria 4.0 trouxe um conjunto de inovações tecnológicas que ampliam as possibilidades da manutenção, tornando-a mais inteligente, eficiente e preditiva. A combinação dessas abordagens tem impulsionado uma transformação estrutural na forma como as empresas gerenciam seus ativos produtivos.

A integração entre TPM e Indústria 4.0 permite que as práticas tradicionais de manutenção evoluam de uma abordagem corretiva e preventiva para uma manutenção preditiva e prescritiva, baseada na análise de dados em tempo real e inteligência artificial. O uso de sensores inteligentes, IoT e Big Data possibilita a coleta e processamento de informações operacionais com alto grau de precisão, antecipando falhas e reduzindo significativamente o tempo de inatividade das máquinas. Dessa forma, a manutenção se torna mais estratégica, reduzindo custos operacionais e melhorando a eficiência produtiva. Além disso, a modernização dos processos impacta positivamente a qualidade dos produtos, a sustentabilidade ambiental e a segurança dos trabalhadores, reforçando os pilares fundamentais da TPM.

Outro aspecto relevante dessa convergência é a capacitação dos colaboradores. Com a digitalização da manutenção, os profissionais precisam desenvolver novas habilidades para operar e interpretar os sistemas integrados da Indústria 4.0. Ferramentas como realidade aumentada, inteligência artificial e simuladores virtuais tornam o aprendizado mais dinâmico e interativo, garantindo que os operadores possam atuar de forma mais eficiente e autônoma. Assim, a

modernização da manutenção não apenas aprimora a gestão dos ativos industriais, mas também fortalece a cultura organizacional voltada para a inovação e o desenvolvimento contínuo das equipes.

Diante desse panorama, conclui-se que a integração entre TPM e Indústria 4.0 representa um avanço significativo para a manutenção industrial, garantindo maior previsibilidade, confiabilidade e eficiência dos processos produtivos. Essa sinergia não apenas otimiza a utilização dos recursos, mas também promove um ambiente de trabalho mais seguro, sustentável e alinhado às exigências do mercado global. Empresas que investem nessa modernização não apenas reduzem custos e perdas operacionais, mas também fortalecem sua competitividade e capacidade de inovação. Portanto, a adoção dessas estratégias não deve ser vista apenas como uma tendência tecnológica, mas como um imperativo para organizações que buscam excelência operacional e diferenciação no setor industrial.

REFERENCIAS

AHUJA, I. P. S.; KHAMBA, J. S. Total Productive Maintenance: Literature Review and Directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 7, p. 709-756, 2008.

AGUIAR, M. F. Interações entre Manutenção Produtiva Total e Gestão da Qualidade Total: Estudo de Caso em Uma Empresa do Setor Alimentício. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 19, Edição Especial, p. 122 – 134. 2019

BHADURY, B. Maintenance Strategy: A Planned Approach. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 6, n. 3, p. 138-153, 2000.

BORLIDO, D. J. A. Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção. 2017. 77 f. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica]. Universidade do Porto. 2017.

CARVALHO, R. Manutenção autônoma: o primeiro pilar da TPM. **Revista Científica E-Locução**, v. 1, n. 22, p. 16, 2022. Disponível em: <https://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucão/article/view/505>. Acesso em: 27 fev. 2025.

EROL, S.; JÄGER, A.; HOLD, P.; OTT, K.; SIHN, W. Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production. **Procedia CIRP**, v. 54, p. 13-18, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116301500>. Acesso em: 27 fev. 2025.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>. Acesso em: 27 fev. 2025.

IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the supply chain resilience. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 8, p. 2564-2583, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>. Acesso em: 27 fev. 2025.

LIMA, R. L. A.; SILVA, J. E. A. R. Manutenção produtiva total: um estudo de caso sobre a implementação de um modelo de gestão da manutenção. XXXVIII Encontro nacional de Engenharia de Produção. 2018. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_258_483_35872.pdf. Acesso em: 10 mar. 2025.

JOSTES, R. W.; HELMS, M. M. Total Productive Maintenance and Its Link to Total Quality Management. **Work Study**, v. 43, n. 7, p. 18-20, 1994.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W. D.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0**: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. Industriellen Revolution—DFKI. Disponível em: <https://www.dfki.de/web/presse/pressehighlights/industrie-4-0-mit-dem-internet-der-dinge-auf-demweg-zur-4-industriellen-revolution/view>. Acesso em: 27 fev. 2025.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18-23, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>. Acesso em: 27 fev. 2025.

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8913-8923 jul. 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/2315/2322>. Acesso em: 20 fev. 2025.

MORAIS, R. R.; MONTEIRO, R. **A indústria 4.0 e o impacto na área de operações**: um ensaio. Anais do V SINGEP – Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://singep.org.br/5singep/resultado/450.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.

NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM**: Total Productive Maintenance. IMC Internacional Sistemas Educativos Ltda.: São Paulo, 1989.

PEREIRA, A. C.; Fernando R. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. **Procedia Manufacturing** v.13, p. 1206–14, 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/Acer/Downloads/AreviewofthemeaningsandtheimplicationsoftheIndustry4.0concept.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2021.

PFEIFFER, S.; SIEMSEN, H.; ABELE, E. Work and qualification in the digital factory: a literature review and research agenda for the industrial internet of things.

Production & Manufacturing Research, v. 9, n. 1, p. 159-178, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21693277.2021.1939767>. Acesso em: 27 fev. 2025.

RIBEIRO, H. **Manutenção Produtiva Total: A Bíblia do TPM**. Santa Cruz do Rio Pardo, SP: Viena, 2014. 592 p.

RODRIGUES, C. M.; HATAKEYAMA, K. Analysis of the Fall of TPM in Companies. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 12, n. 2, p. 121-132, 2006.

RÜBMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; et al. **The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. The Boston Consulting Group. 2016.

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

SHIROSE, K. **TPM for Operators**. Portland: Productivity Press, 1996.

SILVESTRI, L.; FORCINA, A.; INTRONA, V.; et al. Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: a systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 123, p. 103335, 2020.

SILVA, C. M. M. da; SILVA, M. A. G. da; PEREIRA, A. S.; FRANZ, L. A. dos S.; BEMVENUTI, R. H. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na segurança e saúde do trabalhador: uma revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 7, n. 5, p. 252–268, 2021.

SILVA, T. G. E. et al. **Produção Enxuta**: conceitos, características e aplicação de ferramentas em uma empresa de panificação. XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2018. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_258_478_35392.pdf. Acesso em: 20 fev. 2025.

SOUZA, R. O. **Um framework para a integração do manufacturing execution system - MES do total Productive Maintenance – TPM no ambiente da Indústria 4.0**. 2022. 82 f. [Dissertação Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia de Sistemas Produtivos]. Centro Estadual de Educação Tecnologia Paula Souza. São Paulo: 2022.

TSUCHIYA, S. **Autonomous Maintenance in Seven Steps**. Cambridge: Productivity Press, 1992.

VIANNINI, R. A.; MIRANDA JUNIOR, H. L. **A manutenção industrial frente à Indústria 4.0**. In: Engenharia de Produção: Novas Pesquisas e Tendências. AYA Editora, 2020.

WIREMAN, T. **Total Productive Maintenance**. New York: Industrial Press, 2005.