



COMPETÊNCIAS ESSENCIAIS PARA A FORMAÇÃO DE PROFISSIONAIS EM MANUTENÇÃO
PREDITIVA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

ESSENTIAL COMPETENCIES FOR THE TRAINING OF PREDICTIVE MAINTENANCE
PROFESSIONALS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Luciano de Jesus Menezes^{1 i}
Roberto Giani Pattaro Junior^{2 ii}
Ricardo Favaro^{3 iii}
Renato Ludwig Pilan^{4 iv}
Sandra Monica do Nascimento Moura^{5 v}

Data de submissão: (14/02/2025) Data de aprovação: (06/06/2025)

RESUMO

A evolução tecnológica e a crescente adoção de práticas da Indústria 4.0 têm transformado significativamente o campo da manutenção industrial, com destaque para a manutenção preditiva. Este avanço tecnológico demanda profissionais com novas competências, criando um desafio significativo para as instituições de ensino técnico e profissionalizante. Este artigo tem como objetivo analisar as competências necessárias para a formação de profissionais de manutenção no contexto da manutenção preditiva, visando contribuir para o aprimoramento dos programas de formação técnica na área. A metodologia baseia-se em uma revisão sistemática da literatura dos últimos anos, abrangendo publicações sobre manutenção preditiva, formação profissional e competências necessárias no contexto da Indústria 4.0. Os resultados esperados incluem o mapeamento das principais tecnologias e práticas da manutenção preditiva, a identificação das competências requeridas dos profissionais e a proposta de diretrizes para o desenvolvimento dessas competências na formação técnica, considerando metodologias de ensino aprendizagem ativas.

Palavras-chave: manutenção preditiva; formação profissional; competências técnicas; Indústria 4.0; educação profissional.

ABSTRACT

Technological evolution and the growing adoption of Industry 4.0 practices have significantly transformed the field of industrial maintenance, with emphasis on predictive maintenance.

¹ Mestre em Engenharia Mecânica, Coordenador Pedagógico SENAI Departamento Regional de São Paulo. E-mail: lmenezes@sp.senai.br

² Doutor em Engenharia Mecânica, Professor de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: roberto.gjunior@sp.senai.br

³ Mestre em Engenharia Mecânica, Professor de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: ricardo.favaro@sp.senai.br

⁴ Especialista em Manutenção Industrial, Professor de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: renato.pilan@sp.senai.br

⁵ Doutora em Estudos Literários, Professora de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: sandra.nascimento@sp.senai.br

This technological advancement demands professionals with new competencies, creating a significant challenge for technical and vocational education institutions. This article aims to analyze the necessary competencies for training maintenance professionals in the context of predictive maintenance, aiming to contribute to the improvement of technical training programs in the area. The methodology is based on a systematic literature review of the last years, covering publications on predictive maintenance, professional training, and necessary competencies in the Industry 4.0 context. Expected results include mapping the main technologies and practices of predictive maintenance, identifying required professional competencies, and proposing guidelines for developing these competencies in technical training, considering active methodologies.

Keywords: predictive maintenance; professional training; technical competencies; Industry 4.0; professional education.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção industrial tem experimentado uma significativa evolução ao longo das últimas décadas, transitando de uma abordagem puramente reativa para estratégias cada vez mais sofisticadas e proativas (Almeida, 2011; Trojan; Marçal; Baran, 2013). Desde a primeira revolução industrial até os dias atuais, as práticas de manutenção evoluíram da simples correção de falhas para um conjunto complexo de técnicas preventivas e preditivas, impulsionadas principalmente pelos avanços tecnológicos e pela crescente necessidade de eficiência operacional (Antoniolli, 1999). A relevância econômica desta área para o setor produtivo evidencia a necessidade de sua otimização através de técnicas mais avançadas (Aoad Neto *et al.*, 2023);

Em meio às inovações tecnológicas, a manutenção preditiva desponta como um diferencial competitivo fundamental para as organizações. A implementação destas tecnologias tem transformado significativamente o perfil das operações industriais, criando novas demandas por profissionais qualificados e adaptados a este novo contexto tecnológico. Esta evolução tecnológica tem revolucionado a forma como as empresas gerenciam seus ativos e planejam suas estratégias de manutenção.

Esta jornada de transformação digital e a crescente complexidade dos sistemas de manutenção preditiva têm criado um desafio significativo para as instituições de ensino técnico e profissionalizante. Segundo Chiavenato (2014) aponta que o modelo tradicional de formação de mantenedores, baseado principalmente em práticas corretivas e preventivas, não atende mais às demandas da Indústria. O novo perfil profissional requerido pelo mercado deve combinar conhecimentos técnicos tradicionais com competências digitais avançadas, incluindo análise de dados, interpretação de sensores e compreensão de sistemas integrados.

Diante deste cenário, torna-se fundamental analisar e compreender as competências necessárias para a formação de profissionais de manutenção alinhados às demandas da Indústria. A adequação dos programas de formação às novas tecnologias preditivas não é apenas uma necessidade técnica, mas uma questão estratégica para a sustentabilidade das operações industriais.

Diante do contexto apresentado, este trabalho tem como objetivo geral analisar as competências (conhecimentos, habilidades e atitudes) necessárias para a formação de profissionais de manutenção no contexto da manutenção preditiva na Indústria, visando

contribuir para o aprimoramento dos programas de formação técnica na área.

Para alcançar este objetivo geral, propõe-se analisar e identificar as principais tecnologias e práticas da manutenção preditiva no contexto da Indústria; mapear as competências requeridas dos profissionais de manutenção para atuar com tecnologias preditivas; analisar a lacuna existente entre a formação técnica atual e as demandas do mercado em relação às competências em manutenção preditiva; propor diretrizes para o desenvolvimento dessas competências na formação técnica, alinhadas às metodologias de educação profissional, como a MSEP – Metodologia SENAI de Educação Profissional, e às necessidades identificadas na literatura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evolução da Manutenção Industrial e o Contexto da Indústria 4.0

2.1.1 Contextualização histórica da manutenção industrial

A manutenção industrial desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e operação das indústrias ao longo da história. Sua evolução está intimamente ligada às mudanças tecnológicas e às necessidades crescentes de aumentar a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos em ambientes produtivos. Desde os primórdios da Revolução Industrial até a era da Indústria 4.0, a manutenção passou por várias fases, adaptando-se às novas demandas e incorporando tecnologias cada vez mais avançadas.

Primeira Fase: Manutenção Corretiva. Durante o início da Revolução Industrial (final do século XVIII e início do século XIX), a manutenção era, predominantemente, corretiva. Nesse período, a maioria das indústrias operava sob a filosofia de "consertar quando quebrar", ou seja, as máquinas só eram reparadas após falhas completas ou avarias que comprometiam a produção. A abordagem reativa era uma prática comum, pois a complexidade das máquinas ainda era relativamente baixa, e a disponibilidade imediata de peças e mão de obra especializada não era um problema crítico. Nesse contexto, os custos de falhas eram menos previsíveis, e as interrupções nas linhas de produção eram consideradas parte normal do processo industrial. Como consequência, não havia um planejamento eficaz para a manutenção, e o foco estava voltado principalmente para a maximização do uso dos equipamentos até o limite de sua vida útil (Araujo; Rossato, 2002; Antonioli, 1999).

Segunda Fase: Manutenção Preventiva. Com o avanço das máquinas e o crescimento das indústrias no início do século XX, começou a surgir a necessidade de minimizar o tempo de inatividade e os custos associados às falhas imprevistas. Foi nesse momento que a manutenção preventiva começou a ganhar destaque. Na década de 1950, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, a manutenção passou a ser planejada com o objetivo de evitar falhas, programando intervenções periódicas para inspecionar e reparar máquinas e equipamentos, mesmo que ainda não houvesse sinais claros de falha. A manutenção preventiva tinha como premissa realizar manutenções regulares com base no tempo de uso do equipamento ou no número de ciclos de operação. Isso gerou benefícios, como a redução de paradas não programadas e o aumento da disponibilidade dos equipamentos. Contudo, também acarretou superdimensionamento das intervenções, ou seja, em muitos casos, equipamentos que estavam em boas condições eram submetidos a manutenção, o que gerava

custos adicionais (Antoniolli, 1999). Essa fase também marcou o início da gestão da manutenção como uma função importante dentro das empresas, destacando a necessidade de profissionais especializados em planejar e coordenar as atividades de manutenção.

Terceira Fase: Manutenção Preditiva. A partir da década de 1960, com o avanço da eletrônica e da tecnologia da informação, as práticas de manutenção começaram a se tornar mais sofisticadas, permitindo o surgimento da manutenção preditiva. Essa metodologia é baseada na utilização de monitoramento contínuo e análise de dados para prever quando um equipamento está prestes a falhar, permitindo que a manutenção seja realizada no momento ideal. A manutenção preditiva se destaca pelo uso de tecnologias como: Análise de vibrações, utilizada para detectar o desgaste de componentes mecânicos; Termografia, que identifica variações anormais de temperatura em equipamentos elétricos e mecânicos; Análise de lubrificantes, que monitora o estado do óleo para detectar partículas que indicam desgaste interno.

A manutenção preditiva proporcionou uma mudança de paradigma ao permitir que as intervenções fossem realizadas apenas quando necessário, com base em condições reais de operação, e não de forma periódica e arbitrária, como na manutenção preventiva (Antoniolli, 1999). Isso reduziu os custos associados à manutenção excessiva e aumentou a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

Quarta Fase: Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM). Nos anos 1980, a crescente complexidade dos sistemas industriais e a exigência por maior eficiência operacional impulsionaram o desenvolvimento de uma abordagem mais sistemática para a gestão da manutenção: a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM, do inglês *Reliability-Centered Maintenance*). Essa metodologia foi amplamente aplicada pela indústria aeronáutica e, posteriormente, por outros setores, como o petrolífero e a manufatura (Trojan; Marçal; Baran, 2013).

O RCM foca em entender a função de cada componente, identificar as falhas potenciais e suas consequências, e definir a estratégia de manutenção mais apropriada para cada situação. Com base nesse conceito, diferentes abordagens de manutenção (corretiva, preventiva e preditiva) podem ser combinadas, dependendo do nível de criticidade de cada equipamento.

Quinta Fase: Manutenção na Era da Indústria 4.0. A chegada da Indústria 4.0, impulsionada pela digitalização e a Internet das Coisas (*IoT*), trouxe uma nova revolução para a gestão da manutenção. A manutenção preditiva evoluiu para incluir análise de dados em tempo real e o uso de inteligência artificial para prever falhas com base em grandes volumes de dados (*BIG DATA*). Sensores inteligentes agora monitoram constantemente o desempenho dos equipamentos e enviam essas informações para sistemas centralizados que processam os dados e emitem alertas de possíveis falhas antes que elas ocorram.

Essa nova fase da manutenção industrial é caracterizada pela capacidade de coletar dados de milhares de dispositivos em tempo real, permitindo uma tomada de decisão baseada em dados altamente precisos. As ferramentas de machine learning e algoritmos preditivos analisam padrões e tendências de operação que os engenheiros humanos poderiam não detectar facilmente, tornando a manutenção preditiva ainda mais eficiente e precisa (Kodama, 2019).

A manutenção industrial passou por diversas fases de evolução, desde uma abordagem corretiva, reativa e sem planejamento, até a adoção de estratégias sofisticadas de manutenção preditiva centrada em confiabilidade, culminando na integração de tecnologias

avançadas da Indústria 4.0. Cada etapa dessa evolução foi impulsionada pela necessidade de aumentar a confiabilidade e reduzir os custos operacionais, ao mesmo tempo em que melhorava a segurança e a eficiência dos sistemas industriais.

A história da manutenção reflete, assim, a busca contínua por otimização e inovação, à medida que as indústrias se adaptam às exigências de um mercado cada vez mais competitivo e tecnológico. Hoje, a manutenção preditiva, em conjunto com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0, representa o futuro da gestão da manutenção, com uma ênfase crescente em previsibilidade e automação.

2.1.2 O Surgimento e a Evolução da Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva surgiu como resposta à necessidade de reduzir as falhas inesperadas e otimizar a confiabilidade dos sistemas industriais. Baseada na coleta e análise de dados operacionais, essa metodologia permite prever quando uma falha pode ocorrer, possibilitando intervenções planejadas antes da paralisação do equipamento (Antoniolli, 1999).

O desenvolvimento da manutenção preditiva foi viabilizado pelo avanço das tecnologias de monitoramento de condição (*Condition Monitoring*), como:

A análise de vibrações que é uma técnica amplamente usada na manutenção preditiva para monitorar as condições dos componentes mecânicos de máquinas, como rolamentos, eixos e engrenagens. O princípio da análise de vibrações baseia-se na detecção de padrões de vibração que indicam anomalias no funcionamento das máquinas. Em condições normais, os componentes emitem vibrações em frequências regulares; no entanto, quando há desgastes ou desalinhamentos, essas vibrações tornam-se irregulares, sinalizando um problema iminente (Antoniolli, 1999).

A análise de óleo e a ferrografia são técnicas críticas para monitorar o estado de componentes mecânicos, avaliando a condição do óleo lubrificante usado nas máquinas. A análise monitora a presença de partículas metálicas no óleo, que são liberadas quando há desgaste interno em rolamentos, eixos e engrenagens. O aumento no número ou no tamanho dessas partículas é um indicativo de falha iminente nos componentes (Nepomuceno, 2014). A análise de óleo envolve a coleta de amostras do óleo lubrificante dos equipamentos em intervalos regulares e sua análise laboratorial.

As técnicas de análise de vibrações, termografia infravermelha, análise de óleo e ferrografia, são essenciais para garantir o sucesso da manutenção preditiva. Elas permitem o monitoramento contínuo e preciso de equipamentos, antecipando falhas e melhorando a eficiência operacional das indústrias.

2.1.3 Desafios na Implementação da Manutenção Preditiva

A adoção da manutenção preditiva traz inúmeros benefícios para as empresas, tais como, redução de custos de manutenção. A identificação precoce de falhas permite a realização de reparos menores, evitando danos maiores e reduzindo custos operacionais. Aumentando a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, permitindo programar a manutenção em horários não críticos, minimizado o tempo de inatividade e aumentando a produtividade. Com isso os equipamentos permanecem em boas condições por mais tempo,

retardando a necessidade de substituição e aumentando a vida útil dos equipamentos (Araujo, 2002; Antonioli, 1999).

Embora a manutenção preditiva ofereça inúmeros benefícios, sua implementação enfrenta alguns desafios:

- a) Investimentos iniciais elevados: A implementação de sensores, sistemas de monitoramento e software de análise requer investimentos substanciais.
- b) Mudança cultural: A equipe de manutenção, muitas vezes acostumada ao modelo corretivo, pode resistir à adoção de novas tecnologias e abordagens proativas.
- c) Necessidade de expertise: A interpretação dos dados preditivos exige conhecimento especializado, o que reforça a importância de programas de formação contínua.

A transição das práticas corretivas para as preditivas representa uma evolução essencial na gestão da manutenção industrial. Empresas que adotam a manutenção preditiva se beneficiam de aumento na confiabilidade dos equipamentos, redução de custos e maior segurança operacional. No entanto, essa transição exige investimentos tecnológicos e a capacitação de profissionais para interpretar e agir com base nos dados gerados. À medida que a Indústria 4.0 avança, o papel da manutenção preditiva se torna cada vez mais estratégico, abrindo novas oportunidades para inovação e eficiência operacional (Kodama, 2019; Aoad Neto *et al.*, 2023; Almeida, 2011).

2.1.4 Impacto da Indústria 4.0 na Manutenção

A Indústria 4.0 traz consigo a manutenção preditiva como um dos principais avanços, que utiliza dados em tempo real e modelos preditivos para prever falhas antes que elas ocorram, minimizando o tempo de inatividade não planejado. Essa transformação tecnológica não apenas está alterando profundamente a forma como os produtos são fabricados e distribuídos, mas também está tendo um impacto significativo nas estratégias de manutenção industrial. O conceito de manutenção, tradicionalmente visto como uma atividade corretiva ou preventiva, evoluiu com a Indústria 4.0 para um modelo mais proativo e orientado por dados, baseado em previsões e decisões automatizadas (Araujo, 2002). Essa evolução é marcada pela integração de tecnologias digitais avançadas, como:

Internet das Coisas (*IoT*), que permite a conexão de máquinas e equipamentos a redes de sensores que coletam e transmitem dados operacionais em tempo real. Esses dados incluem temperatura, vibração, pressão e consumo de energia, entre outros, que são utilizados para identificar padrões de comportamento anômalo nos equipamentos. Essa conectividade facilita o monitoramento contínuo das condições operacionais e permite que as empresas realizem manutenção preditiva de maneira eficiente (Aoad Neto *et al.*, 2023; Achouch, 2022).

Big Data e Análise de Dados, a capacidade de coletar grandes volumes de dados, provenientes de sensores e dispositivos conectados, possibilita a utilização de *Big Data* para a análise detalhada do desempenho dos equipamentos. Algoritmos de machine learning e inteligência artificial (IA) são aplicados a esses dados para identificar padrões e prever falhas futuras. Com o *Big Data*, as empresas conseguem não apenas prever quando os equipamentos

falharão, mas também entender as causas subjacentes dessas falhas (Aoad Neto *et al.*, 2023; Achouch, 2022).

Inteligência Artificial (IA), desempenha um papel central na análise dos dados coletados, utilizando algoritmos de aprendizado automático para melhorar continuamente a capacidade preditiva dos sistemas de manutenção. Através de modelos baseados em dados históricos e em tempo real, a IA pode identificar anomalias que indicam falhas iminentes e recomendar ações de manutenção antes que os problemas se agravem (Achouch, 2022).

Gêmeos Digitais (*Digital Twins*), são representações virtuais detalhadas de ativos físicos, criadas a partir de dados coletados em tempo real. Eles permitem simular o comportamento dos equipamentos, prever falhas e testar intervenções de manutenção sem interromper o equipamento físico. Com gêmeos digitais, as equipes de manutenção podem identificar com maior precisão as áreas que necessitam de intervenção, melhorando a eficiência e a eficácia das ações de manutenção (Wahab, 2024).

À medida que a Indústria 4.0 continua a evoluir, o impacto sobre a manutenção deve se intensificar, com tecnologias cada vez mais avançadas. Tendências como o aprendizado profundo (*deep learning*) e a manutenção autônoma, onde sistemas de IA podem tomar decisões e executar intervenções de manutenção automaticamente, estão emergindo como o próximo passo na evolução da manutenção preditiva. Essas inovações continuarão a aumentar a precisão e a eficiência das práticas de manutenção, minimizando ainda mais o tempo de inatividade e maximizando o retorno sobre os ativos (Kodama, 2019).

A Indústria 4.0 trouxe uma transformação significativa nas práticas de manutenção industrial, permitindo que as empresas passem de um modelo reativo ou preventivo para um modelo preditivo e orientado por dados. Esses avanços permitem não só a redução de custos operacionais e aumento da vida útil dos equipamentos, mas também uma abordagem mais eficiente, segura e confiável. Embora a implementação dessas tecnologias enfrente desafios como altos investimentos e a necessidade de capacitação, os benefícios potenciais tornam a transição para a manutenção 4.0 uma prioridade estratégica para as empresas que buscam melhorar sua competitividade no mercado global.

2.2 Competências Necessárias para Profissionais de Manutenção Preditiva

Além das competências técnicas, citada anteriormente, os profissionais de manutenção preditiva devem possuir um conjunto de competências comportamentais que são igualmente essenciais para o sucesso na gestão de equipamentos e sistemas industriais. Essas competências garantem que os profissionais possam lidar com desafios dinâmicos e interdisciplinares, colaborando de forma eficiente em um ambiente de trabalho altamente técnico e em constante evolução. Entre as competências mais importantes estão a resolução de problemas complexos, a comunicação eficaz, o trabalho em equipe, a capacidade de adaptação e a gestão do tempo (SENAI, 2019). A combinação dessas competências comportamentais com o domínio das técnicas de manutenção preditiva é o que distingue os profissionais de alto desempenho no setor industrial moderno.

2.2.1 Resolução de Problemas Complexos

A competência de resolução de problemas complexos é fundamental para profissionais de manutenção preditiva, uma vez que os sistemas industriais modernos são



compostos de máquinas, equipamentos e tecnologias interconectadas. Esses sistemas geram grandes volumes de dados e, frequentemente, as falhas podem ser resultado de múltiplas causas que requerem uma análise cuidadosa e uma abordagem sistemática para serem solucionadas. De acordo com Chiavenato (2014), a resolução de problemas complexos é a capacidade de identificar, compreender e encontrar soluções eficazes para problemas multifacetados que exigem o uso de várias disciplinas e abordagens. Na manutenção preditiva, essa competência envolve a capacidade de analisar dados de diferentes fontes, ou seja, a resolução de problemas complexos vai além da simples identificação de uma falha, envolve a capacidade de pensamento crítico, diagnóstico eficaz e tomada de decisão rápida. Além disso esses profissionais necessitam ter a habilidade de questionar padrões, identificar relações entre diferentes variáveis e construir hipóteses que expliquem o comportamento dos sistemas. Em ambientes industriais, os problemas precisam ser resolvidos rapidamente para evitar paradas não planejadas.

2.2.2 Comunicação Eficaz

A comunicação eficaz é outra competência essencial para profissionais de manutenção preditiva. Isso envolve a capacidade de transmitir informações complexas de maneira clara e concisa, tanto em relatórios técnicos quanto em reuniões com outros membros da equipe de manutenção, engenheiros e gestores.

A manutenção preditiva exige colaboração entre várias disciplinas, como engenharia elétrica, mecânica, automação e análise de dados. Profissionais de manutenção precisam comunicar suas descobertas de forma que todos compreendam o impacto de uma falha potencial e as ações necessárias para evitar interrupções na produção. Além disso, a comunicação eficaz é vital para garantir que as recomendações de manutenção sejam implementadas corretamente (Chiavenato, 2014).

2.2.3 Trabalho em Equipe

A capacidade de trabalho em equipe é fundamental em ambientes de manutenção preditiva, onde a colaboração entre diferentes áreas é necessária para garantir que os ativos industriais operem de forma eficiente. Equipes de manutenção trabalham com engenheiros, operadores de máquinas e gestores, o que exige uma abordagem colaborativa para identificar problemas e implementar soluções. Como a manutenção preditiva envolve a interação de várias disciplinas, os profissionais devem ser capazes de trabalhar em equipes multidisciplinares, trocando informações e expertise para resolver problemas complexos (Maldaner, 2021).

2.2.4 Capacidade de Adaptação

A capacidade de adaptação é uma competência comportamental crucial em um ambiente industrial que está em constante evolução, especialmente com o avanço das tecnologias da Indústria 4.0. As ferramentas de manutenção preditiva, como sensores *IoT*, *Big Data* e inteligência artificial, estão em constante desenvolvimento, exigindo que os profissionais se adaptem rapidamente a novas tecnologias e métodos de trabalho.



Profissionais de manutenção preditiva precisam estar abertos ao aprendizado contínuo, atualizando-se regularmente com as novas tecnologias e metodologias (Kodama, 2019).

2.2.5 Gestão do Tempo

A gestão do tempo é uma competência essencial para profissionais de manutenção preditiva, pois muitas vezes é necessário priorizar e programar atividades de manutenção de acordo com o impacto que terão na operação da fábrica. O planejamento adequado das intervenções preventivas e corretivas, aliado à otimização dos recursos, é vital para reduzir o tempo de inatividade e maximizar a disponibilidade dos equipamentos. Os profissionais precisam ter a capacidade de planejar e priorizar as tarefas de acordo com a criticidade dos ativos e as restrições operacionais. Manter um equilíbrio entre as atividades preventivas, corretivas e de otimização do sistema é crucial para evitar interrupções no processo produtivo e reduzir custos (Antoniolli, 1999).

2.3 Metodologia SENAI de Educação Profissional (MSEP)

A Metodologia SENAI de Educação Profissional (MSEP) é um modelo de ensino voltado para a formação de profissionais qualificados para o mercado de trabalho, com ênfase na integração de conhecimento teórico e prático. Esta metodologia segue os princípios de aprendizagem ativa, desenvolvimento de competências e articulação com o setor produtivo, aspectos essenciais para preparar profissionais capazes de enfrentar os desafios do mundo do trabalho. No contexto da manutenção preditiva, a MSEP proporciona uma formação que atende às exigências da Indústria 4.0, desenvolvendo competências técnicas e comportamentais essenciais para tornar os profissionais prontos para atuar em ambientes industriais modernos.

2.3.1 Fundamentos e Princípios

A Metodologia SENAI de Educação Profissional é estruturada com base em três fundamentos principais: aprendizagem centrada no aluno, desenvolvimento por competências e contextualização com o mercado de trabalho. Esses princípios buscam garantir que o processo educacional esteja diretamente conectado às demandas reais da indústria, proporcionando aos alunos uma experiência educacional prática e relevante.

Um dos principais pilares da MSEP é a aprendizagem centrada no aluno, na qual o estudante assume um papel ativo no processo de aquisição de conhecimento. O aluno é desafiado a resolver problemas reais, tomar decisões e atuar em atividades que simulem o ambiente de trabalho. O professor, nesse contexto, atua como facilitador, orientando o aluno no desenvolvimento de habilidades práticas e na aplicação do conhecimento teórico em situações cotidianas do setor industrial. Essa abordagem garante que o aluno tenha maior autonomia, responsabilidade e engajamento no processo de aprendizado, características essenciais para atuar em áreas técnicas como a manutenção preditiva, que exigem um pensamento crítico e resolução de problemas complexos.

O outro princípio fundamental da MSEP é o desenvolvimento por competências, ou seja, a formação é focada em garantir que os alunos adquiram as habilidades, conhecimentos e atitudes necessárias para desempenhar suas funções de maneira eficaz no mercado de

trabalho. A ênfase não está apenas na absorção de conteúdo teórico, mas também na aplicação prática e na integração de conhecimentos técnicos e comportamentais. Isso é crucial na formação de profissionais de manutenção preditiva, que precisam dominar não apenas os conceitos, mas também as ferramentas e tecnologias utilizadas no campo.

A MSEP enfatiza uma forte articulação com o setor produtivo, garantindo que o conteúdo educacional esteja sempre atualizado e alinhado com as demandas reais das indústrias. Para isso, o SENAI estabelece parcerias com empresas e realiza uma avaliação contínua das necessidades do mercado de trabalho. Dessa forma, o currículo educacional é constantemente revisado e adaptado para garantir que os formandos estejam prontos para enfrentar os desafios do ambiente industrial.

A Metodologia SENAI de Educação Profissional (MSEP), com seu foco no desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais, é especialmente adequada para a formação de profissionais. Ao integrar teoria e prática, a MSEP prepara os alunos para enfrentar os desafios da Indústria 4.0. Ao promover a aprendizagem ativa e a contextualização com o mercado de trabalho, a metodologia SENAI garante que os profissionais formados estejam prontos para atuar de forma eficaz em um ambiente industrial em constante evolução (SENAI, 2019).

2.4 Metodologias de Ensino com Abordagens Pedagógicas Modernas

A educação técnica requer abordagens pedagógicas inovadoras, que alinhem teoria e prática para preparar profissionais capazes de atuar em ambientes industriais complexos e tecnologicamente avançados. A formação tradicional, baseada em aulas expositivas e exercícios teóricos, já não é suficiente para atender às demandas atuais. Nesse contexto, as metodologias ativas de ensino surgem como alternativas para promover o desenvolvimento de competências críticas, como a resolução de problemas, o pensamento crítico, a colaboração e a capacidade de aplicar o conhecimento adquirido de maneira prática. Entre as principais abordagens pedagógicas modernas, destacam-se a Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL), a Aprendizagem por Projetos e o Ensino Dual (SENAI, 2019).

As metodologias de ensino ativas, desempenham um papel fundamental na formação de profissionais. Essas abordagens pedagógicas modernas alinham o aprendizado teórico com a prática real, preparando os alunos para lidar com os desafios complexos da formação. Além disso, essas metodologias promovem o desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais, que são essenciais para o sucesso na área de manutenção preditiva. Ao adotar essas abordagens, as instituições de ensino técnico garantem que os profissionais formados estejam prontos para enfrentar os desafios dinâmicos do ambiente industrial moderno.

2.4.1. Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL)

A Aprendizagem Baseada em Problemas (*Problem-Based Learning - PBL*) é uma metodologia educacional que coloca o aluno no centro do processo de aprendizagem, desafiando-o a resolver problemas reais ou simulados que refletem situações enfrentadas no mercado de trabalho. No contexto da manutenção preditiva, essa abordagem é particularmente eficaz, pois permite que os alunos lidem com problemas técnicos e

operacionais complexos, utilizando as ferramentas e técnicas da manutenção preditiva para encontrar soluções práticas e viáveis (Bromberger, 2024).

No PBL, os alunos são apresentados a um problema sem que, inicialmente, tenham todas as informações ou conhecimentos necessários para resolvê-lo. Isso os estimula a pesquisar, discutir e colaborar com colegas e professores para adquirir e aplicar o conhecimento. Na aprendizagem de manutenção preditiva, os problemas podem envolver:

- a) Diagnóstico de falhas em sistemas de equipamentos rotativos utilizando dados de vibração, termografia ou análise de óleo.
- b) Interpretação de padrões de falhas a partir de dados coletados de sensores IoT e sistemas de monitoramento em tempo real.
- c) Planejamento de intervenções de manutenção preditiva, equilibrando os custos operacionais e a disponibilidade dos equipamentos.

O papel do professor na PBL é atuar como facilitador, guiando os alunos no processo de pesquisa e resolução de problemas, ao invés de simplesmente transmitir conteúdo. Essa abordagem desenvolve a autonomia, iniciativa e capacidade de resolução de problemas complexos, competências comportamentais essenciais na área de manutenção preditiva (Chiavenato, 2014). Essa metodologia é eficaz para o ensino de manutenção preditiva porque o diagnóstico de falhas e a tomada de decisão rápida são processos que envolvem a capacidade de lidar com múltiplas variáveis e encontrar soluções mesmo com informações incompletas ou incertas. A PBL prepara os profissionais para esses desafios ao replicar a complexidade do ambiente industrial.

2.4.2 Aprendizagem por Projetos

A Aprendizagem por Projetos (*Project-Based Learning*) é uma metodologia que se concentra no aprendizado por meio da execução de projetos práticos. Os alunos são desafiados a trabalhar em um projeto que tenha relevância prática e aplicação no mundo real, e a aprendizagem ocorre conforme eles avançam no projeto (SENAI, 2019). Esse método é particularmente útil no ensino de manutenção preditiva, pois permite que os alunos apliquem os conceitos teóricos aprendidos em sala de aula diretamente em um contexto prático. Na aprendizagem por projetos, os alunos trabalham em grupos para projetar, implementar e avaliar soluções para problemas específicos. Isso pode envolver:

- a) Desenvolvimento de um plano de manutenção preditiva para um sistema industrial complexo, considerando fatores como análise de falhas, coleta de dados de sensores e interpretação de resultados de monitoramento.
- b) Implementação de uma solução de monitoramento em tempo real, utilizando sensores de IoT para coletar dados sobre o desempenho de máquinas em um ambiente simulado.
- c) Integração de tecnologias da Indústria 4.0, como *Big Data* e Inteligência Artificial, para prever falhas com base na análise de grandes volumes de dados coletados por sistemas de monitoramento.

No ensino técnico voltado para a manutenção preditiva, a aprendizagem por projetos pode ser aplicada na construção de um projeto de diagnóstico de falhas para um equipamento crítico em uma fábrica. O projeto pode envolver a instalação de sensores, a coleta e análise de dados de vibração e a apresentação de um relatório técnico detalhando os resultados e as

soluções propostas. Essa estratégia é ideal para preparar os alunos para o ambiente de trabalho, pois reflete diretamente as práticas que eles enfrentarão no campo.

2.4.3. Ensino Dual (Teoria e Prática)

O Ensino Dual é uma metodologia que alterna entre momentos de aprendizagem teórica em sala de aula e prática no ambiente de trabalho, combinando o melhor dos dois mundos. Muito utilizado em países como a Alemanha, onde o sistema educacional técnico é amplamente baseado nessa metodologia, o ensino dual garante que os alunos recebam uma formação equilibrada e aplicável.

No ensino dual, os alunos passam parte do tempo em um ambiente de aprendizado teórico e outra parte em empresas, aplicando diretamente o que aprenderam. No contexto da manutenção preditiva, isso significa que os alunos podem aprender conceitos teóricos como análise de vibração, termografia e monitoramento de condição em sala de aula e aplicar esses conceitos em empresas parceiras, utilizando sistemas de monitoramento de equipamentos em ambientes industriais reais.

Essa metodologia garante que os alunos não apenas aprendam a teoria da manutenção preditiva, mas também se familiarizem com os desafios e soluções que surgem na prática. Além disso, o ensino dual promove a capacidade de adaptação dos alunos a diferentes ambientes de trabalho e tecnologias.

No ensino técnico, o ensino dual pode ser implementado através de parcerias com indústrias que utilizam tecnologias de monitoramento preditivo. Os alunos passam parte do tempo aprendendo em laboratórios e simuladores, e o restante trabalhando em ambientes reais, utilizando as tecnologias e ferramentas que monitoram as condições dos equipamentos. Isso inclui a instalação e calibração de sensores, a análise de dados coletados e a elaboração de relatórios sobre o desempenho dos equipamentos.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Pesquisa como Revisão Bibliográfica

A metodologia escolhida para esta pesquisa é a revisão bibliográfica, que consiste em um levantamento de materiais publicados sobre o tema em questão. A revisão bibliográfica permite uma análise crítica e aprofundada do estado da arte, identificando as principais contribuições teóricas e práticas de autores renomados sobre a manutenção preditiva, o impacto das tecnologias da Indústria 4.0 e as competências necessárias para os profissionais dessa área. A revisão bibliográfica é amplamente utilizada em estudos que buscam consolidar o conhecimento existente e fornecer uma visão abrangente sobre determinado campo de estudo (Zambello, 2018).

Neste contexto, a revisão bibliográfica é apropriada, pois o estudo visa sintetizar as informações sobre as principais técnicas utilizadas na manutenção preditiva – como análise de vibrações, termografia e análise de óleo – e suas aplicações no ambiente da Indústria 4.0. A revisão também explora as competências técnicas e comportamentais necessárias para a formação de profissionais da área, abordando a educação técnica e as metodologias de ensino mais eficazes para capacitar esses profissionais.



3.2 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos adotados na revisão bibliográfica seguiram uma estratégia de busca estruturada em diferentes bases de dados acadêmicas, além de fontes especializadas na área de manutenção industrial e tecnologias emergentes. Essa abordagem foi escolhida para garantir a abrangência e qualidade das fontes utilizadas, focando em publicações que abordam a evolução das tecnologias de manutenção preditiva e os desafios da formação de novos profissionais. Os critérios para a seleção das fontes incluem:

1. Publicações de relevância acadêmica e científica;
2. Estudos que tratem da aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 na manutenção preditiva, como o uso de sensores inteligentes, IoT, e Big Data para monitoramento em tempo real e previsão de falhas.
3. Fontes que discutem as competências técnicas e comportamentais para profissionais de manutenção, com ênfase nas exigências da Indústria 4.0.

3.3 Critérios de Seleção das Fontes

A revisão bibliográfica foi organizada com base em uma estratégia de busca estruturada, a fim de garantir maior rigor científico, transparência e reprodutibilidade. A pesquisa concentrou-se nos seguintes constructos teóricos centrais: Competências técnicas, como análise de vibrações, termografia e análise de óleo; Competências comportamentais, como resolução de problemas complexos, adaptabilidade e comunicação; Tecnologias habilitadoras da manutenção preditiva, como Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial; e Práticas pedagógicas voltadas à formação técnica, como metodologias ativas e ensino dual.

As bases de dados utilizadas para levantamento do material foram: Google Scholar, Periódicos CAPES, SciELO, Scopus e repositórios institucionais de universidades brasileiras e documentos técnicos do SENAI, da ABRAMAN e da ABNT e a Lei da Aprendizagem (Lei nº 10.097).

Foram utilizados os seguintes descritores de busca (palavras-chave), individualmente ou combinados: *predictive maintenance*; *maintenance 4.0*; *technical and behavioral competencies*; *vocational education and Industry 4.0*; manutenção preditiva; educação profissional e tecnológica; formação de mantenedores; metodologias ativas no ensino técnico.

Aplicaram-se os seguintes critérios de inclusão: publicações entre 2010 e 2024 (com exceção de autores clássicos), textos em português e inglês, dissertações, teses e documentos institucionais com relevância direta para o tema. Foram excluídas fontes opinativas sem fundamentação teórica, artigos sem autoria identificável ou que não abordassem diretamente os constructos definidos.

Os procedimentos de análise seguiram a lógica da análise de conteúdo, com foco na leitura exploratória dos textos, identificação de categorias temáticas e síntese das contribuições mais relevantes. Os resultados foram organizados em três blocos: competências técnicas, competências comportamentais e propostas pedagógicas voltadas à formação de profissionais para a manutenção preditiva na Indústria 4.0.



Limitações do estudo incluem a natureza exclusivamente teórica da investigação, bem como a possível não inclusão de publicações relevantes de acesso restrito ou não indexadas nas bases consultadas.

3.4 Procedimentos de Análise

A análise dos dados coletados seguiu uma abordagem qualitativa, onde o foco está na interpretação e comparação de informações provenientes de diferentes fontes. O procedimento de análise consistiu nas seguintes etapas:

1. Leitura e organização das informações: as fontes foram lidas e categorizadas de acordo com os principais tópicos de interesse da pesquisa (análise de vibrações, termografia, análise de óleo, competências comportamentais, etc.).

2. Síntese dos dados: a partir da categorização, foi realizada uma síntese dos principais conceitos e práticas, destacando as contribuições únicas de cada autor para o campo da manutenção preditiva e da educação profissional.

3. Identificação de lacunas: a análise crítica permitiu identificar áreas em que a literatura ainda é limitada, como a integração das tecnologias da Indústria 4.0 com a formação de competências técnicas para manutenção, propondo novas direções para futuras pesquisas.

Esse método de análise garante uma visão abrangente sobre o tema e proporciona uma base sólida para discutir a evolução das técnicas de manutenção preditiva e a necessidade de formação especializada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo tem como objetivo mapear as competências necessárias para profissionais que atuam com manutenção preditiva, conforme identificado na literatura. Ao final, serão identificadas lacunas no desenvolvimento dessas competências, sugerindo caminhos para alinhar a formação acadêmica com as demandas da Indústria 4.0.

Para garantir a credibilidade e a relevância científica da revisão bibliográfica realizada, foi construído um mapeamento dos materiais analisados com base em sua tipologia e origem. A planilha 01 apresenta uma síntese dos documentos utilizados, classificando-os conforme o tipo (artigo científico, tese/dissertação, livro técnico, documento legal, entre outros) e a base de dados ou repositório em que foram localizados, como Google Scholar, SciELO, CAPES, Scopus e repositórios institucionais. Esta categorização permite evidenciar a diversidade e a confiabilidade das fontes consultadas, reforçando o rigor metodológico da pesquisa e a abrangência temática contemplada.

Tabela 1 - Classificação das referências e bases de dados

| Autores e Ano da publicação | Tipo de Documento | | | | | | Base de dados | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|---|--|-----------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | Artigo científico | Tese Doutorado / Dissertação de | Documento legal | Livro técnico/acadêmico | Documento institucional | Anais de congresso | Livro acadêmico | Scopus, Web of Science, Google Scholar, PeerJ, MDPI | Repositório UNESP, UFSC, UFSM, UFU e USP | Revista Científica Senai-SP | Planalto.gov.br | Edgard Blücher, livrarias técnicas | Portal SENAI-DN, Unidades SENAI | Anais do SBPO |
| WAHAB et al., 2024 | X | | | | | | | X | | | | | | |
| ACHOUCH et al., 2022 | X | | | | | | | X | | | | | | |
| ALMEIDA, 2011 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| ANTONIOLLI, 1999 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| ARAUJO; ROSSATO, 2022 | X | | | | | | | | | X | | | | |
| BRASIL, 2000 | | | X | | | | | | | | X | | | |
| BROMBERGER, 2024 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| CHIAVENATO, 2014 | | | | X | | | | | | | | X | | |
| FREITAS, 2021 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| KODAMA, 2019 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| MALDANER, 2021 | | X | | | | | | | X | | | | | |
| NEPOMUCENO, 2014 | | | | X | | | | | | | | X | | |
| AOAD NETO <i>et al.</i> , 2023 | X | | | | | | | | | X | | | | |
| SENAI, 2019 | | | | | X | | | | | | | | X | |
| TROJAN; MARÇAL; BARAN, 2013 | | | | | | X | | | | | | | | X |
| ZAMBELLO et al., 2018 | | | | | | | X | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Com o intuito de aprofundar a análise crítica dos estudos selecionados, a Tabela 2 organiza as referências bibliográficas segundo quatro elementos fundamentais: autores e ano de publicação, título do trabalho, categoria temática principal e a contribuição específica de cada estudo para a discussão sobre a formação de profissionais em manutenção preditiva. Esta estrutura facilita a visualização das convergências e complementaridades entre os autores, além de evidenciar como cada obra contribui para a consolidação do conhecimento científico no campo da educação profissional alinhada à Indústria 4.0.

Tabela 2 - Categoria Temática e contribuição das referências

| Autores e Ano da publicação | Título | Categoria Temática | | | | | Contribuição |
|-----------------------------|---|---------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|------------|--|
| | | Abordagens Técnicas | Comportamentais | Eduacionais Pedagógicas | Tecnologias Emergentes | Legislação | |
| WAHAB et al., 2024 | Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices | X | | | X | | Otimiza gestão de manutenção (lucro, segurança), previne falhas. Expande PdM/DT para saúde, água, agro. Acadêmico: Recurso, detalha métodos (ML/DL), aponta lacunas e futuro da pesquisa. |
| ACHOUCH et al., 2022 | On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges | X | | | X | | A fonte contribui ao detalhar Manutenção Preditiva (PdM) e tecnologias para eficiência industrial (Trabalho). Serve como referência acadêmica sobre PdM e habilidades necessárias na Indústria 4.0 (Educação). |
| ALMEIDA, 2011 | Redes neurais artificiais aplicadas à manutenção baseada na condição | X | | | X | | Tese aplica RNA à Manutenção Preditiva para detectar falhas em máquinas (Trabalho). E trata os temas IA, CBM, análise de vibração e partículas. |
| ANTONIOLLI, 1999 | Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos | X | | | | | O trabalho contribui ao detalhar técnicas de análise de vibração para detecção de falhas em rolamentos. Além, dos tópicos sobre manutenção preditiva, experimentação e análise. |



| | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|--|
| ARAÚJO; ROSSATO, 2022 | Utilizando Rapidminer para manutenção preditiva | X | | | | | Demonstra o uso de RapidMiner e aprendizado de máquina para predição de falhas em máquinas, contribuindo para otimizar o trabalho. Oferece base para o estudo e formação profissional em manutenção preditiva e IA, essencial na educação para o futuro da indústria. |
| BRASIL, 2000 | Lei nº 10.097, de 19 de dezembro de 2000. Dispõe sobre a contratação de aprendizes e dá outras providências | | | | | X | A Lei regula o contrato de aprendizagem, unindo formação técnico-profissional na educação e a prática no trabalho, com regras de duração e término, moldando a inserção profissional jovem. |
| BROMBERGER, 2024 | Abordagens de machine learning aplicadas à manutenção preditiva industrial para a detecção de falhas | X | | | X | | Aplica ML à Manutenção Preditiva na indústria, otimizando o trabalho. É recurso para Educação em IA, análise de dados e otimização de processos. |
| CHIAVENATO, 2014 | Administração nos novos tempos: os novos horizontes em administração | | X | X | | | O livro de Chiavenato contribui ao trabalho e à formação profissional ao abordar novas tendências administrativas, gestão de pessoas e adaptabilidade, essenciais para educar e preparar para os desafios do mercado. |
| FREITAS, 2021 | A formação profissional na manutenção industrial: uma abordagem sociointeracionista | | | | | | A dissertação usa Vygotsky e estilos de aprendizagem (ILS) para aprimorar a formação em manutenção industrial, preparando melhor o profissional para o trabalho e desafios da indústria moderna, integrando teoria e prática essencial para a carreira. |
| KODAMA, 2019 | Competências para indústria 4.0 no Brasil: um estudo sob a visão sistêmica | X | X | | | | O trabalho de mestrado identifica competências essenciais para o profissional da Indústria 4.0, como TI, dados e interdisciplinaridade, importantes para o trabalho. Discute a lacuna na educação e sugere preparar futuros profissionais com base em engenharia, gestão e tecnologia. |



| | | | | | | | |
|-----------------------------|--|---|---|---|--|--|--|
| MALDANER, 2021 | Transformação na organização do trabalho em empresa que adotaram tecnologias compatíveis com a Indústria 4.0 | X | X | | | | Estuda as transformações no trabalho com tecnologias da Indústria 4.0. Indica a necessidade de novas competências em TI, automação e gestão de dados, essencial para a formação profissional na educação para a indústria. |
| NEPOMUCENO, 2014 | Técnicas de manutenção preditiva | X | | | | | O livro detalha técnicas de manutenção preditiva, aprimorando a formação profissional e o desempenho no trabalho ao otimizar processos industriais e a gestão de ativos. |
| AOAD NETO et., 2023 | O impacto das tecnologias digitais na eficácia da manutenção preditiva industrial | X | X | | | | O artigo utiliza tecnologias como IIoT e ML para predição de falhas na manutenção industrial, otimizando o trabalho. Serve como base para formação profissional, ensinando sobre análise de dados e sistemas da Indústria 4.0 na educação. |
| SENAI, 2019 | Metodologia SENAI de educação profissional | | X | X | | | Baseada nas demandas do trabalho, a MSEP define perfis e competências essenciais para o mercado e Indústria 4.0. Orienta o currículo e a prática pedagógica, formando profissionais alinhados, unindo teoria e prática. |
| TROJAN; MARÇAL; BARAN, 2013 | Classificação dos tipos de manutenção pelo método de análise multicritério ELECTRE TRI | X | | | | | O artigo classifica tipos de manutenção com ELECTRE TRI para padronizar termos e otimizar a gestão no trabalho, servindo como recurso para a formação profissional em métodos de decisão e manutenção. |
| ZAMBELLO et al., 2018 | Metodologia da pesquisa e do trabalho científico | | | X | | | O livro detalha metodologia e escrita científica. Prepara para vida acadêmica e trabalho com análise estruturada e relatórios, unindo educação e atuação profissional. |

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Análise das Competências Necessárias

A manutenção preditiva exige uma combinação de competências técnicas e

comportamentais que permitem ao profissional não apenas dominar as ferramentas e tecnologias, mas também atuar de forma eficaz em ambientes industriais dinâmicos. O conceito de competência envolve não só o conhecimento teórico, mas também a habilidade de aplicar esse conhecimento de maneira prática e eficaz no campo de trabalho.

Ao comparar as competências identificadas na literatura com os currículos atuais dos cursos de formação técnica e profissional em manutenção industrial, observam-se algumas discrepâncias significativas. Enquanto autor como Nepomuceno (1989) reforçam a centralidade das técnicas de análise como vibrações, óleo e termografia, outros autores contemporâneos apontam que as competências necessárias hoje extrapolam os limites técnicos e envolvem habilidades como resolução de problemas complexos, comunicação e trabalho colaborativo. No entanto, SENAI (2019) e Freitas (2021) convergem ao destacar a insuficiência das abordagens pedagógicas tradicionais, apontando a importância de metodologias como Aprendizagem Baseada em Problemas e ensino por projetos.

Nos currículos técnicos oferecidos por instituições como o SENAI, observa-se uma boa cobertura das competências técnicas básicas, como a análise de vibrações e a termografia. No entanto, os avanços recentes em tecnologias da Indústria 4.0 e o uso de sensores inteligentes ainda são abordados de forma incipiente, muitas vezes sem a profundidade necessária para preparar os alunos para lidar com as ferramentas mais modernas utilizadas em ambientes industriais avançados. A integração de IoT, Big Data e inteligência artificial no contexto da manutenção preditiva ainda não está totalmente implementada nos currículos tradicionais, o que pode resultar em uma defasagem na formação de profissionais aptos a atuar em indústrias altamente automatizadas e conectadas.

As competências comportamentais são muitas vezes tratadas de forma superficial nos currículos técnicos, sendo abordadas de maneira transversal, sem a devida ênfase no desenvolvimento de habilidades práticas para resolução de problemas complexos, trabalho em equipe e adaptação rápida a novas tecnologias. De acordo com estudos recentes, muitos currículos ainda se concentram em uma abordagem tradicional de ensino, com foco excessivo na transmissão de conteúdo teórico, sem explorar suficientemente metodologias ativas, como a Aprendizagem Baseada em Problemas (PBL) e a Aprendizagem por Projetos, que são essenciais para o desenvolvimento dessas competências (Freitas, 2021). Além disso, há divergência quanto à preparação comportamental: enquanto alguns autores defendem a transversalidade dessas competências, outros apontam que elas devem ser desenvolvidas de forma deliberada, com métodos específicos para tal. Essa heterogeneidade nas abordagens evidencia a necessidade de sistematização curricular com base em evidências científicas e necessidades reais do setor produtivo.

A aplicação de metodologias ativas no ensino técnico, como a Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL), ainda é escassa, o que compromete o desenvolvimento de habilidades práticas e pensamento crítico. Esses métodos são essenciais para preparar os alunos para os desafios do ambiente industrial contemporâneo, onde a capacidade de aplicar conhecimento em situações reais é cada vez mais valorizada (SENAI, 2019).

A análise das competências necessárias para profissionais de manutenção preditiva evidencia que, embora os currículos técnicos ofereçam uma boa base, há uma lacuna significativa na preparação dos alunos para enfrentar os desafios da Indústria 4.0. As competências técnicas relacionadas ao uso de tecnologias emergentes precisam ser incorporadas de forma mais sólida, enquanto as competências comportamentais, como a resolução de problemas complexos e o trabalho em equipe, devem ser desenvolvidas de

maneira mais estruturada. A incorporação de metodologias de ensino ativas e a atualização contínua dos currículos são essenciais para garantir que os futuros profissionais estejam preparados para atuar com eficácia nesse novo cenário industrial.

4.2 Propostas Metodológicas para Desenvolvimento de Competências

Este capítulo propõe metodologias voltadas para o desenvolvimento de competências necessárias aos profissionais que atuam com manutenção preditiva no contexto da Indústria 4.0. A partir da análise das lacunas identificadas nos currículos atuais, serão discutidas as estratégias de ensino-aprendizagem, os recursos didáticos mais adequados e métodos de avaliação de competências.

4.2.1 Recursos de Ensino-Aprendizagem

Os recursos didáticos utilizados no ensino de manutenção preditiva devem ser compatíveis com as necessidades técnicas da área, além de facilitar o desenvolvimento das competências propostas. A seguir, são destacados alguns recursos que podem ser incorporados aos currículos:

Os simuladores e laboratórios virtuais permitem que os alunos pratiquem o monitoramento de condições de equipamentos e a detecção de falhas em um ambiente controlado e seguro. Esses recursos são extremamente valiosos para o aprendizado de técnicas como análise de vibrações, termografia e análise de óleo, pois permitem que os alunos realizem experimentos e resolvam problemas simulados sem a necessidade de parar equipamentos reais (Almeida, 2011).

Além disso, com o uso de realidade aumentada (RA) e realidade virtual (RV), os alunos podem visualizar o funcionamento interno de máquinas e entender como ocorrem falhas internas, como desgaste de rolamentos e superaquecimento de motores. Esse tipo de recurso imersivo acelera o aprendizado e aumenta o engajamento dos estudantes.

O uso de sensores IoT em ambientes educacionais é fundamental para preparar os alunos para a Indústria 4.0. Sensores conectados a sistemas de Big Data e inteligência artificial permitem que os alunos colem e analisem dados de desempenho em tempo real, identificando padrões e prevendo falhas com base nos dados coletados. Esses sensores podem ser utilizados em laboratórios práticos para monitorar máquinas em funcionamento, como motores, compressores e turbinas, replicando o ambiente industrial real.

No contexto do ensino híbrido ou à distância, ferramentas de colaboração digital são essenciais para garantir que os alunos possam trabalhar juntos em projetos, mesmo que estejam em locais diferentes. Plataformas como Microsoft Teams e Google Class permitem a comunicação em tempo real e o compartilhamento de documentos e dados, facilitando o trabalho em equipe e a resolução de problemas colaborativa.

4.2.2 Avaliação de Competências

A avaliação de competências no ensino de manutenção preditiva deve ir além dos testes teóricos tradicionais, envolvendo também a avaliação de habilidades práticas e comportamentais. As seguintes estratégias são recomendadas para uma avaliação mais eficaz:

A avaliação por desempenho prático permite que os alunos sejam avaliados com base em sua capacidade de aplicar conhecimentos teóricos a situações reais ou simuladas. Isso pode incluir a realização de diagnósticos utilizando sensores de vibração, câmeras térmicas ou a interpretação de dados de análise de óleo. Essa forma de avaliação garante que os alunos desenvolvam não apenas a competência técnica, mas também a capacidade de resolução de problemas em tempo real.

A avaliação baseada em projetos permite que os alunos sejam avaliados pelo desenvolvimento de um projeto de longo prazo, como a implementação de um sistema de manutenção preditiva em uma empresa simulada ou real. Essa abordagem permite que os alunos demonstrem suas habilidades em todas as fases de um projeto, desde a planejamento até a execução e avaliação dos resultados, sendo uma forma de avaliação holística (SENAI, 2019).

A autoavaliação e o feedback contínuo também são ferramentas poderosas para o desenvolvimento de competências. Ao incentivar os alunos a refletirem sobre seu próprio desempenho e identificarem áreas de melhoria, promove-se a autonomia e o aprendizado contínuo. O feedback dado pelos professores deve ser construtivo, apontando tanto os acertos quanto os pontos de melhoria, de forma a orientar o crescimento pessoal e profissional dos alunos.

O desenvolvimento de competências técnicas e comportamentais para profissionais de manutenção preditiva requer uma abordagem metodológica que incorpore estratégias ativas de ensino-aprendizagem, recursos didáticos modernos, e uma avaliação que vá além dos métodos tradicionais. Ao adotar práticas como a Aprendizagem Baseada em Problemas e o Ensino Dual, e ao utilizar recursos como simuladores virtuais e sensores IoT, as instituições de ensino podem preparar melhor os alunos para os desafios da Indústria 4.0. A aplicação dessas metodologias, aliada a uma avaliação focada no desempenho prático, garante que os futuros profissionais estejam aptos a enfrentar as demandas de um ambiente industrial cada vez mais automatizado e conectado.

4.3 Formação de professores e parcerias entre escolas e empresas

A formação de professores e as parcerias entre escolas e empresas são dois pilares fundamentais para garantir a qualidade e a efetividade da educação técnica e profissional, especialmente em áreas tecnológicas como a manutenção preditiva no contexto da Indústria 4.0.

4.3.1 Desafios da Formação Docente no Contexto da Indústria 4.0

A formação de professores para atuar em cursos técnicos voltados à manutenção preditiva enfrenta o desafio de acompanhar a rápida evolução tecnológica, caracterizada pela integração de ferramentas como IoT, Big Data, sensores inteligentes e inteligência artificial. Essas tecnologias não apenas transformam o setor industrial, mas também exigem uma atualização constante dos docentes para que possam ensinar seus alunos a utilizar essas ferramentas de maneira eficiente.

A defasagem entre o que é ensinado e o que o mercado exige está, muitas vezes, relacionada à falta de formação continuada dos professores. O conhecimento técnico, fundamental para cursos de manutenção preditiva, é dinâmico, o que significa que o domínio

de metodologias e tecnologias precisa ser atualizado constantemente. Além disso, muitos professores vêm de uma formação tradicional e têm dificuldades em adaptar-se às metodologias ativas que favorecem o aprendizado prático e a integração com a Indústria 4.0. Além da necessidade de desenvolver não apenas a competência técnica dos docentes, mas também suas competências pedagógicas. O ensino técnico exige que os professores sejam capazes de aplicar metodologias ativas, que coloca os alunos como protagonistas do processo de ensino-aprendizagem (Freitas, 2021).

A solução para os desafios mencionados passa pela criação de programas de formação continuada para professores, garantindo que eles se mantenham atualizados em relação às novas tecnologias e metodologias de ensino. Os programas de capacitação devem incluir:

- a) Cursos de atualização técnica voltados para as ferramentas da Indústria 4.0, como plataformas de Big Data, sensores IoT, e software de análise preditiva.
- b) Workshops pedagógicos para desenvolver competências de gestão de sala de aula, aplicação de metodologias ativas e desenvolvimento de competências comportamentais.
- c) Aulas práticas em ambientes industriais ou visitas técnicas a indústrias que utilizam as tecnologias que serão ensinadas em sala de aula, para garantir que os professores conheçam as exigências reais do mercado.

A imersão dos professores em ambientes industriais é uma forma eficaz de garantir que eles possam transferir o conhecimento técnico para seus alunos de maneira mais aplicada. Além disso, a formação continuada deve ser vista como uma prática constante e não como um evento esporádico, dada a natureza dinâmica da tecnologia.

4.3.2 Parcerias Escola-Empresa

As parcerias entre escolas e empresas representam uma oportunidade estratégica para suprir as demandas do mercado de trabalho e melhorar a formação de profissionais técnicos. No Brasil, a legislação atual, como a Lei da Aprendizagem (Lei 10.097/2000), incentiva a formação de aprendizes em empresas, o que abre espaço para o fortalecimento dessas parcerias.

A Lei da Aprendizagem exige que empresas de médio e grande porte contratem jovens aprendizes em número proporcional ao total de seus empregados, o que representa uma oportunidade significativa para instituições de ensino técnico. Esse sistema de cotas garante que milhares de jovens tenham a oportunidade de aliar o ensino teórico à prática profissional em empresas. Assim, as parcerias podem facilitar a inserção desses alunos em programas de aprendizagem prática, em que eles podem aplicar o que aprendem em sala de aula no ambiente de trabalho (Brasil, 2000).

Além da aprendizagem, os programas de estágio para alunos dos cursos técnicos são outra forma eficaz de fortalecer a integração entre ensino e prática. Empresas que firmam parcerias com escolas técnicas podem oferecer estágios supervisionados, nos quais os alunos têm a chance de aplicar suas habilidades técnicas e comportamentais sob a orientação de profissionais experientes.

Embora as parcerias entre escolas e empresas ofereçam grandes oportunidades, existem também desafios a serem superados. O principal desafio é a falta de engajamento de algumas empresas, que podem não ver as parcerias como estratégicas para seus negócios. Além disso, há desafios relacionados à burocracia e à dificuldade de conciliar as demandas da

escola com as necessidades da empresa.

Para superar esses desafios, é fundamental que as escolas estabeleçam incentivos que tornem as parcerias atraentes para as empresas. Isso pode incluir a criação de programas de treinamento customizados que atendam às necessidades específicas das empresas parceiras, além de oferecer suporte para a seleção e acompanhamento de alunos em programas de estágio e aprendizagem.

5 CONCLUSÃO

A transição para a Indústria 4.0 apresenta desafios e oportunidades sem precedentes para o setor de manutenção preditiva e, conseqüentemente, para as instituições de ensino técnico e profissional. A pesquisa realizada demonstrou a necessidade urgente de adaptação a novas exigências tecnológicas e educacionais. A evolução tecnológica impulsionada pela Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial (IA) e outras ferramentas da Indústria 4.0 está transformando as práticas industriais, exigindo que os profissionais desenvolvam não apenas competências técnicas avançadas, mas também um conjunto de habilidades comportamentais e analíticas para atuar de forma eficiente nesse novo cenário.

Os achados deste estudo mostram que, para formar profissionais adequados às novas demandas do mercado, é essencial que as instituições de ensino atualizem seus currículos, metodologias de ensino e infraestrutura.

No entanto, a pesquisa também revelou que a adaptação à Indústria 4.0 não é isenta de desafios. A modernização da infraestrutura educacional requer investimentos financeiros consideráveis, o que muitas vezes pode ser uma barreira para as instituições de ensino. Da mesma forma, a rápida evolução tecnológica impõe uma pressão constante para que os currículos e as metodologias de ensino sejam revisados e atualizados regularmente. Superar essas barreiras exige um esforço conjunto entre instituições de ensino, governo e setor privado, com políticas públicas que incentivem a inovação educacional e promovam o desenvolvimento de competências digitais.

Portanto, para que as instituições de ensino técnico possam se posicionar à frente dessa revolução tecnológica, é necessário que implementem estratégias robustas de modernização, que integrem tecnologia, inovação pedagógica e colaboração com o setor produtivo. Isso não apenas melhorará a qualidade do ensino, mas também preparará os profissionais da manutenção para os desafios e oportunidades da Indústria 4.0, garantindo sua inserção em um mercado de trabalho em constante transformação.

A partir das análises e recomendações aqui propostas, espera-se que futuras pesquisas possam expandir o conhecimento sobre a formação de profissionais na era digital e contribuir para o desenvolvimento de novas práticas educacionais que promovam uma integração eficaz entre teoria e prática, tecnologia e educação, e entre as necessidades do mercado e as expectativas dos estudantes.



REFERÊNCIAS

- ACHOUCH, M. *et al.* On predictive maintenance in Industry 4.0: overview, models, and challenges. **Applied Sciences**, v. 12, n. 8081, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8081>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ALMEIDA, L. F. **Redes neurais artificiais aplicadas à manutenção baseada na condição**. 2011. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/105346>. Acesso em: 05 jun. 2024.
- ANTONIOLLI, E. B. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos**. 1999. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81086> . Acesso em 05 jun. 2024.
- AOAD NETO, E.; AMICI, T., T.; CAMUSSO, D.; BRUNO, D. O. T. O impacto das tecnologias digitais na eficácia da manutenção preditiva industrial. **Revista Científica SENAI-SP - Educação, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 2, p. 59–83, 2023. Disponível em: <https://periodicos.sp.senai.br/index.php/rcsenaisp/article/view/26> . Acesso em: 08 mai. 2025.
- ARAUJO, T. S.; ROSSATO, D. B. Utilizando Rapidminer para manutenção preditiva. **Revista Científica Senai-SP – Tecnologia, Inovação & Educação**, São Paulo, SP, v. 1, n. 1, p.37-53, 2022. Disponível em: <https://periodicos.sp.senai.br/index.php/rcsenaisp/article/view/4> . Acesso em: 11 jun. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 10.097, de 19 de dezembro de 2000**. Dispõe sobre a contratação de aprendizes e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 20 dez. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l10097.htm . Acesso em: 11 jun. 2024.
- BROMBERGER, D. A. **Abordagens de machine learning aplicadas à manutenção preditiva industrial para a detecção de falhas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/31838>. Acesso em: 11 jun. 2024.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Administração nos novos tempos**: os novos horizontes em administração. 3. ed. Barueri, SP: Manole, 2014.
- FREITAS, C. A. **A formação profissional na manutenção industrial: uma abordagem sociointeracionista**. 2021. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/204324>. Acesso em: 11 jun. 2024.

KODAMA, B. S. **Competências para indústria 4.0 no Brasil: um estudo sob a visão sistêmica.** 2019. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25430>. Acesso em: 08 abr. 2024.

MALDANER, D. **Transformação na organização do trabalho em empresas que adotaram tecnologias compatíveis com a Indústria 4.0.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/tde-17092021-103032/> . Acesso em: 11 jun. 2024

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva.** São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI. **Metodologia SENAI de educação profissional.** Brasília: SENAI-Departamento Nacional, 2019.

TROJAN, F.; MARÇAL, G.; BARAN, M. Classificação dos tipos de manutenção pelo método de análise multicritério ELECTRE TRI. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO*, 45., de 16 a 19 de setembro. **Anais [...]**. Natal – RN, p. 347-357, 2013.

WAHAB, N. H. A. *et al.* Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies challenges, opportunities, and best practices. **PeerJ Computer Science**, v. 10, p. e1943, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943> . Acesso em: 08 mai. 2025.

ZAMBELLO, Aline Vanessa *et al.* **Metodologia da pesquisa e do trabalho científico.** Penápolis: FUNEPE, 2018.

Sobre os(as) Autores(as):

ⁱ Luciano de Jesus Menezes



Mestre em Engenharia Mecânica pela Unicamp, com MBA em Gestão da Manutenção pela Faculdade SENAI-SP e especialização em Gestão Industrial pela Anhanguera Educacional. Possui graduação em Tecnologia Mecânica pela FATEC-Sorocaba-SP e formação pedagógica para a Educação Profissional. Atuou como professor de Educação Superior no SENAI-SP e atualmente exerce a função de Coordenador de Atividades Pedagógicas na mesma instituição. Tem ampla experiência na indústria, especialmente nas áreas de usinagem, projetos, manutenção e engenharia mecânica.

<https://orcid.org/0009-0009-9555-405X>

ii Roberto Giani Pattaro Junior



Doutor em Engenharia Mecânica pela Unicamp (2024). Mestre em Engenharia Mecânica pela Unicamp (2019). Especialista MBA - em Gestão da Produção e Qualidade pela FGV (2015). Graduação em Engenharia de Produção - Anhanguera Educacional - Campinas (2010). Atualmente é Professor de Educação Superior – Assistente no SENAI - Departamento Regional de São Paulo. Grande experiência na área de Engenharia Mecânica, de manufatura e de Produção.

<https://orcid.org/0000-0003-4992-1006>

iii Ricardo Favaro



Mestre em Engenharia Mecânica na UNICAMP, especialista em Projeto, Manufatura e Análise de Engenharia Auxiliada por Computador (CAD/CAM/CAE) pela Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica de São Caetano do Sul (2015). Graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário Anhanguera (2012). Professor de Educação Superior na Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange". <https://orcid.org/0000-0003-0959-9331>

iv Renato Ludwig Pilan



Graduado em Manutenção Mecânica Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestrando em Mecânica dos Sólidos pela UNICAMP. Atualmente é Professor de Educação Superior - Especialista II - SENAI - Departamento Regional de São Paulo. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Manutenção Industrial, atuando principalmente nos seguintes temas: vibrações mecânicas, termografia, economia de energia, mancais de rolamentos. <https://orcid.org/0009-0007-8581-4837>

v Sandra Mônica do Nascimento Moura



Doutora em Estudos Literários pelo Programa de Pós-Graduação em Estudos de Literatura - PPGLit, na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestre pelo mesmo programa, na linha de pesquisa: Literatura e outras linguagens. Graduada em Letras pela mesma universidade. Graduada em Pedagogia pela Universidade de Franca - Unifran. Atualmente é professora da Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Mange". <https://orcid.org/0000-0001-5639-9012>