

# **TRANSFORMANDO A MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: UMA ABORDAGEM ESTRATÉGICA COM A DIGITALIZAÇÃO E A INDÚSTRIA 4.0 EM UMA INDÚSTRIA FABRICANTE DE EQUIPAMENTOS**

## **TRANSFORMING INDUSTRIAL MAINTENANCE: A STRATEGIC APPROACH WITH DIGITALIZATION AND INDUSTRY 4.0 IN AN EQUIPMENT MANUFACTURING INDUSTRY**

**Ederson Duarte Bonfim<sup>1, i</sup>**

**João Pedro Moretti<sup>2, ii</sup>**

**Natalia Pereira Gobbo<sup>3, iii</sup>**

### **RESUMO**

O presente artigo apresenta um estudo de caso realizado em uma indústria fabricante de equipamentos que enfrentava desafios significativos relacionados à coleta manual de dados, à baixa integração de informações e a uma abordagem de manutenção de ativos predominantemente reativa na Cadeia de Suprimentos da Manufatura. O objetivo central foi implementar uma nova estratégia baseada em digitalização e sensoriamento, visando estruturar processos organizacionais, monitorar condições de operação em tempo real e desenvolver maior previsibilidade sobre falhas e vida útil de componentes. A adoção de ferramentas digitais e de metodologias de análise proativa permitiu uma redefinição completa da função da manutenção, resultando em ganhos expressivos de eficiência, confiabilidade e competitividade. Os resultados obtidos demonstram que a digitalização não apenas fortalece a gestão de ativos, mas também posiciona a manutenção como um elemento estratégico na jornada de transformação digital da indústria, contribuindo de forma direta para a busca da excelência operacional.

**Palavras-chave: Indústria 4.0; Digitalização; Sensoriamento; Manutenção preditiva; Gestão de ativos; Cadeia de suprimentos; Eficiência operacional; Transformação digital**

### **ABSTRACT**

This article presents a case study in an equipment manufacturing industry that faced limitations related to manual data collection, low information integration, and a predominantly reactive approach to asset maintenance within the Supply Chain in Manufacturing. The main objective was to implement a new strategy based on digitalization and sensing, aiming to structure organizational processes, monitor operating conditions in real time, and improve predictability regarding failures and

---

<sup>1</sup> Graduação em Tecnologia Ambiental na UNISO e Engenharia de Produção na Universidade de Franca, Pós-graduado em Gestão da Produção pela UFSCar, Black Belt pela Vanzolini e Certificação Profissional pelo MIT, cursando Mestrado em Administração na UFSCar. E-mail: ederson.duarte@sp.senai.br

<sup>2</sup> Graduação em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário FACENS, especialização em Lean Six Sigma Black Belt pelo Instituto Vanzolini e MBA em Gerenciamento de Projetos pela USP ESALQ. E-mail: moretti.yole@gmail.com

<sup>3</sup> Graduação em Engenharia Mecânica pela FEIS UNESP. E-mail: nataliapgobbo@gmail.com

component lifespan. The adoption of digital tools and proactive analysis enabled a redefinition of maintenance, fostering gains in efficiency, reliability, and competitiveness. The results demonstrate that digitalization not only strengthens asset management but also positions maintenance as a strategic element of the industry's digital transformation, directly contributing to operational excellence.

**Keywords: Industry 4.0; Digitalization; Sensing; Predictive maintenance; Asset management; Supply chain; Operational efficiency; Digital transformation**

## 1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0, está provocando uma transformação radical na forma como as empresas gerenciam seus processos de produção e, conseqüentemente, a gestão estratégica da manutenção. Com a crescente adoção de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), a análise de dados em tempo real e a inteligência artificial, as organizações estão posicionando-se para melhorar a eficiência operacional e a confiabilidade de seus equipamentos, posicionando-os de forma mais competitiva no mercado.

A gestão estratégica da manutenção desempenha um papel crucial nessa nova era industrial, à medida que as empresas buscam otimizar seus ativos, minimizar paradas não programadas e maximizar a vida útil de seus equipamentos. Nesse contexto, a digitalização emerge como uma ferramenta fundamental que capacita as organizações a antecipar problemas, programar manutenções de forma preditiva e tomar decisões mais embasadas.

Este artigo explora a convergência entre a gestão estratégica da manutenção e a revolução da Indústria 4.0, apresentando um estudo de caso detalhado sobre a implementação de tecnologias digitais em uma indústria fabricante de equipamentos. Analisaremos como a coleta de dados em tempo real e a aplicação de técnicas de sensoriamento redefiniram a manutenção industrial, viabilizando a transição de um modelo puramente reativo para um sistema proativo e preditivo. Além disso, serão abordados os principais pilares da Indústria 4.0 e como sua aplicação pode aprimorar a manutenção, resultando em uma significativa redução de custos, no aumento da disponibilidade dos equipamentos e, conseqüentemente, em uma maior competitividade para a empresa.

Ao longo deste trabalho, serão apresentados os desafios inerentes a essa transformação tecnológica e as estratégias que as organizações podem adotar para se prepararem para uma gestão de manutenção mais alinhada com as demandas da era digital. A gestão estratégica da manutenção deixou de ser uma atividade isolada para se tornar parte integrante da transformação digital da indústria. Este artigo, portanto, servirá como um guia para líderes e profissionais da indústria que buscam compreender o potencial da digitalização e da Indústria 4.0 na otimização de suas estratégias de manutenção, impulsionando a eficiência e a inovação em seus processos de produção.

### 1.1 Problema de pesquisa

O processo de manutenção previamente adotado pela indústria em estudo apresentava limitações significativas. A coleta de dados era realizada de forma manual, por meio de registros em cadernos individuais dos funcionários, o que dificultava o compartilhamento de informações entre as equipes e aumentava

consideravelmente o risco de extravio. Adicionalmente, as informações obtidas, tanto de sistemas quanto de pessoas, eram tratadas de maneira reativa, impedindo a formulação de respostas para questões cruciais como: "Como podemos aprimorar nossos resultados?" e "De que forma a manutenção pode efetivamente contribuir para a excelência operacional?".

Essas limitações evidenciaram a dificuldade da empresa em compreender adequadamente cada parada não planejada, identificar as causas raiz das falhas e monitorar a vida útil de componentes, comprometendo diretamente a eficácia da gestão da manutenção.

## **1.2 Objetivo(s)**

O presente estudo teve como objetivo geral implementar uma nova estratégia de manutenção em uma indústria de fabricação de equipamentos, utilizando métodos de gestão e ferramentas de digitalização.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Estruturar os processos organizacionais da manutenção;
- Implantar ferramentas digitais para registro e análise de informações;
- Realizar o sensoriamento de máquinas para monitorar paradas e condições de operação;
- Desenvolver maior previsibilidade na vida útil dos componentes e nas falhas potenciais;
- Promover a utilização de dados de forma proativa na tomada de decisões.

## **1.3 Justificativa**

A necessidade de mudança tornou-se evidente diante da carência de informações confiáveis e acessíveis para apoiar a tomada de decisão. A ausência de processos estruturados e de sistemas digitalizados limitava a visão estratégica da manutenção e reduzia sua capacidade de contribuir efetivamente para os resultados operacionais da empresa.

A transformação, portanto, justificou-se pela oportunidade de reorganizar os processos de manutenção e incorporar ferramentas digitais e de sensoriamento, possibilitando maior controle, transparência e previsibilidade nas operações.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

A gestão eficaz da confiabilidade na manutenção desempenha um papel crucial na garantia da operação contínua dos ativos de uma organização. A abordagem de estrutura de camadas na gestão da confiabilidade na manutenção é uma metodologia que busca aprimorar a eficiência operacional, promovendo a segmentação hierárquica de responsabilidades e funções dentro da equipe de manutenção. Este conceito é fundamentado em teorias organizacionais e na gestão de ativos, destacando a necessidade de estruturas organizacionais adequadas para otimizar a confiabilidade operacional.

A estrutura de camadas na gestão da confiabilidade na manutenção é uma abordagem que organiza as atividades relacionadas à confiabilidade em diferentes níveis hierárquicos. Ela se baseia nas teorias de gestão organizacional e de ativos, buscando a integração de estratégias que promovam a confiabilidade (SMITH, 2010).

Outro ponto importante dentro da organização estrutural é a função fornecedor e cliente. Esta função desempenha um papel crucial na gestão eficiente da manutenção, promovendo a responsabilidade clara das partes envolvidas e facilitando a entrega de serviços oportunos. A transparência nas relações também contribui para a construção de parcerias duradouras e adaptáveis às necessidades específicas da organização, como apontado por Christopher e Peck (2004).

Ainda dentro da estratégia da manutenção, a "Casa da Manutenção" é uma representação simbólica da estruturação das atividades de manutenção na organização. Ela se baseia em conceitos teóricos de gestão de ativos, estratégias de manutenção e teorias organizacionais. Essa abordagem permite uma visão holística, incluindo aspectos como a gestão de pessoas, tecnologia, processos e parcerias, conforme detalhado por Mobley (2002).

Como consolidação de todo o processo de organização estratégica, os indicadores de processo são fundamentais para a gestão estratégica da manutenção, permitindo a identificação de áreas de melhoria, a alocação eficiente de recursos e a definição de estratégias de longo prazo. Sua aplicação eficaz contribui para a consecução dos objetivos organizacionais (KPI LIBRARY, 2021). Os indicadores mais utilizados incluem:

- Indicadores de Eficiência Operacional: Medem a eficiência dos processos de manutenção, incluindo a utilização de recursos, tempo de parada e custos operacionais (MOBLEY, 2002);
- Indicadores de Confiabilidade e Disponibilidade: Avaliam a capacidade dos ativos em operar conforme o esperado, incluindo o tempo médio entre falhas (MTBF) e o tempo médio de reparo (MTTR) (MOUBRAY, 1997);
- Indicadores de Desempenho Financeiro: Relacionam os custos de manutenção com a eficácia operacional, proporcionando uma visão financeira das atividades de manutenção (NAKAGAWA; MIZUTANI, 2009).

As tecnologias de digitalização vieram para auxiliar todo o processo de manutenção; são elas:

- A digitalização que refere-se à transformação de processos analógicos em formatos digitais. No contexto industrial, ela se manifesta na integração de tecnologias como IoT, computação em nuvem e análise de dados (SCHWAB, 2017). Destaca a relevância da digitalização na criação de sistemas de produção mais ágeis e adaptáveis;
- A IoT (Internet das coisas) desempenha um papel central na digitalização industrial, possibilitando a interconexão de dispositivos e máquinas (ASHTON, 2009). destaca a importância da IoT na criação de um ambiente onde objetos físicos estão conectados, coletando e compartilhando dados em tempo real. A conectividade M2M facilita a comunicação entre máquinas, otimizando a eficiência operacional;
- O sensoriamento de máquinas envolve a instalação de sensores para coleta de dados sobre desempenho, condição e operação das máquinas (Gubbi et al., 2013). O monitoramento em tempo real desses dados possibilita respostas rápidas a eventos e a implementação de estratégias de manutenção preditiva, contribuindo para a eficiência operacional.

Com isso, o sensoriamento contínuo das máquinas permite a implementação de estratégias de manutenção preditiva, reduzindo o tempo de inatividade e otimizando os custos operacionais Rauschecker e Schultmann (2017) discutem a importância da manutenção preditiva na maximização da disponibilidade dos ativos.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este estudo foi desenvolvida em duas fases principais, visando uma abordagem abrangente para a transformação da manutenção industrial.

#### 3.1 Fase 1: Organização Estrutural

A primeira fase da pesquisa focou no redesenho organizacional e na fundamentação teórico-prática do setor de manutenção. Para isso, foram executadas as seguintes etapas:

- **Definição de uma Estrutura em Camadas:** Foi estabelecido um modelo hierárquico de três camadas para a tomada de decisões, visando atribuir autonomia e agilizar o fluxo de tratativas. A primeira camada ficou responsável por decisões do dia a dia com apoio técnico; a segunda, por decisões estratégicas que demandam estudos aprofundados; e a terceira, por decisões críticas que requerem suporte da alta direção e liberação de recursos.
- **Mapeamento de Fornecedores e Clientes Internos:** Foi definida e documentada a estrutura de relacionamento entre a manutenção e os demais departamentos da organização. Este mapeamento buscou clarificar as interações, expectativas e fluxos de demanda, promovendo uma visão sistêmica dos processos.
- **Desenvolvimento do Conceito "A Casa da Manutenção":** Para estabelecer os pilares da excelência na gestão, foi concebido um modelo conceitual fundamentado em seis dimensões inter-relacionadas: Pessoas (fundação e motivação da equipe), Mentalidade (orientação para melhoria contínua), Método (processos padronizados), Suporte/Foco (acesso a recursos e tecnologia), Regras de Ouro (normas e diretrizes) e Voz do Cliente (atendimento às expectativas). Este conceito serviu como um guia para a construção de uma cultura de manutenção robusta e centrada no valor.
- **Definição de Indicadores de Desempenho (KPIs):** Foram estabelecidos indicadores-chave para medir e otimizar a performance da manutenção, organizados em três eixos fundamentais: Segurança (monitoramento de condições de trabalho e integridade dos ativos), Desempenho (confiabilidade e produtividade) e Custo (controle de gastos e análise de eficiência). A definição desses KPIs permitiu uma avaliação objetiva do progresso e da eficácia das ações implementadas.

#### 3.2 Fase 2: Digitalização e Sensoriamento de Máquinas

A segunda fase consistiu na implementação de tecnologias para permitir a manutenção preditiva e baseada em condição. A metodologia envolveu:

- **Seleção de Parâmetros de Monitoramento:** Com base na análise da curva de evolução da quebra de componentes, foram selecionados os parâmetros mais críticos para sensoriamento: Vibração, Ruído, Temperatura e Pressão.
- **Desenvolvimento da Arquitetura de Coleta de Dados:** Em conjunto com o departamento de Tecnologia da Informação (TI), foi projetada e implementada uma infraestrutura técnica dedicada para capturar, transmitir e armazenar os dados gerados pelos sensores.
- **Instalação Piloto e Embarcação de Tecnologia:** Os sensores e a arquitetura de dados foram implementados em uma máquina específica, um Torno Vertical Schiess, que serviu como estudo de caso e prova de conceito. A máquina foi

equipada com sensores e um painel de controle para visualização dos dados.

O estudo utilizou uma abordagem quali-quantitativa, baseada em estudo de caso, onde os dados coletados pelos sensores e os indicadores de desempenho (como MTBF e Disponibilidade) foram analisados para validar a eficácia das estratégias implementadas nas duas fases, proporcionando uma compreensão aprofundada do impactos da digitalização na manutenção industrial.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

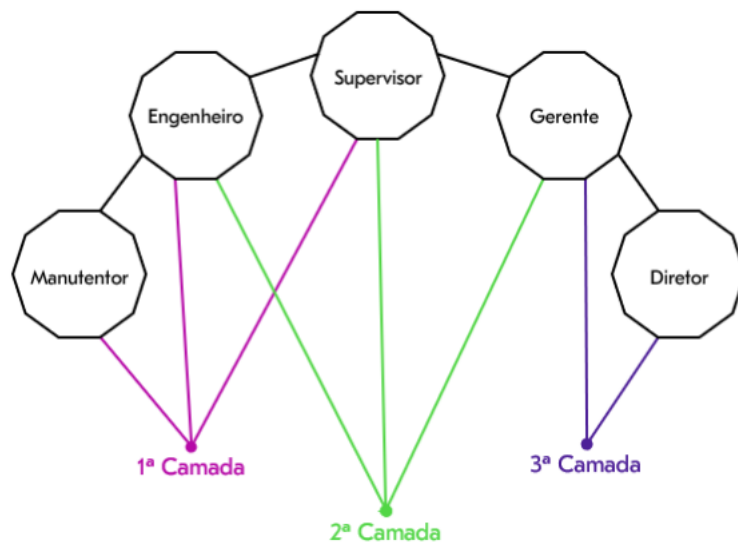
### 4.1 Organização estrutural

#### 4.1.1 Estrutura de camada e função fornecedor e cliente

O primeiro passo importante dentro da organização estrutural foi definir, uma estrutura de camada (Fig. 1) a fim de garantir as atribuições e autônoma para tomada de decisões. Esta definição organizou o fluxo de direcionamento de tratativas dentro da manutenção, conforme a escala abaixo: 1ª Camada: decisões do dia a dia com necessidade de apoio técnico;

- 2ª Camada: decisões estratégicas com necessidade de estudos mais aprofundados;
- 3ª Camada: decisões críticas com necessidade de suporte da alta direção para definição do melhor caminho e liberação de recursos.

Figura 1 – Estrutura hierárquica em três camadas para tomada de decisão na manutenção.

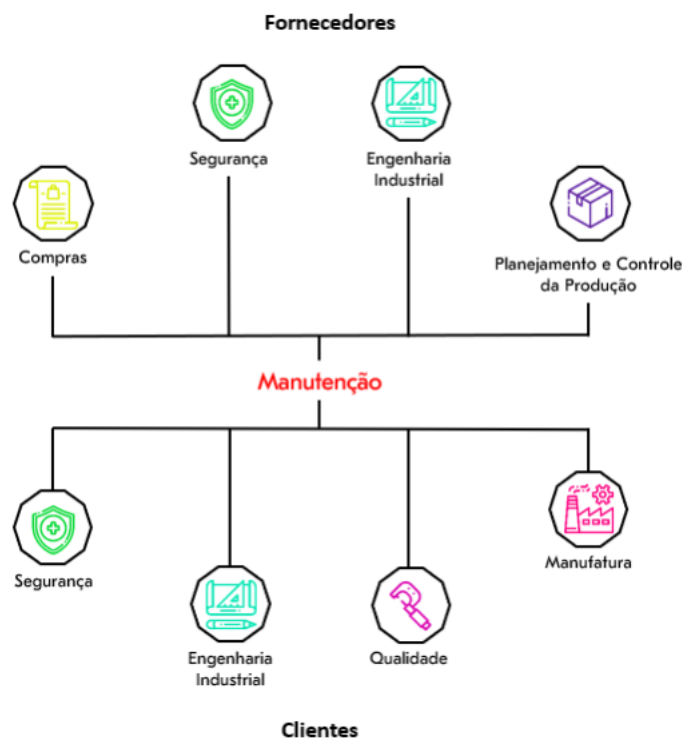


Fonte: O autor, 2024.

Essa hierarquia permitiu uma delegação eficiente de responsabilidades, agilizando os processos decisórios e otimizando a resposta a diferentes níveis de complexidade e urgência. A Figura 1 ilustra visualmente essa estrutura, destacando a clareza na distribuição de poder e responsabilidade, em consonância com as abordagens de gestão de confiabilidade que preconizam a segmentação hierárquica para otimização operacional (Smith, 2010).

Além da estrutura de Camada, foi fundamental a definição da estrutura de Fornecedores e Clientes (Fig. 2). Esta iniciativa foi crucial para que a equipe de manutenção compreendesse suas interações com os demais departamentos da organização. Ao clarificar quem são os fornecedores de serviços e informações para a manutenção e quem são seus clientes internos, foi possível estabelecer um fluxo de trabalho mais colaborativo e transparente. Essa compreensão mútua das relações interdepartamentais contribuiu para a melhoria da comunicação, a otimização da entrega de serviços e o alinhamento das expectativas, fortalecendo as parcerias internas e a eficácia geral da manutenção, um aspecto ressaltado por Christopher e Peck (2004) como crucial para a gestão eficiente e a construção de parcerias duradouras.

Figura 2 – Estrutura de Fornecedores e Clientes da Manutenção.



Fonte: O autor, 2024

#### 4.1.2 A casa da manutenção

A criação do conceito da "Casa da Manutenção" (Fig. 3) baseada nos níveis de Pessoas, Mentalidade, Método, Suporte/Foco, Regras de outro e Voz do Cliente foi fundamental para estabelecer os níveis de excelência na gestão da manutenção. Essa abordagem auxiliou na determinação de uma estrutura sólida que garante a busca pela eficácia e a eficiência dos processos de manutenção, promovendo uma cultura de melhoria contínua e o atendimento às expectativas do cliente.

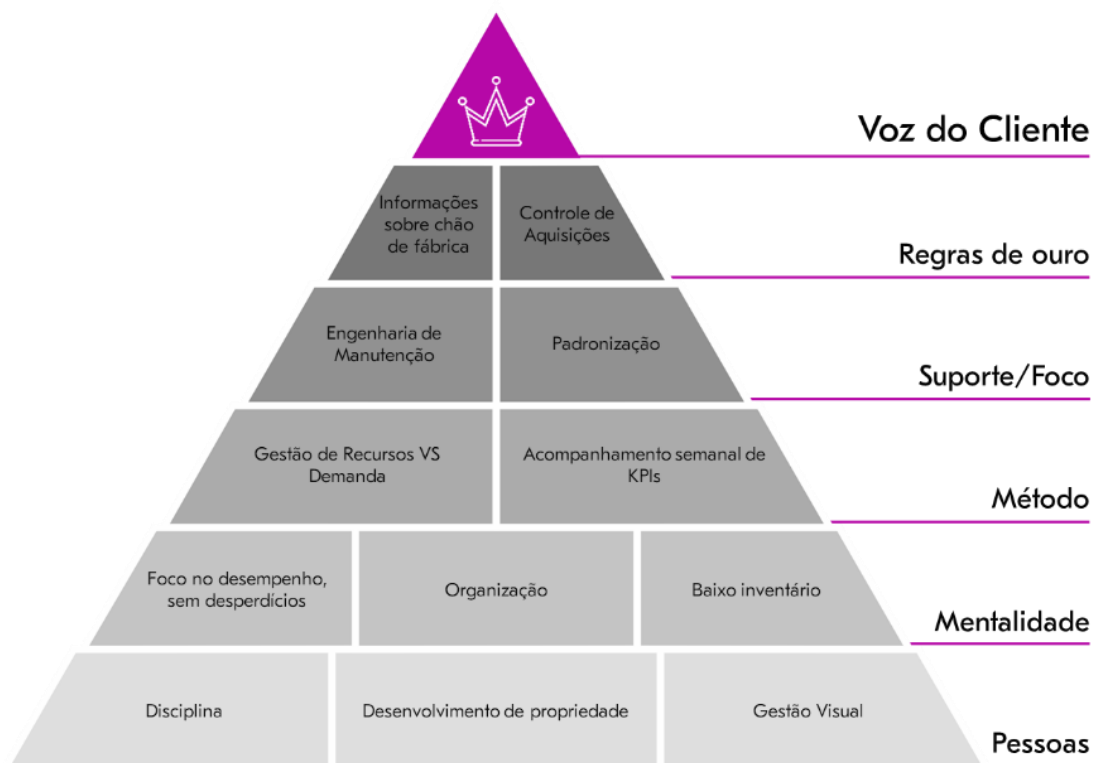
No modelo, as pessoas desempenham um papel central, servindo como a fundação sobre a qual toda a estrutura da manutenção é construída. Conforme conceito abaixo:

- **Pessoas:** As pessoas são o elemento mais fundamental da "Casa da Manutenção". São os profissionais que realizam as tarefas de manutenção e garantem que os ativos da organização funcionem corretamente. A motivação, o engajamento e o trabalho em equipe são aspectos-chave para construir uma fundação sólida;

- **Mentalidade:** A mentalidade da equipe, deve ser sólida e orientada para a melhoria contínua. Os profissionais de manutenção devem ter uma mentalidade proativa, buscando constantemente maneiras de otimizar os processos, reduzir custos e aumentar a confiabilidade dos ativos;
- **Método:** Os métodos e processos de manutenção fornecem a organização e a base para as atividades de manutenção. Ter métodos bem definidos, documentados e padronizados é fundamental para garantir a eficiência e a consistência no trabalho de manutenção;
- **Suporte/Foco:** O suporte e o foco da manutenção permitem a geração de novas ideias e informações, assim como o acesso para melhorias. Isso inclui o acesso a recursos, tecnologia e ferramentas que auxiliam a equipe de manutenção a desempenhar seu trabalho de maneira eficaz;
- **Regras de Ouro:** As regras de ouro estabelecem as normas, regulamentos e diretrizes que devem ser seguidos na execução da manutenção. Isso garante a conformidade com os padrões, a segurança e a qualidade do trabalho;
- **Voz do Cliente:** A voz do cliente representa o topo da "Casa da Manutenção". É o objetivo final da manutenção - atender às necessidades e expectativas dos clientes. Essa dimensão assegura que todas as ações de manutenção estejam alinhadas com o que é mais valioso para o cliente, promovendo a satisfação do mesmo.

Portanto, a "Casa da Manutenção" proporcionou um alicerce sólido para a gestão de manutenção, onde cada parte desempenha um papel crucial e se complementa, resultando em um ambiente onde a manutenção é eficaz, eficiente e, o mais importante, focada no cliente. Esta abordagem tem se mostrado essencial para manter ativos operacionais, reduzir custos e promover a satisfação do cliente.

Figura 3 – Modelo da “Casa da Manutenção”, representando fundamentos para a excelência em manutenção



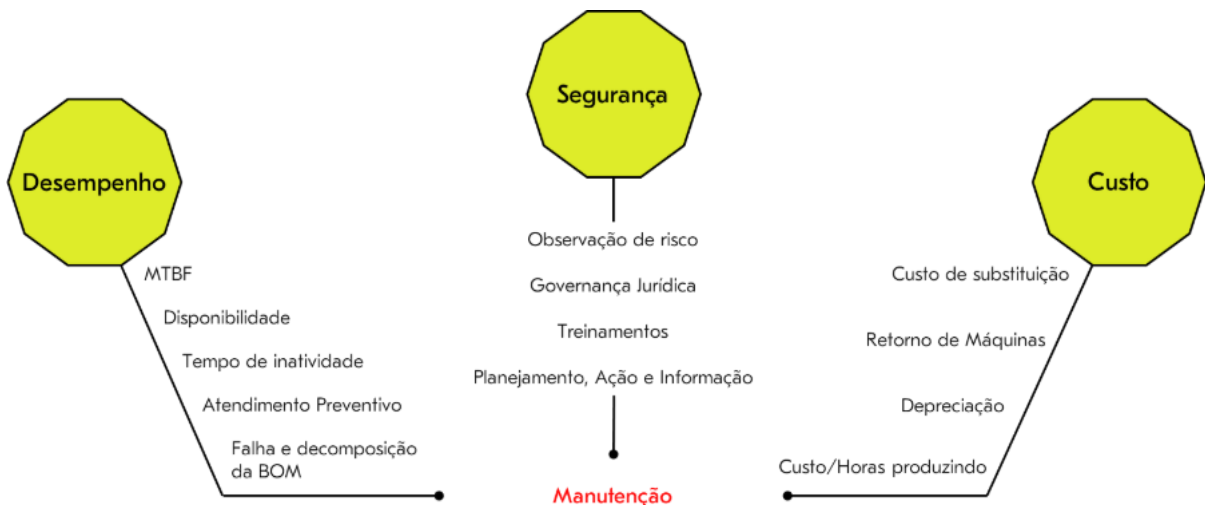
Fonte: O autor, 2024.

### 4.1.3 Indicadores de processo

Para medir e otimizar eficazmente a manutenção, definimos indicadores essenciais cuja concentração leva em consideração três aspectos fundamentais (Fig. 4):

- **Segurança:** Os indicadores de segurança na manutenção são vitais para monitorar e melhorar as condições de trabalho, a integridade dos ativos e a proteção dos colaboradores. Eles permitem identificar riscos, prevenir acidentes e criar um ambiente de trabalho mais seguro;
- **Desempenho:** Os indicadores de desempenho permitem avaliar a confiabilidade dos ativos, a produtividade da equipe e a qualidade do trabalho de manutenção. Eles auxiliam na identificação de problemas em estágios iniciais, na programação de manutenções preventivas e na otimização do ciclo de vida dos ativos;
- **Custo:** Os indicadores de custo permitem rastrear e controlar os gastos associados à manutenção, bem como identificar oportunidades de economia. Eles incluem custos de mão de obra, peças de reposição, manutenção preventiva versus corretiva e análise de custo total. Gerenciar eficazmente os custos de manutenção não apenas economiza recursos financeiros, mas também contribui para a sustentabilidade a longo prazo da organização.

Figura 4 – Organização dos indicadores de manutenção em três eixos fundamentais: segurança, desempenho e custo.



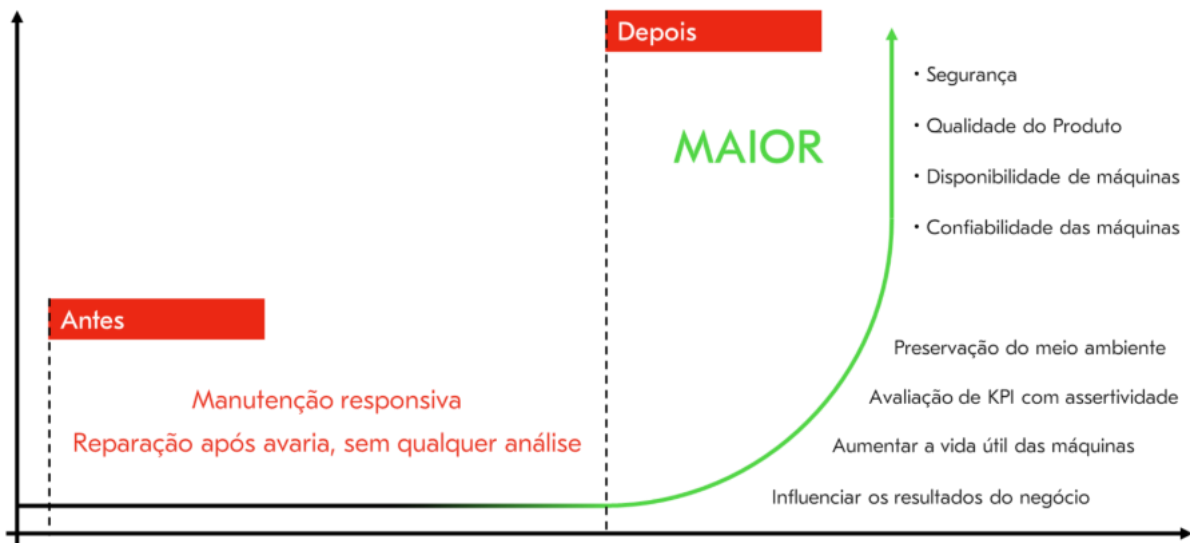
Fonte: O autor, 2024.

Estes indicadores não apenas oferecem uma compreensão crítica, mas também auxiliam na busca por um equilíbrio delicado entre essas dimensões interconectadas. Ao monitorar e agir com base nesses indicadores, é possível melhorar a segurança no local de trabalho, manter ativos confiáveis e minimizar os custos, resultando em uma operação mais eficiente, lucrativa e sustentável. Tais resultados corroboram a literatura que enfatiza a importância de indicadores como MTBF e MTTR para avaliar a confiabilidade e disponibilidade (Moubray, 1997), bem como a relevância dos indicadores de eficiência operacional e desempenho financeiro para a gestão estratégica da manutenção (Moblely, 2002; Nakagawa; Mizutani, 2009).

Após a primeira fase de “Organização Estrutural” foi possível observar uma melhora significativa na mudança do perfil de manutenção. Na figura 5 foi ilustrada a

comparação entre o antes e o depois.

Figura 5 – Comparativo entre manutenção responsiva e manutenção proativa.



Fonte: O autor, 2024.

A figura demonstra e nos faz refletir sobre o quanto a manutenção desempenha um papel vital em qualquer operação empresarial, garantindo a confiabilidade e a eficiência dos ativos. Quando comparamos as abordagens de Manutenção Responsiva e a Manutenção Proativa, observamos que ambas têm implicações significativas nos resultados do negócio, mas diferem na maneira como lidam com os problemas de manutenção.

A Manutenção Responsiva pode ser eficaz em situações de baixo custo ou em ativos menos críticos, porém traz consigo várias consequências negativas. A Manutenção Proativa, por sua vez, envolve a identificação e correção de problemas potenciais antes que eles causem falhas. Isso é alcançado por meio de inspeções regulares, monitoramento e manutenção preventiva.

Podemos observar que para a empresa estudada a Manutenção Proativa trouxe resultados significativamente melhores para o negócio a longo prazo. Possibilitando evitar falhas, reduzir custos e melhorar a eficiência.

Portanto, entendemos que investir em uma abordagem proativa é essencial para otimizar a gestão de ativos e obter vantagens reais nos negócios.

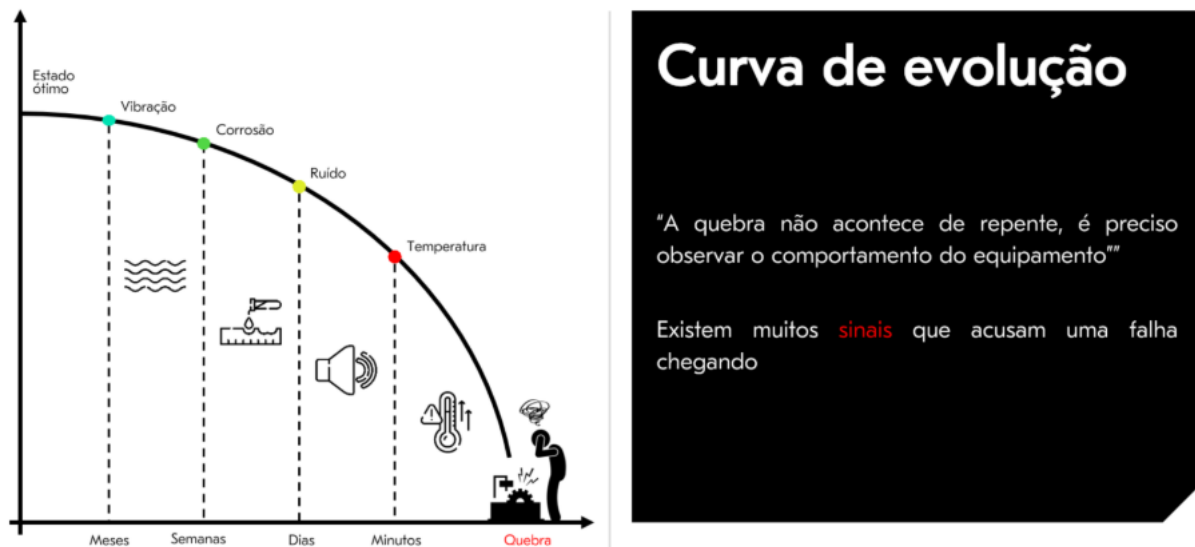
## 4.2 Digitalização e Sensoriamento de Máquinas

Utilizamos a curva de evolução da quebra (Figura 6) como referência para definir os parâmetros críticos a serem monitorados nas máquinas. A partir da análise dessa curva, optou-se pelo sensoriamento das seguintes variáveis:

- **Vibração:** a vibração excessiva pode contribuir para a fadiga de materiais e, eventualmente, levar à quebra. A curva de evolução demonstra como os níveis de vibração afetam a taxa de falha ao longo do tempo;
- **Ruído:** o ruído excessivo pode ser um indicador de problemas em um sistema. A curva de evolução da quebra em relação ao ruído destaca como o aumento do ruído está relacionado à falha do sistema;
- **Temperatura:** a temperatura extrema pode afetar a integridade dos materiais. A curva de evolução aqui demonstra como a temperatura influencia a

probabilidade de quebra ao longo do tempo.

Figura 6 – Curva de evolução da quebra em função de variáveis críticas.

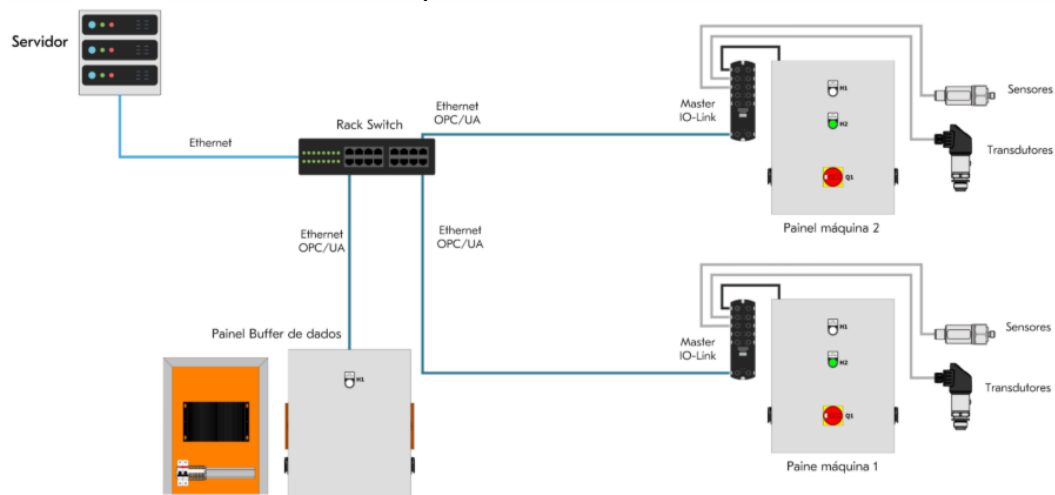


Fonte: O autor, 2024.

As curvas de evolução são ferramentas valiosas na engenharia de confiabilidade e na análise de falhas, pois ajudam a entender como diferentes variáveis contribuem para o desempenho ou falha de um sistema ao longo do tempo. Cada uma das variáveis mencionadas pode ser considerada como um fator contribuinte para a análise da quebra de um sistema específico.

A arquitetura de coleta de dados (Fig. 7) foi projetada para garantir a integração e a análise eficiente das informações. A utilização de sensores, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e sistemas de armazenamento em nuvem permitiu a criação de um fluxo de dados contínuo e confiável. Essa arquitetura foi fundamental para a implementação da manutenção preditiva, pois garantiu que os dados estivessem disponíveis para análise em tempo real, possibilitando a tomada de decisões rápidas e embasadas.

Figura 7 – Arquitetura técnica de coleta e transmissão de dados, integrando sensores instalados em máquinas ao sistema central de monitoramento.



Fonte: O autor, 2024.

A robustez dessa arquitetura é um pilar para a sustentação de um sistema de manutenção 4.0, alinhando-se com a visão da Indústria 4.0 que integra tecnologias como IoT e computação em nuvem para criar sistemas de produção mais ágeis e adaptáveis (Schwab, 2017; Gubbi et al., 2013).

A implementação da tecnologia em um Torno Vertical Schiess (Fig. 8) serviu como prova de conceito para a nova estratégia de manutenção. A instalação de sensores e de um painel de controle permitiu o monitoramento em tempo real das condições da máquina, validando a eficácia da abordagem proposta. Os resultados obtidos com essa máquina demonstraram o potencial da digitalização para transformar a manutenção industrial, abrindo caminho para a implementação de estratégias semelhantes em outras máquinas e processos da empresa.

Figura 8 – Torno Vertical equipado com sensores e painel de controle para coleta e monitoramento de dados



Sensor de vibração  
Pepperl+Fuchs



Torno Vertical



Painel de controle  
BlueSensor

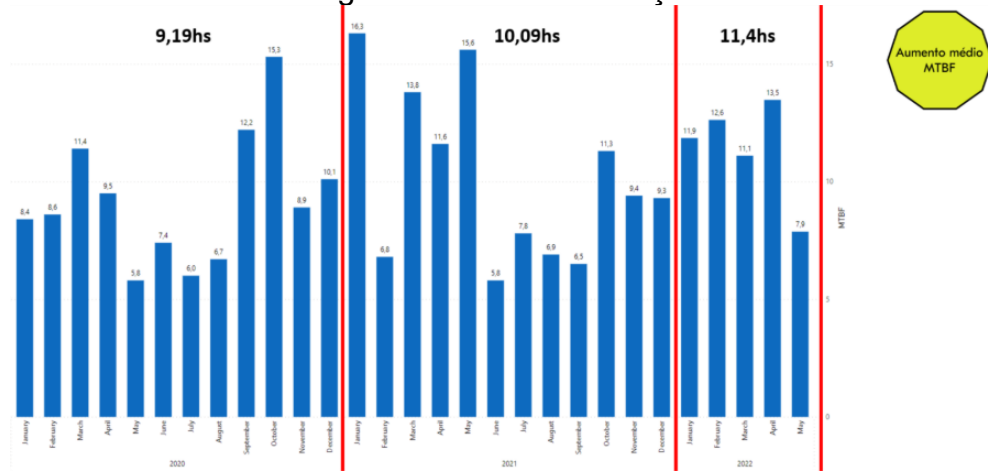
Fonte: O autor, 2024.

## 5 CONCLUSÃO

O artigo documenta os resultados de uma pesquisa voltada para otimizar a eficiência operacional em ambientes de usinagem. As estratégias implementadas demonstraram impactos significativos em diversos aspectos-chave.

O aumento médio do MTBF (*Mean Time Between Failures*) foi notável, refletindo a eficácia de práticas avançadas de manutenção preventiva e preditiva. A implementação de um plano proativo resultou em uma extensão significativa do tempo médio entre falhas na (Figura 9) podemos ver que a média do MTBF antes da implementação foi de 9,19hs em 2020 e após a implementação passou para uma média de 10,09hs em 2021 e uma média de 11,4 até maio de 2022, estes resultados consolidam confiabilidade dos equipamentos.

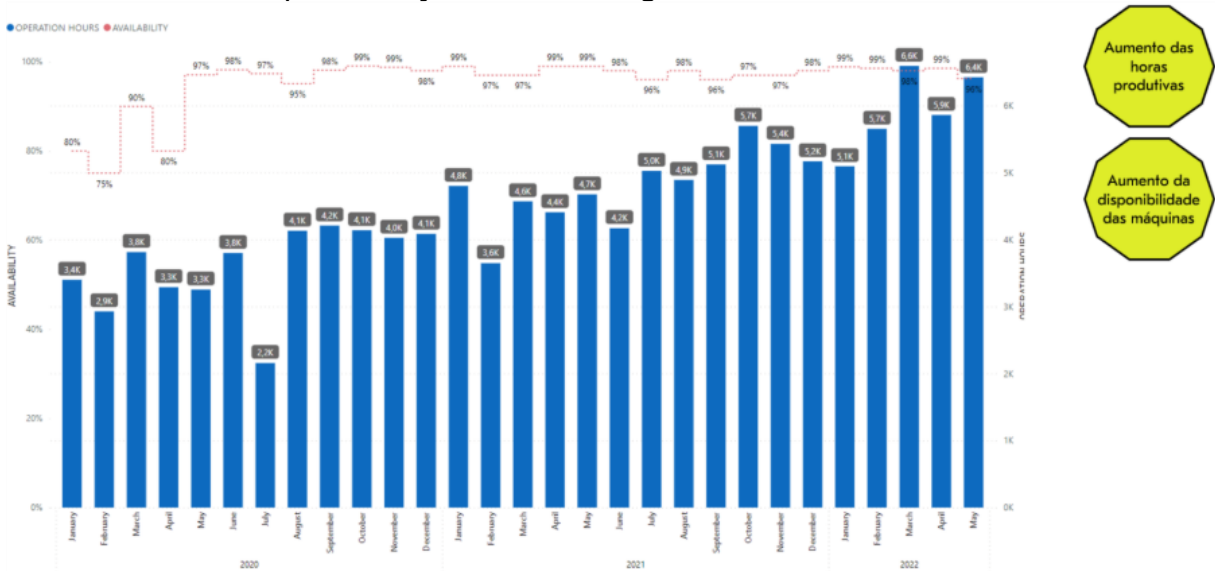
Figura 9 – Evolução do MTBF médio antes e após a implementação da estratégia digitalizada de manutenção.



Fonte: O autor, 2024.

A disponibilidade de máquinas foi consideravelmente aprimorada pela integração de tecnologias de monitoramento em tempo real e a adoção de estratégias de manutenção baseadas em condições. Essa abordagem aumentou substancialmente a disponibilidade de máquinas como podemos ver na (Figura 10), onde após implementação em maio de 2020 já obtivemos um aumento de disponibilidade que se manteve mesmo com o aumento de horas produtivas, demonstrado no gráfico de barras em azul.

Figura 10 – Aumento da disponibilidade e das horas produtivas de usinagem após a implementação das tecnologias de monitoramento.



Fonte: O autor, 2024.

O aumento das horas produtivas de usinagem foi alcançado através da melhoria da confiabilidade das máquinas e uma gestão mais eficiente do tempo de produção. O aprimoramento nos processos e a minimização dos tempos ociosos contribuíram significativamente para maximizar a eficiência operacional.

Esses resultados coletivos validam a eficácia das estratégias implementadas, destacando a importância de uma abordagem holística para a otimização operacional.

A combinação de práticas de manutenção avançadas e a implementação de tecnologias inovadoras não apenas elevaram a confiabilidade das máquinas, mas também tiveram impactos diretos na disponibilidade operacional e na produtividade global.

Conclui-se que a importância estratégica de investir continuamente em tecnologias de manutenção, preservam a integridade dos equipamentos, mas também desempenham um papel vital na maximização da eficiência operacional, contribuindo diretamente para a competitividade e sustentabilidade a longo prazo na indústria. O presente trabalho reforça a necessidade de abraçar a inovação e incorporar soluções tecnológicas como uma parte essencial da estratégia global de gestão de ativos e operações.



## REFERÊNCIAS

ASHTON, Kevin. That 'internet of things' thing. **RFID Journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, jun. 2009. Disponível em: <http://www.rfidjournal.com/article/print/4986>. Acesso em: 09 fev. 2024.

CHRISTOPHER, Martin; PECK, Helen. Building the resilient supply chain. **International Journal of Logistics Management**, v. 15, n. 2, p. 1-14, 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/228559011\\_Building\\_the\\_Resilient\\_Supply\\_Chain](https://www.researchgate.net/publication/228559011_Building_the_Resilient_Supply_Chain). Acesso em: 09 fev. 2024.

GUBBI, Jayavardhana *et al.* Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, set. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X13000241>. Acesso em: 09 fev. 2024.

KPI LIBRARY. **Key Performance Indicators (KPIs) for Maintenance**. 2021. Disponível em: <https://www.ashb.com/wp-content/uploads/2021/07/IS-2021-186.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2024.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. New York: Elsevier Science, 2002. 456 p.

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997. 448 p.

NAKAGAWA, Toshio; MIZUTANI, Satoshi. A summary of maintenance policies for a finite interval. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 94, n. 1, p. 89-96, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832007001354>. Acesso em: 09 fev. 2024.

RAUSCHECKER, Ursula; SCHULTMANN, Frank. Condition monitoring and predictive maintenance: a review. **Procedia CIRP**, v. 61, p. 863-868, 2017.

SCHWAB, Klaus. **The Fourth Industrial Revolution**. Founder and Executive Chairman, World Economic Forum. New York: Crown Business, 2017. 192 p.

SMITH, Adam. **Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers**. New York: Elsevier Science, 2010. 192 p.

## **SOBRE O(S)AUTOR(ES)**

---

### **i Ederson Duarte Bonfim**



Possui graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental pela Universidade UNISO (2005) e Engenharia de Produção pela Universidade de Franca (2023) com especialização em Gestão da Produção pela UFSCar (2007), Lean Six Sigma Black Belt pelo Instituto Vanzolini (2018) e Certificação Profissional em Transformação Digital pelo MIT (2024), cursando atualmente Mestrado em Administração na UFSCar como aluno especial. Atualmente é Gerente de Engenharia Industrial e Manutenção na Metso e professor da Faculdade Senai Sorocaba, lecionando as disciplinas de Gestão da Manutenção e Projeto Integrador no curso Tecnológico em Mecatrônica. Tem experiência de mais de 20 anos na indústria, atuando nas áreas de Engenharia Industrial, Manutenção, Qualidade e Melhoria Contínua. Especialista na implementação de conceitos de Lean Manufacturing, Kaizen e Indústria 4.0, liderando projetos locais e globais (Brasil, China, Índia, França e Finlândia) com foco em padronização de processos, inovação e otimização de resultados. Atuação acadêmica como Professor universitário e de pós-graduação em instituições como SENAI-SP, UNIP e FATEC, nas áreas de Gestão da Manutenção, Estratégia Empresarial, Inovação e Qualidade.

### **ii João Pedro Moretti**



Possui bacharel em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário FACENS (2019), com especialização em Lean Six Sigma Black Belt pelo Instituto Vanzolini (2022) e MBA em Gerenciamento de Projetos pela USP ESALQ (2024). Possui experiência em engenharia de aplicação, desenvolvimento de processos, gerenciamento de projetos e gestão de manutenção de ativos nos setores automotivo, de linha branca e de manufatura pesada. Hoje atua como Key Account Supply Chain Specialist na VAT, sendo responsável pela gestão de flutuações de demanda e escalonamentos em nível global.

### **iii Natalia Pereira Gobbo**



Possui graduação em Engenharia Mecânica pela FEIS UNESP (2025). Atualmente é Engenheira de Melhoria Contínua na Metso, responsável por coordenar projetos voltados à melhoria, padronização e inovação de processos produtivos.