

Engenharia de produção e de materiais 4.0

métodos preventivos, preditivos, IOT e 5s para eficiência e sustentabilidade na indústria

Everton Rangel Bispo
Organizador


Epitáya
Editora

EVERTON RANGEL BISPO
Organizador

ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E DE MATERIAIS 4.0: MÉTODOS
PREVENTIVOS, PREDITIVOS, IOT E 5S PARA EFICIÊNCIA E
SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA

1^a Edição



Rio de Janeiro – RJ
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

E57 Engenharia de produção e de materiais 4.0 [livro eletrônico] : métodos preventivos, preditivos, IOT e 5s para eficiência e sustentabilidade na indústria / organizador Everton Rangel Bispo. – 1. ed. – Rio de Janeiro, RJ: Epitaya, 2025.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
ISBN 978-65-5132-024-8

1. Sustentabilidade. 2. Engenharia. 3. Produção. I. Bispo, Everton Rangel.

CDD 620

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Epitaya Propriedade Intelectual Editora Ltda
Rio de Janeiro / RJ
 contato@epitaya.com.br
 http://www.epitaya.com.br



CONSELHO EDITORIAL

EDITOR RESPONSÁVEL	Bruno Matos de Farias
ASSESSORIA EDITORIAL	Helena Portes Sava de Farias
ASSISTENTE EDITORIAL	Equipe Editorial
MARKETING / DESIGN	Equipe MKT
DIAGRAMAÇÃO/ CAPA	
REVISÃO	Everton Rangel Bispo

COMITÊ CIENTÍFICO

PESQUISADORES	Profa. Drª Kátia Eliane Santos Avelar
	Profa. Drª Fabiana Ferreira Koopmans
	Profa. Drª Maria Lelita Xavier
	Profa. Drª Eluana Borges Leitão de Figueiredo
	Profa. Drª Pauline Balabuch
	Prof. Dr. Daniel da Silva Granadeiro
	Prof. Dr. Rômulo Terminelis da Silva
	Prof. Dr. Everton Rangel Bispo

APRESENTAÇÃO

O livro **Engenharia de Produção e de Materiais 4.0: Métodos Preventivos, Preditivos, IoT e 5S para Eficiência e Sustentabilidade na Indústria** reúne estudos aplicados e análises técnicas que dialogam diretamente com os desafios contemporâneos da indústria diante da transformação digital, da busca por maior eficiência operacional e do compromisso com a sustentabilidade.

A obra apresenta uma coletânea de capítulos fundamentados em estudos de caso reais, evidenciando a aplicação prática de conceitos como **Manutenção Produtiva Total (TPM)**, **manutenção autônoma**, **manutenção preditiva**, **inteligência artificial**, **Internet das Coisas (IoT)** e **ferramentas clássicas de organização e qualidade, como o 5S**. Esses métodos são analisados sob a ótica da Engenharia de Produção e da Engenharia de Materiais, demonstrando seu impacto direto na confiabilidade dos equipamentos, na qualidade dos processos produtivos e na competitividade industrial.

Os capítulos iniciais exploram estratégias de manutenção autônoma e TPM em diferentes contextos industriais, como os setores alimentício, automotivo e refratário, evidenciando ganhos expressivos em eficiência, redução de falhas e melhoria contínua. Na sequência, a obra avança para abordagens mais inovadoras, destacando a transição da manutenção corretiva para a manutenção preditiva apoiada por **inteligência artificial**, bem como o uso estratégico de tecnologias para otimização de sistemas mecânicos, como correias transportadoras.

Complementarmente, o livro enfatiza o papel da **Indústria 4.0**, especialmente por meio da IoT, como elemento-chave para a integração entre manutenção, qualidade e produção, contribuindo para processos mais inteligentes, sustentáveis e orientados por dados. Ao longo dos capítulos, observa-se a preocupação constante com a eficiência energética, a redução de desperdícios e a sustentabilidade dos sistemas industriais.

Com rigor técnico, diversidade temática e forte caráter aplicado, esta coletânea consolida-se como uma leitura relevante para **estudantes, pesquisadores, engenheiros, gestores industriais e profissionais da área de manutenção e produção**, oferecendo subsídios práticos e teóricos para a tomada de decisão e para a implementação de soluções inovadoras no ambiente industrial contemporâneo.

Desejamos a todos uma excelente leitura.

Prof Dr Bruno Matos de Farias
Editor-Chefe Editora Epitaya

SUMÁRIO

Capítulo 1.....	07
MANUTENÇÃO AUTÔNOMA COMO ESTRATÉGIA DE EFICIÊNCIA: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	
<i>Lucas Vinícius Feitel de Farias; Marlon de Sousa Sampaio da Silva; Higor Alves dos Santos; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	
Capítulo 2.....	25
TRANSFORMAÇÃO DE PROCESSOS E QUALIDADE: O PAPEL DO TPM NA MICHELIN	
<i>Diana dos Reis Azevedo de Souza; Letícia de Souza Brito Sobral; Milena da Silva Veiga; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	
Capítulo 3.....	35
TPM E DESEMPENHO EM MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM EQUIPAMENTO DE UMA INDÚSTRIA REFRATÁRIA	
<i>Cleyse da Silva dos Santos; Lorena Arigoni Vannucci; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	
Capítulo 4.....	57
TRANSIÇÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO CORRETIVA PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA COM SUPORTE DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ESTUDO DE CASO APLICADO À FÁBRICA DA COCA-COLA EM MATOLA-GARE.	
<i>Matheus Pedroso de Oliveira; Nathalia Nair Dias da Silva; Victor Franco Ferreira; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	
Capítulo 5.....	75
OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO ESTRATÉGICA DE RASPADORES	
<i>Leonardo Carvalho Matos de Moura; Matheus Alves Pinto; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	

Capítulo 6.....	97
O USO DA INTERNET DAS COISAS COMO MEIO DE MELHORIA DA MANUTENÇÃO E DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0	
<i>Alex da Costa Silva; Luan Caio Gouvea Diniz; Mayara Brenda Brandão de Oliveira Silva; George Gilberto Gomes Junior; Leonardo Lopes de Campos; Everton Rangel Bispo.</i>	

CAPÍTULO 1

MANUTENÇÃO AUTÔNOMA COMO ESTRATÉGIA DE EFICIÊNCIA: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Lucas Vinícius Feitel de Farias

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
lucasfeitelfarias@gmail.com

Marlon de Sousa Sampaio da Silva

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
marlonsampaio@souunisuam.com.br

Higor Alves dos Santos

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
higoralves@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM),
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

Nos últimos anos, a competitividade industrial elevou a manutenção de um custo operacional para um pilar estratégico, essencial para garantir a confiabilidade e a eficiência produtiva, especialmente em setores de alta demanda como o alimentício. Nesse contexto, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e a Manutenção Autônoma (MA) emergem como ferramentas cruciais para a gestão proativa de ativos. O presente trabalho se configura como um Estudo de Caso, voltado a propor um plano de ação integrado entre o PCM e a MA para otimizar o desempenho de um equipamento na linha de produção. A metodologia adotada incluiu um diagnóstico das causas de falha, complementado por uma revisão das atividades para embasar a proposta de intervenção. A devida aplicação dessas práticas visa transformar a cultura operacional, transferindo aos

operadores a responsabilidade pela conservação primária, e estruturar o planejamento de manutenção. Como resultado, o modelo proposto de PCM e MA tem como foco elevar a confiabilidade e a disponibilidade do maquinário, maximizando a Eficiência Global do Equipamento (OEE). A aplicação coordenada dessas metodologias é imperativa para garantir a redução de falhas não programadas, o controle de custos e o cumprimento sustentável das metas de produção e manutenção.

Palavras-chave: Planejamento e controle da Manutenção; Manutenção Autônoma; Confiabilidade; OEE.

INTRODUÇÃO

No ambiente industrial, a gestão da manutenção é fundamental para melhorar processos, aumentar a produtividade, garantir o funcionamento contínuo dos equipamentos e controlar os custos operacionais e de manutenção. Conforme Pinto e Xavier (2001), a manutenção deve garantir o pleno funcionamento dos equipamentos e das instalações, alinhando-se aos processos produtivos, ao mesmo tempo que garanta a segurança, a confiabilidade, a preservação do meio ambiente e a adequação dos custos. Desta forma, a manutenção deve ser integrada a todos os setores da organização, pois impacta diretamente na produtividade, na qualidade dos produtos e nos resultados financeiros.

O uso de indicadores de desempenho e ferramentas de gestão possibilita decisões mais acertadas, facilitando a identificação rápida de falhas e a proposição de soluções eficientes. Entretanto, o desafio principal é equilibrar a redução de custos com a maximização da confiabilidade e da disponibilidade operacional. Por isso, o trabalho estratégico de ferramentas gerenciais é essencial para atingir esses objetivos.

Este trabalho tem como foco analisar a gestão da manutenção em uma empresa, avaliando seu desempenho, impactos operacionais e soluções definidas para problemas recorrentes. Além disso, busca dados coletados que permitem identificar falhas e proporcionar melhorias que contribuem para o aprimoramento dos processos de manutenção. Entre os objetivos específicos estão: a utilização de sistemas para armazenamento e análise de dados de manutenção e custos; o monitoramento de máquinas e operadores para subsidiar estudos futuros; a revelação de dados atuais com registros existentes para aumentar a confiabilidade das análises; e a identificação de falhas para sugerir melhorias na gestão da manutenção.

Assim, o planejamento adequado da manutenção se apresenta não apenas como um suporte operacional, mas como uma estratégia chave para aumentar a confiabilidade, melhorar a eficiência produtiva, reduzir custos, preservar a qualidade e garantir a sustentabilidade dos equipamentos.

OBJETIVO GERAL

Analisar e propor melhorias na gestão da manutenção industrial por meio da aplicação integrada de práticas de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e Manutenção Autônoma (MA), visa aumentar a confiabilidade e a disponibilidade operacional dos equipamentos, assim como a eficiência produtiva, buscando simultaneamente a redução dos custos e a sustentabilidade dos processos produtivos.

Objetivos específicos

- Utilização de sistemas informatizados para o armazenamento e análise de dados relacionados à manutenção e seus custos, aprimorando a gestão da informação.
- Monitorar o desempenho operacional de máquinas e operadores, garantindo o suporte necessário para diagnósticos e melhorias contínuas.
- Correlacionar os dados atuais com registros históricos da empresa, aumentando a confiabilidade e a precisão das análises gerenciais.
- Identificar falhas recorrentes e estabelecer processos de melhoria contínua para melhorar a eficiência da manutenção.
- Avaliar o impacto da gestão de manutenção na produtividade, qualidade dos produtos e sustentabilidade do processo produtivo.

REFERÊNCIA TEÓRICO

Tipos de Manutenções e sua evolução Histórica

A manutenção industrial passou por várias transformações ao longo do tempo, refletindo avanços tecnológicos e a necessidade de atender às demandas crescentes das linhas produtivas. Inicialmente, durante os primórdios da industrialização, predominava o modelo de manutenção corretiva não planejado, caracterizado por atuar de forma reativa: as intervenções eram realizadas somente após a ocorrência de falhas nos equipamentos, o que resultava em altos custos operacionais, baixa disponibilidade dos ativos e impactos negativos na produtividade (Silva, 2023; Costa, 2024).

Com o desenvolvimento industrial, a década de 1950 marcou a introdução da manutenção preventiva, que se caracteriza por inspeções periódicas e substituições programadas de componentes. Essa abordagem trouxe maior controle sobre os equipamentos, interrupções inesperadas e promoveu mais previsibilidade ao processo produtivo, o que resultou em maior eficiência operacional (Silva, 2023).

Posteriormente, nas décadas de 1970 e 1980, a manutenção preditiva emergente, influenciada pelo avanço da automação e da instrumentação industrial. Essa modalidade utiliza o monitoramento contínuo de variações como vibração, temperatura e desgaste para identificar sinais precoces de falhas iminentes, possibilitando intervenções pontuais que otimizem recursos e minimizem custos (Silva, 2023; Costa, 2024).

Paralelamente, desenvolveu-se a filosofia da Manutenção Produtiva Total (TPM), originada no Japão, que propõe uma abordagem colaborativa e integrada entre operadores, engenheiros e gestores para aumentar a confiabilidade dos equipamentos e eliminações. A TPM promove a participação ativa dos funcionários na manutenção autônoma, que compreende atividades básicas de inspeção, limpeza e lubrificação, incentivando a melhoria contínua e a eficiência global dos equipamentos (Nakajima, 1989; Silva, 2023).

Com o advento da Indústria 4.0, a manutenção industrial entrou em uma nova fase, incorporando tecnologias digitais como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, análise de big data e sistemas ciberfísicos. Essa revolução possibilita a implementação da manutenção preditiva avançada e da manutenção prescritiva, que não apenas antecipam falhas com elevada precisão, mas também recomendam ou executam ações corretivas automatizadas, elevando o nível de eficiência e sustentabilidade dos processos produtivos (Costa, 2024; Schwab, 2016).

Além disso, o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) passou a ser um componente essencial da gestão industrial moderna, estruturando e organizando as atividades de manutenção com foco em indicadores como MTTR (Tempo Médio de Reparo) e MTBF (Tempo Médio Entre Falhas). O PCM permite decisões baseadas em dados, promovendo a disponibilidade e confiabilidade dos ativos, ao mesmo tempo em que otimiza custos operacionais (Silva, 2023).

Desta forma, o estudo da evolução dos modelos e práticas de manutenção é fundamental para compreender o cenário atual da gestão da manutenção industrial. A integração progressiva das abordagens tradicionais com as inovações tecnológicas representa um caminho para maximizar a eficiência produtiva, reduzir custos e garantir a sustentabilidade dos processos industriais (Costa, 2024; Silva, 2023).

I) Tipos de Manutenção com suas características e aplicações:

- a. Manutenção Corretiva: intervenção após falha, normalmente não planejada, gerando custos elevados e indisponibilidade;
- b. Manutenção Preventiva: inspeções e trocas programadas em intervalos definidos, reduz falhas inesperadas, mas pode causar trocas desnecessárias;
- c. Manutenção Detectiva: identificação de falhas ocultas.
- d. Manutenção Preditiva: utiliza monitoramento de vibração, termografia, análise de óleo e outros recursos para prever falhas

antes de ocorrerem, otimizando custos;

- e. Manutenção Autônoma: parte integrante da TPM, com atividades básicas de limpeza, inspeção e lubrificação feitas pelos operadores, promovendo maior engajamento;
- f. TPM (Total Productive Maintenance): filosofia japonesa de participação de todos na manutenção, com foco em confiabilidade, qualidade e eliminação de perdas. Maximização da eficiência com participação dos operadores.
- g. Indústria 4.0: Ela utiliza tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), big data, automação e robótica para otimizar a produção

PCM

O Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) é um dos pilares da gestão industrial moderna, sendo responsável por estruturar, organizar e otimizar as atividades de manutenção em uma empresa. A função principal do PCM é garantir que os equipamentos estejam disponíveis e operando com eficiência, de forma segura e com o menor custo possível. Para isso, o PCM atua desde a programação das ordens de serviço até o acompanhamento de indicadores de desempenho, permitindo que as decisões sejam tomadas de forma estratégica e baseadas em dados.

Nesse contexto, os indicadores de manutenção se tornam ferramentas indispensáveis. Eles permitem mensurar a performance dos ativos e do próprio processo de manutenção, auxiliando na identificação de falhas, gargalos e oportunidades de melhoria. Entre os mais relevantes destacam-se o MTTR e o MTBF.

Indicadores da Manutenção (MTTR, MTBF, DISP e OEE)

O **MTTR** mede o tempo médio de reparo de um equipamento, ou seja, o período necessário para corrigir uma falha e restabelecer o funcionamento normal. Esse indicador é fundamental para avaliar a eficiência da equipe de manutenção e a eficácia dos processos de intervenção. Quanto menor o MTTR, mais ágil é a manutenção, contribuindo para a redução das paradas e o aumento da disponibilidade operacional.

Forma de calcular: $MTTR = \text{Tempo total gasto de Reparo} / \text{Número de Reparos.}$

Já o **MTBF** corresponde ao tempo médio entre falhas, representando a confiabilidade do equipamento. Um MTBF elevado indica que a máquina opera por longos períodos sem interrupções, o que reflete maior qualidade, robustez e eficácia das ações preventivas e preditivas aplicadas. Portanto, o MTBF está diretamente ligado à confiabilidade do processo produtivo.

Forma de calcular: $MTBF = \text{Tempo total de bom funcionamento} / \text{Número de falhas}$

A análise conjunta do MTTR e do MTBF fornece uma visão abrangente da manutenção: enquanto o primeiro está associado à manutenibilidade, o segundo se relaciona à confiabilidade dos ativos. Dessa forma, quando integrados ao PCM, esses indicadores permitem que a empresa atue de forma proativa, equilibrando custos, disponibilidade e produtividade.

Assim, a utilização do PCM aliado ao acompanhamento de indicadores como MTTR e MTBF fortalece a gestão da manutenção, promove maior competitividade e assegura que os objetivos estratégicos da organização sejam alcançados de maneira sustentável trazendo um aumento no OEE e Disponibilidade da máquina.

Disponibilidade mede o percentual de tempo em que um equipamento está operacional e disponível para uso, excluindo paradas não planejadas (como falhas) e, às vezes, as planejadas.

Forma de calcular: **Disponibilidade = MTBF / (MTBF + MTTR) x 100%**

OEE – (Overall Equipment Effectiveness) é um indicador de performance que mede a eficiência de máquinas e processos de fabricação.

Forma de calcular: **OEE = %Disp x % Performance x %Qualidade do produto**

Total Productive Maintenance - TPM

A Manutenção Produtiva Total (TPM), foi originada no Japão na indústria Nippondenso, organização responsável por fornecer as peças eletrônicas para a Toyota no começo dos anos 60 no século XX. Nesse período a TPM teve como finalidade proporcionar a metodologia *Just in Time*, por meio da melhoria e credibilidade dos equipamentos (JIPM, 2008). O objetivo desse tipo de manutenção dos equipamentos é eliminar as perdas. No TPM é necessário que tenha investimento na instrução e no conhecimento dos colaboradores, demandando na adesão de algumas ferramentas, tais como conferências, compartilhar os aprendizados e práticas, quadro de tarefas. Segundo Nakajima (1989) a melhor prevenção contra falhas deve partir do operador. É possível observar que são procedimentos de baixos custos e uma respectiva aptidão dos funcionários.

A inserção dessa metodologia auxilia na redução das despesas e no desenvolvimento dos procedimentos, avaliando, supervisionando e extinguindo gradualmente os defeitos identificados no sistema de produção (FERNANDES, 2005). Takahashi et al. (1993) destaca que na aplicação deste método é recomendado que seja de maneira perspicaz, de acordo com as particularidades das organizações.

O TPM é estabelecido em oito pilares, e assim em cada ícone é necessário uma equipe e um líder, obedecendo a hierarquia da indústria, sendo eles:

- manutenção planejada;
- manutenção autônoma;
- manutenção da qualidade;

- melhorias específicas;
- controle inicial;
- treinamento e educação;
- segurança, higiene e meio ambiente;
- áreas administrativas.

A Figura 1 expõe os pilares que amparam a filosofia do TPM.

Figura 1 – Pilares do TPM



2.4.1 – Manutenção Autônoma

Em um ambiente produtivo busca-se melhorar a eficiência dos processos com redução de custos e desperdícios. Uma das metodologias responsáveis por auxiliar as organizações a

alcançar seus resultados em suas linhas de produção é a manutenção autônoma, essa metodologia que envolve a todos os funcionários na melhoria da eficiência dos equipamentos (AHUJA; KUMAR, 2009).

Segundo Suzuki (1993), a manutenção autônoma tem como principais objetivos evitar a deterioração do equipamento por meio de uma operação correta e inspeções periódicas garantindo o equipamento em seu estado ideal e em sua condição padrão com uma gestão adequada para estabelecer condições básicas necessárias de manutenção. Por meio dessa metodologia o funcionário aplica sua força de trabalho para preservar os equipamentos. Dessa forma é possível aumentar a vida útil e eficiência do equipamento.

A manutenção autônoma possuí 7 passos para que se alcance o estado ideal de eficiência do equipamento. Os 3 primeiros passos buscam garantir a limpeza, condição básica e lubrificação do equipamento. Esses passos também são voltados para eliminar fontes de contaminação e áreas de difícil acesso. Nos passos 4 e 5 busca-se inspecionar os pontos trabalhados nos passos anteriores através da inspeção a nível de

componentes. Através do passo 6 integra-se as áreas de trabalho inteiras e os processos de produção, ordenando e organizando materiais e ferramentas, padronizando e gerenciando visualmente todas as atividades (SHIROSE et al., 1999). No último passo encontra-se o controle autônomo da manutenção.

Na Figura 2 tem-se uma representação resumida dos passos de implementação da manutenção autônoma:

Figura 2 – Passos da implementação da manutenção Autônoma



Limpeza inicial do equipamento – Envolve uma limpeza profunda, onde os operadores identificam fontes de sujeira, vazamentos, ruídos e falhas. O objetivo é restaurar o estado básico do equipamento e estimular o cuidado com o ambiente de trabalho.

i. Eliminação das fontes de sujeira e zonas de difícil acesso – Após a limpeza inicial, busca-se eliminar as causas de sujeira e melhorar o acesso a pontos críticos, facilitando inspeções futuras.

ii. Padronização da limpeza, inspeção e lubrificação – São criados checklists padronizados e rotinas diárias que garantem a execução contínua das tarefas básicas de manutenção.

iii. Inspeção geral do equipamento – Os operadores recebem treinamento técnico para identificar anomalias simples, desgastes, folgas e vibrações, antecipando possíveis falhas.

iv. Autonomia nas inspeções – O operador passa a ter domínio total das atividades de inspeção e pequenos ajustes, reduzindo a necessidade de intervenção externa.

v. Organização e controle visual – Utiliza-se a gestão visual (etiquetas, cores, painéis e indicadores) para facilitar o acompanhamento do estado dos equipamentos e das atividades realizadas.

vi. Consolidação e melhoria contínua – Por fim, os operadores tornam-se capazes de propor melhorias contínuas no processo, contribuindo para a eliminação das perdas e falhas reincidentes.

Escopo da Linha de Produção, equipamentos contemplados:

A linha de envase analisada neste estudo é composta por um conjunto de equipamentos interligados e automatizados, projetados para garantir eficiência operacional, qualidade do produto final e segurança durante o processo produtivo. O escopo contempla os seguintes equipamentos principais: Despaletizadora, Enchedora/Recravadora, Pasteurizador, Empacotadora e Paletizadora/Envolvedora.

A operação inicia-se na Despaletizadora, responsável por remover automaticamente as embalagens vazias dos paletes e posicioná-las nas esteiras transportadoras. Essa etapa é essencial para garantir o fluxo contínuo de garrafas, frascos ou latas, reduzindo o manuseio manual e o risco de danos às embalagens.

Em seguida, as embalagens são direcionadas à Enchedora/Recravadora, equipamento que realiza o enchimento preciso do produto e o fechamento hermético das tampas. Essa etapa requer controle rigoroso de volume, pressão e temperatura, assegurando que o produto seja envasado dentro dos padrões de qualidade e segurança alimentar estabelecidos.

O Pasteurizador tem a função de garantir a estabilidade microbiológica do produto por meio do tratamento térmico controlado. Esse processo elimina micro-organismos indesejáveis, preservando as características físico-químicas e sensoriais do produto, sendo fundamental para atender às normas de qualidade e conservação. Tem sido o maior impacto da linha de produção devido as suas quebras.

Após o envase, o produto segue para a Empacotadora, que agrupa as unidades individuais em pacotes ou fardos padronizados. Essa etapa visa otimizar o transporte interno, facilitar a armazenagem e aumentar a produtividade da linha.

Por fim, o processo é concluído pela Paletizadora/Envolvedora, responsável por organizar os pacotes em paletes e aplicar o filme stretch, garantindo a estabilidade das cargas durante o transporte e armazenamento. Essa fase final assegura que os produtos cheguem ao destino com integridade e qualidade preservadas.

A integração entre esses equipamentos permite uma operação contínua, automatizada e eficiente. O controle das etapas é realizado por sistemas eletrônicos e sensores que monitoram o desempenho e sincronizam os tempos de operação. A gestão eficiente dessa linha, aliada à aplicação de práticas de manutenção preventiva, preditiva e autônoma, contribui diretamente para o aumento da confiabilidade dos equipamentos, redução de paradas não programadas e melhoria da produtividade global.

Custos da manutenção e impactos na produção

O gerenciamento eficaz dos custos de manutenção é indispensável para promover a eficiência operacional e financeira em linhas de produção do setor alimentício, pois impacta diretamente fatores como confiabilidade e

disponibilidade dos ativos, conforme Xenos (1998). Quando se adota a manutenção autônoma, estratégia onde operadores realizam tarefas básicas de inspeção, limpeza e pequenos reparos, há uma descentralização das rotinas de manutenção e fortalecimento da cultura de cuidado com os equipamentos.

Segundo a classificação de Kardec e Nascif (2013), os custos de manutenção subdividem-se em:

- **Custos Diretos:** referentes a inspeções e trocas de equipamentos
- **Custos Indiretos:** abrange perdas produtivas na linha de produção e custos administrativos
- **Custos das falhas:** esses custos são ligados às falhas inesperada dos equipamentos.

Na indústria alimentícia, qualquer interrupção na linha de produção, compromete toda a cadeia produtiva e pode ser acompanhada por indicadores como o OEE (Overall Equipment Effectiveness), descrito por Nakajima (1988), que monitora a disponibilidade, desempenho e qualidade dos ativos.

A manutenção autônoma, ao envolver os próprios operadores nas tarefas rotineiras, contribui para identificação precoce de falhas e adoção de ações corretivas rápidas, promovendo a melhoria contínua, abordagem incentivada por Slack et al. (2019). Ademais, a integração de práticas preventivas e preditivas, conforme indicado por Suzuki (1993), diminui o risco de paradas emergenciais, prolonga a vida útil dos equipamentos e, especialmente nas indústrias alimentícias, assegura melhores índices de produtividade, segurança e qualidade dos produtos.

Ferramentas da Qualidade aplicadas à Manutenção

A manutenção industrial tem papel estratégico na garantia da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, impactando diretamente a produtividade e os custos operacionais. Para que a gestão da manutenção seja eficaz, torna-se essencial a utilização de ferramentas da qualidade que possibilitem a análise sistemática de falhas, identificação de causas raízes e implementação de soluções estruturadas. Entre as ferramentas mais utilizadas destacam-se o Diagrama de Ishikawa, 5W2H, PDCA, 5 Porquês, MASP, RCM e FMEA, cada uma oferecendo abordagens específicas para prevenção e resolução de problemas.

I) **Diagrama de Ishikawa:** também conhecido como diagrama de causa e efeito, permite a identificação das causas potenciais de falhas, organizando-as em categorias como método, mão de obra, máquina, material, meio ambiente e medição.

II) **5W2H:** ferramenta de gestão que organiza ações a partir das perguntas What (O quê?), Why (Por quê?), Where (Onde?), When (Quando?), Who (Quem?), How (Como?) e How much (Quanto custa?), sendo eficaz no planejamento e controle de atividades de manutenção.

III) **PDCA**: ciclo de melhoria contínua composto pelas etapas Planejar, Executar, Verificar e Agir. No contexto da manutenção, o PDCA possibilita padronizar processos e promover ajustes contínuos que aumentam a confiabilidade dos equipamentos.

IV) **5 Porquês**: técnica de análise de causa raiz que consiste em questionar repetidamente “por quê?” até identificar o problema central.

V) **MASP** (Método de Análise e Solução de Problemas): metodologia estruturada em oito etapas, da identificação do problema à padronização da solução, permitindo análises detalhadas e implementações de melhorias consistentes.

VI) **RCM** (Manutenção Centrada em Confiabilidade): abordagem que visa assegurar que os ativos mantenham suas funções operacionais, priorizando ações de manutenção com base na criticidade de cada equipamento.

VII) **FMEA** (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos): técnica preventiva que avalia potenciais modos de falha, seus efeitos e causas, atribuindo índices de criticidade que orientam ações preventivas.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se na aplicação integrada de ferramentas e práticas avançadas de gestão da manutenção, com foco na melhoria da confiabilidade operacional de uma linha de produção industrial alimentícia. A abordagem contempla a implementação da Manutenção Autônoma, o uso sistemático do Book CIL, a filosofia da Manutenção Produtiva Total (TPM), os princípios da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e a técnica de Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA).

A Manutenção Autônoma, como pilar da TPM, será aplicada por meio da capacitação dos operadores para realizarem atividades básicas de inspeção, limpeza e lubrificação, promovendo o engajamento direto na preservação dos ativos. Essa prática visa reduzir a dependência exclusiva da equipe de manutenção, antecipar falhas e fortalecer a cultura de responsabilidade compartilhada.

O Book CIL, será utilizado como ferramenta de padronização das rotinas de manutenção autônoma, contendo instruções visuais, rotinas operacionais para cada etapa do processo e procedimentos detalhados para cada atividade designada ao funcionário.

A filosofia TPM, será incorporada como estratégia sistêmica, envolvendo todos os setores da organização na busca pela eficiência global dos equipamentos (OEE). A aplicação dos oito pilares do TPM, com destaque para a melhoria específica e o desenvolvimento de habilidades, contribuirá para a eliminação de perdas e o aumento da produtividade.

A metodologia também contempla a aplicação da RCM, com o objetivo de identificar as funções críticas dos maquinários da linha de produção, os

modos de falha mais relevantes e as consequências associadas. A partir dessa análise, serão definidas ações de manutenção mais adequadas, priorizando intervenções que assegurem a confiabilidade dos ativos e a continuidade operacional. Complementarmente, será realizada a FMEA, visando mapear os modos de falha potenciais, suas causas e efeitos, atribuindo índices de severidade, ocorrência e detecção. Essa técnica permitirá a priorização das ações corretivas e preventivas, contribuindo para a redução de riscos e o aumento da segurança operacional. A integração dessas ferramentas será conduzida por meio de um plano estruturado de PCM, com acompanhamento de indicadores como MTBF, MTTR e OEE. A coleta de dados será realizada em campo, com apoio dos operadores e técnicos, permitindo a análise comparativa entre o cenário atual e os resultados obtidos em sua implementação.

Estudos de Caso: Indústria Alimentícia, Implementação da Manutenção Autônoma e PCM

A Indústria Alimentícia de bebidas Alfa é uma empresa de médio porte localizada no sudeste do Brasil, especializada em bebidas não alcoólicas. Em 2023, a companhia enfrentava altos índices de falhas não planejadas em sua linha de envase, principalmente no Pasteurizador resultando em paradas de produção superiores a 40 horas mensais e um OEE médio de 38,91%, abaixo do padrão internacional de excelência (85%). Para mitigar esses impactos, a empresa implementou um programa integrado de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) aliado à Manutenção Autônoma, dois pilares estratégicos do TPM (Total Productive Maintenance). A metodologia aplicada foi estruturada em três etapas principais:

Diagnóstico Inicial:

- Levantamento de dados de MTTR e MTBF dos últimos 3 meses;
- Identificação dos modos de falha mais recorrentes do equipamento que foi cabeça do Pareto – Pasteurizador (Travamento da malha)
- Mapeamento de gargalos operacionais.

Implementação de Práticas de Manutenção Autônoma:

- Treinamento dos operadores para inspeção, limpeza e lubrificação (Book CIL)
- Implantação de checklists padronizados
- Introdução de controles visuais e indicadores na linha de produção.

Monitoramento e Indicadores:

- Acompanhamento de OEE, MTBF e MTTR;
- Aplicação de ferramentas da qualidade (Ishikawa, 5 Porquês e PDCA);
- Reuniões semanais entre operadores e equipe de manutenção.

A imagem 3 a seguir do cenário atual através do sistema LMS da empresa.

Imagen 3 - Estratificação dos indicadores de manutenção



Após 3 meses de implementação, os resultados foram expressivos:

- Redução no tempo de parada não programada;
- Aumento do MTBF em 60%;
- Redução do MTTR em 35%;
- Melhoria da confiabilidade e disponibilidade operacional para 98,86%;
- Aumento do OEE para 50,04%.

Esses números aproximam a empresa dos padrões internacionais e demonstram a eficácia da integração entre manutenção autônoma e PCM. A Imagem 4 a seguir da evolução dos indicadores.

Imagen 4 - Estratificação da evolução dos indicadores



Aplicação Prática 5PQS e 6M para a causa raiz da quebra da máquina Pasteurizador da linha de produção.

A aplicação das ferramentas 5 Porquês e 6M foi realizada com foco na máquina Pasteurizador, visando identificar as causas principais de falhas operacionais e propor ações corretivas eficazes. Inicialmente, utilizando o método dos 5 Porquês, analisou-se a recorrência de paradas não programadas por travamento da esteira. A investigação revelou que o problema estava relacionado à falha operacional e peça, causada por falta de inspeção da malha e falta de peça para reposição. Como ação corretiva, definiu-se a inclusão de inspeções semanais e plano de manutenção preventiva. Em complemento, aplicou-se o Diagrama 6M (Método, Mão de Obra, Máquina, Material, Meio Ambiente e Medição) para avaliar outros fatores que poderiam contribuir para a instabilidade do processo.

Análise do problema

A causa raiz identificada foi a ausência da execução do Padrão operacional, não realizando a manutenção corretamente quando necessário. Como solução, propõe-se a implementação de um treinamento sobre o plano e manutenção autônoma, estruturado com apoio do 5PQS e Diagrama 6M para definição de responsáveis, frequência das atividades e recursos necessários. Essa aplicação evidencia como ferramentas da qualidade auxiliam a transformar dados e problemas observados na manutenção em ações concretas, promovendo maior confiabilidade, disponibilidade operacional e redução de custos. A imagem a seguir de uma análise de 5PQS e 6M.

Imagen 5 – Análise ddo 5PQS e 6M.

5 Porquês

Clareza e propósito da investigação: ★★★★★

Primeiro Porquê
Piso M540 superior esquerdo travo em produção

Segundo Porquê
Malha travada na entrada pasteurizador apresentando anomalia

Terceiro Porquê
Roda retorno dasalinho malha gerando sobre carga malha

Quarto Porquê
Ocasionalmente rompimento módulo

Quinto Porquê
Módulo Malha travando na roda retorno

Causa raiz

Coerência da causa raiz: ★★★★★

Causa raiz encontrada
Manutenção Corretiva - Priorização
Manutenção Corretiva - Priorização
6M

MÃO DE OBRA MÉTODO

Solução para correção do problema

Após a análise do problema ocorrido no Pasteurizador, identificou-se que a causa principal da falha estava relacionada à quebra da malha durante o processo do equipamento, o que comprometeu o funcionamento do sistema e ocasionou paradas inesperadas na linha de envase. Como solução, foram implementadas ações corretivas e preventivas, incluindo a realização de treinamento específico com a equipe de manutenção e operação, abordando os cuidados necessários no manuseio da malha do equipamento, além da criação de um plano de inspeção semanal para verificação das condições da malha e dos componentes associados. A imagem a seguir da causa raiz e ações preventivas.

Imagen 6 – Ações para causa Raiz do 5PS:

Causa raiz

Coerência da causa raiz: ★★★★★

Causa raiz encontrada
Manutenção Corretiva - Priorização
Manutenção Corretiva - Priorização
6M

Comentário sobre a causa raiz encontrada
Módulo lateral com anomalia travada na roda retorno

Ações preventivas

Relevância das ações propostas: ★★★★★

Ações sugeridas
#SWIY Programa semanal inspeção malhas do pasteurizador em todo PCM e oportunidades com linha parada

Responsável	Data de execução	Reunião	Status da ação
RICARDO MATA DINIZ	02/04/2025	Segurança/Meio Ambiente OWC	● Backlog ●

Indústria 4.0 e Manutenção Preditiva

A Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) é definida pela fusão de mundos físico e digital através da integração de sistemas ciberfísicos, viabilizando ambientes de manufatura inteligente e altamente responsivos (SCHWAB, 2016). Essa transformação tem um impacto direto na gestão de ativos, impulsionando a transição de modelos de manutenção reativos para estratégias proativas e preditivas, fundamentadas em dados.

No contexto da linha de produção analisada, onde a eficiência depende da interconexão entre ativos como a Despaletizadora, o Pasteurizador e a Paletizadora, a Manutenção Preditiva emerge como a estratégia ideal para garantir a fluidez do processo. A Paletizadora, sendo a etapa final da linha — responsável por organizar e despachar o produto acabado —, tem seu desempenho diretamente atrelado ao OEE. Sua falha não só interrompe a expedição como também causa o acúmulo de produto nas etapas anteriores, paralisando toda a cadeia a montante.

A manutenção preditiva na era 4.0 utiliza tecnologias como sensores de Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial (IA) (LEE et al., 2014) para monitorar continuamente o estado de componentes críticos da Paletizadora (como braços robóticos ou sistemas de elevação). Essa coleta e análise de dados em tempo real permitem:

Prever o desgaste: Identificando anomalias na vibração ou temperatura antes que causem a parada da máquina.

Otimizar a intervenção: Programando a manutenção no momento ideal, minimizando o tempo de inatividade e evitando o alto custo induzido da paralisação de toda a linha.

Dessa forma, a implementação de práticas de PCM e Manutenção Autônoma no presente estudo de caso representa um passo fundamental na adoção de uma cultura mais próxima dos princípios da Indústria 4.0, ao transferir a inspeção básica para o operador e estruturar o planejamento para futuras intervenções baseadas em dados.

CONCLUSÃO

O objetivo deste artigo foi descrever um Estudo de Caso focado em otimizar o desempenho de um equipamento na linha de produção, na indústria alimentícia, por meio da integração estratégica do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) e da Manutenção Autônoma (MA). A questão de pesquisa foi respondida com a proposta de um plano de ação que transforma a cultura operacional, transferindo aos operadores a responsabilidade pela conservação primária, conforme a filosofia do Total Productive Maintenance (TPM), cuja aplicação é sustentada por autores como Nakajima (1989). Os principais resultados esperados do plano-piloto são o aumento da Confiabilidade e da Disponibilidade do ativo, com reflexos positivos na Eficiência Global do Equipamento (OEE), e a consequente redução de custos de manutenção.

A principal conclusão que se pode extrair do estudo é que a Manutenção Autônoma transcende a esfera técnica de limpeza e inspeção: ela é uma estratégia de gestão humanizada de ativos. Ao inserir o operador como protagonista da conservação e do monitoramento proativo, o TPM e a MA elevam a eficiência da manutenção como fator estratégico e, simultaneamente, promovem o engajamento e a valorização do conhecimento tácito dos colaboradores, aumentando a capacidade de competição da manufatura.

Como continuidade de pesquisa, aponta-se a necessidade de realizar a validação do plano de ação proposto, acompanhando sua implementação para mensurar os impactos reais nos indicadores de desempenho (OEE, MTTR, MTBF) e a evolução do clima organizacional. Outra oportunidade reside em explorar a integração dos princípios da MA com conceitos da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. Manutenção Função Estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

VIANA, H. R. G. Planejamento e controle da manutenção. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. Manutenção Função Estratégica. 4. ed Rio de Janeiro: Qualitymark, 440 p. 2013

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e mantinabilidade – Terminologia. Rio de Janeiro, 1994.

MARTINS, P. G. Administração da Produção. São Paulo: Saraiva, 2012.

TAVARES, L. A. Administração moderna de manutenção. Rio de Janeiro: Novo Pólo, 2001.

DA SILVA NETO, J. C.; GONÇALVES DE LIMA, A. M. Implantação do controle de manutenção. Revista Club de Mantenimiento, n. 10, 2002.

SIQUEIRA, I. P. Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção preditiva na Indústria 4.0. Scientia cum Industria, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.

KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção – Função Estratégica. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

NAKAJIMA, S. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge: Productivity Press, 1989.

XENOS, H. G. Gerenciando a manutenção produtiva. Rio de Janeiro: INDG, 1998.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. Revista Gestão Industrial, v. 4, n. 2, p. 1- 16, 2008.

PEREIRA, M. J. Engenharia de manutenção: teoria e prática. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

GUIMARÃES, G. D. G. A importância da utilização de ferramentas de gestão de manutenção para aumentar a disponibilidade e confiabilidade de uma empresa mineradora de Serra do Salitre: um estudo de caso. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Finom de Patos de Minas.

SILVA, Marlon. Custos da manutenção: implementação e gestão da técnica de manutenção preventiva checklist e seus impactos. [S.I.]: [s.n.], 2023. Trabalho acadêmico.

GACAPPI, [Autor]. Análise da eficiência operacional com base em indicadores de manutenção. [S.I.]: [s.n.], 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

BÜCHI, G.; CUGUERÓ-ESCOFET, N.; ABREU, A. Digitalization in the manufacturing industry: Challenges and opportunities. *Computers in Industry*, v. 123, p. 103–150, 2020.

KANG, H. S. et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, v. 3, n. 1, p. 111–128, 2016.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18–23, 2014.

LU, Y. et al. 5G and Industrial IoT: A review of applications, challenges, and future trends. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 16, n. 8, p. 4808–4819, 2020.

MAYER-SCHÖNBERGER, V.; CUKIER, K. *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013.

SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.

TAO, F. et al. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 61, p. 101837, 2019.

WAN, J. et al. Industrial IoT with blockchain technology in distributed cloud: A review. *IEEE Access*, v. 4, p. 1101–1111, 2016.

NAKAJIMA, S. *Introduction to TPM*. Productivity Press, 1989.

BÜCHI, G.; CUGUERÓ-ESCOFET, N.; ABREU, A. *Digitalization in the manufacturing industry: Challenges and opportunities*. Computers in Industry, 2020.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. *Manutenção: Função Estratégica*. Qualitymark, 2013.

SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. Edipro, 2016.

SILVA, Marlon. Custos de manutenção: melhoria e gestão da técnica de manutenção preventiva checklist e seus impactos. [S.I.]: [s.n.], 2023. Trabalho acadêmico.

COSTA, HP da. *Manutenção Industrial: inovação e tecnologias*. São Paulo: Editora Técnica, 2024.

CAPÍTULO 2

TRANSFORMAÇÃO DE PROCESSOS E QUALIDADE: O PAPEL DO TPM NA MICHELIN

Diana dos Reis Azevedo de Souza

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
dianasousa@souunisuam.com.br

Leticia de Souza Brito Sobral

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
leticiasobral@souunisuam.com.br

Milena da Silva Veiga

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
milenaveiga@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM),
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

O estudo avaliou a aplicação de práticas avançadas de manutenção em uma planta industrial da Michelin, com foco em reduzir falhas recorrentes e aumentar a eficiência produtiva. O desafio dos recalls, que impacta tanto a produtividade quanto a reputação das empresas, motivou a necessidade de fortalecer os processos de manutenção e criar uma cultura de prevenção. A pesquisa, de caráter descritivo e aplicado, analisou indicadores como MTTR, MTBF e OEE para medir os resultados após a implementação das novas práticas. Os resultados revelaram uma melhoria significativa no desempenho operacional, na confiabilidade dos processos e na comunicação entre as equipes. O uso de tecnologias inteligentes, junto com a capacitação dos funcionários e a padronização dos procedimentos, foi fundamental para estabelecer a cultura de melhoria contínua, reforçando a sustentabilidade e a competitividade da manutenção industrial.

Palavras-chave: Indústria automotiva; Melhoria contínua; Confiabilidade; Manutenção produtiva total; Padronização de processos.

INTRODUÇÃO

A manutenção industrial tem um papel essencial na busca por eficiência, segurança e confiabilidade dentro da indústria automotiva. Quando ocorrem falhas operacionais com frequência, a produtividade é afetada e a credibilidade das empresas fica em risco. Um dos exemplos mais críticos desses impactos são os recalls, que geram altos custos financeiros e comprometem a imagem da marca perante o mercado. Segundo (ALONSO, REY e LOPEZ, 2013), esses desafios mostram a importância de adotar processos de manutenção estruturados e de fortalecer uma cultura de prevenção, capaz de reduzir falhas e aumentar a confiabilidade dos equipamentos.

Com o avanço da tecnologia e a crescente complexidade dos sistemas produtivos, as exigências por produtos seguros e sustentáveis se tornaram ainda maiores. Nesse cenário, integrar pessoas, processos e tecnologia é fundamental para garantir melhores resultados. O uso de indicadores de desempenho auxilia na avaliação dos resultados, na identificação de melhorias e na tomada de decisões mais assertivas dentro da gestão de manutenção. De acordo com (SILVA, CARVALHO e PEREIRA, 2019), o avanço de tecnologias inteligentes, como sensores e sistemas automatizados, têm contribuído significativamente para o aumento da eficiência e confiabilidade nas operações industriais.

Dessa forma, este estudo analisa a aplicação de práticas avançadas de manutenção em uma planta industrial da Michelin, avaliando os impactos obtidos em desempenho produtivo, redução de falhas e na formação de uma cultura voltada à melhoria contínua. Os resultados mostram que a combinação entre capacitação das equipes, padronização de processos e inovação tecnológica se destaca como um diferencial estratégico para a competitividade e a sustentabilidade da manutenção moderna.

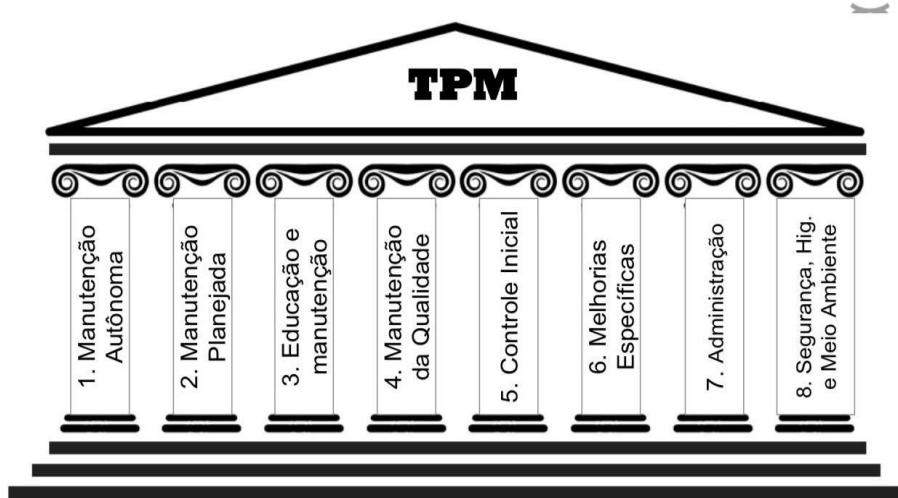
REFERENCIAL TEÓRICO

TIPOS DE MANUTENÇÃO E MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL

A manutenção industrial pode ser dividida em três principais tipos: corretiva, preventiva e preditiva, cada uma com suas vantagens e limitações específicas (RIBEIRO, 2009). A Manutenção Produtiva Total (MPT), originada do conceito de Total Productive Maintenance, tem como objetivo envolver os operadores diretamente no cuidado com os equipamentos, estimulando a autonomia e a conscientização quanto à importância de reduzir falhas e aumentar a confiabilidade dos processos (NAKAJIMA, 1988). Essa metodologia valoriza a participação de todos os níveis da organização, fortalecendo uma cultura voltada para a melhoria contínua e a prevenção de problemas envolvendo a todos, desde operadores até gestores à responsabilidade do desempenho da máquina.

A base do TPM é formada por oito pilares que orientam suas ações e refletem os pontos-chave para alcançar eficiência total e melhoria contínua. A Figura 1 ilustra essa estrutura de forma clara.

Figura 1 – Os oito pilares do TPM



Fonte: Leonardo Amaral

Esses pilares englobam ações que vão desde a manutenção autônoma e planejada até a gestão da qualidade, da segurança e do meio ambiente. Juntas, essas dimensões sustentam a filosofia do TPM e orientam as práticas de melhoria contínua nas empresas industriais.

Além disso, o TPM se integra aos principais tipos de manutenção industrial, que estão descritos na Tabela 1, apresentando suas definições, vantagens e riscos associados.

Tabela 1 – Principais tipos de manutenção industrial

Tipo de Manutenção	Definição	Vantagens	Desvantagens / Riscos
Corretiva	Realizada após a falha ocorrer.	Soluciona o problema imediato, exige menor planejamento inicial.	Paradas não programadas, custos elevados, possíveis recalls.
Preventiva	Executada em intervalos regulares para evitar falhas.	Maior confiabilidade, redução de	Pode gerar manutenção desnecessária e custos altos.

Preditiva	Baseada em monitoramento contínuo e dados de condição.	paradas inesperadas. Reduz desperdícios, intervém apenas quando necessário.	Requer investimento em tecnologia e qualificação.
Autônoma	Operadores cuidam de inspeções básicas e pequenos reparos.	Engaja equipes, detecta falhas rapidamente.	Exige mudança cultural e treinamentos constantes.
TPM (Total Productive Maintenance)	Filosofia integrada envolvendo todos na manutenção.	Aumenta eficiência global, reduz recalls, promove melhoria contínua.	Complexa de implementar, depende do engajamento total.

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2009).

CICLOS DE MELHORIA CONTÍNUA E APLICAÇÃO DO PDCA

Entre as ferramentas que apoiam esse processo está o ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act), amplamente utilizado na gestão da qualidade. Sua aplicação na manutenção ajuda a identificar as causas de falhas, testar soluções e padronizar práticas eficazes, contribuindo para o aperfeiçoamento constante dos processos (GALHARDO, 2022).

GESTÃO DA QUALIDADE TOTAL E ISO 9001

A Gestão da Qualidade Total (TQM) e a norma ISO 9001 complementam o TPM ao padronizar procedimentos, reduzir a variabilidade dos resultados e definir indicadores de desempenho que permitem acompanhar a evolução das melhorias. Esses instrumentos consolidam uma cultura de qualidade e rastreabilidade, reforçando a busca por eficiência e consistência nas operações (SLACK ET AL., 2020).

INDÚSTRIA 4.0 E MANUTENÇÃO PREDITIVA

Com o avanço da Indústria 4.0, o campo da manutenção industrial passou por uma verdadeira transformação. O uso de sensores inteligentes, tecnologia IoT (Internet das Coisas) e análise de dados em tempo real permite prever falhas antes que elas aconteçam, tornando possível uma atuação preventiva e aumentando significativamente a confiabilidade e a produtividade dos ativos KUMAR ET AL., 2023). Essa integração entre tecnologia e gestão vem redefinindo a forma como as empresas cuidam de seus processos e garantem a continuidade operacional.

3. METODOLOGIA

Este estudo foi realizado a partir de uma simulação acadêmica, usando dados criados especialmente para a pesquisa. Essas informações foram baseadas em referências do setor industrial e mostram indicadores de desempenho, falhas e paradas de máquinas, com o objetivo de entender como práticas avançadas de manutenção podem influenciar a confiabilidade e a eficiência da produção.

Para calcular os indicadores MTTR (Tempo Médio de Reparo), MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) e OEE (Eficiência Global do Equipamento), foram usados dados simulados referentes a um turno de 8 horas por dia, durante 22 dias úteis no mês. Nesse período, ocorreram cinco paradas críticas, com duração entre 1 e 6 horas, totalizando 15 horas de produção parada; registraram-se também cinco falhas, uma produção de 1.000 unidades e 50 unidades defeituosas.

Os valores e resultados detalhados estão apresentados na tabela a seguir, que mostra os indicadores antes e depois da implementação das práticas de manutenção simuladas. Os dados “Antes” foram adaptados dos estudos de (ALMEIDA e RODRIGUES, 2016 e MEGIOLARO, 2020), ajustados para esta pesquisa, e refletem as melhorias esperadas após a adoção das novas práticas.

Tabela 2 – Dados simulados para cálculo dos indicadores de manutenção

Indicador	Antes da aplicação	Depois da aplicação	Variação (%)
MTTR (Tempo médio de reparo)	4,2 horas	2,1 horas	-50%
MTBF (Tempo médio entre falhas)	65 horas	105 horas	+61,5%
OEE (Eficiência global do equipamento)	70%	85%	+15%

Cálculos dos Indicadores de Desempenho

MTTR (Tempo médio de reparo)

$$MTTR = \frac{\text{Tempo total de reparo (h)}}{\text{Número de falhas}}$$

- Antes: 21 h / 5 falhas = 4,2 h
- Depois: 10,5 h / 5 falhas = 2,1 h

MTBF (Tempo médio entre falhas)

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de operação (h)}}{\text{Número de falhas}}$$

- Antes: 325 h / 5 falhas = 65 h
- Depois: 525 h / 5 falhas = 105 h

OEE (Eficiência global do equipamento)

$$OEE = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

- Antes: $0,85 \times 0,90 \times 0,91 = 0,70 \rightarrow 70\%$
- Depois: $0,92 \times 0,94 \times 0,98 = 0,85 \rightarrow 85\%$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a aplicação das metodologias TPM e do ciclo PDCA, a Michelin obteve melhorias expressivas tanto na manutenção quanto na produção. Após seis meses de implantação, as falhas repetitivas foram reduzidas em aproximadamente 58%, o tempo médio de reparo (MTTR) caiu cerca de 25%, e o tempo médio entre falhas (MTBF) aumentou em torno de 40%. Como consequência, o índice de eficiência global (OEE) evoluiu de 70% para 88%, o que demonstra que os equipamentos passaram a operar com maior disponibilidade e produtividade. Resultados semelhantes também foram observados por (DREWNIAK e DREWNIAK, 2022), que apontaram ganhos significativos de desempenho após a adoção do TPM.

Os custos com paradas não programadas, que antes geravam perdas mensais próximas de R\$25.500,00, diminuíram de forma considerável após as melhorias. Essa redução ocorreu principalmente porque a empresa passou a utilizar rotinas padronizadas de inspeção, acompanhadas de checklists diários, o que tornou o controle mais eficiente e ajudou a prevenir falhas recorrentes. De acordo com (GALHARDO, 2022), a padronização dos processos é uma das estratégias mais eficazes para evitar retrabalhos e desperdícios, além de contribuir para a estabilidade operacional.

Outro resultado importante foi o maior envolvimento dos operadores nas atividades de manutenção. Com o TPM, eles passaram a participarativamente das tarefas básicas de cuidado com os equipamentos, criando um ambiente mais colaborativo e com responsabilidade compartilhada. Essa

mudança fortaleceu a comunicação entre os setores e impulsionou a cultura de melhoria contínua, como destacam (NAKAJIMA, 1988 e RIBEIRO, 2009) em seus estudos.

A Michelin também avançou na adoção de tecnologias da Indústria 4.0, implementando sensores inteligentes e sistemas de monitoramento remoto que ajudam a identificar falhas antes que causem paradas inesperadas. Essas ferramentas permitem prever problemas e agir de forma preventiva, aumentando a confiabilidade dos equipamentos e reduzindo o tempo de inatividade. Segundo (KUMAR ET AL, 2023), o uso de dados em tempo real e análise inteligente de sensores vem revolucionando a manutenção industrial, tornando-a mais ágil e eficiente.

De forma geral, os resultados comprovam que a integração entre TPM, PDCA e tecnologia trouxe ganhos reais de produtividade, confiabilidade e engajamento para a empresa. No entanto, é fundamental manter os treinamentos das equipes, padronizar as práticas e organizar os dados de manutenção para garantir que esses resultados sejam sustentáveis a longo prazo. Com essas ações, a Michelin reforça seu compromisso com a qualidade, a inovação e a melhoria contínua em seus processos produtivos.

ESTUDO DE CASO

A planta industrial enfrentava um aumento nas paradas não programadas e pouco engajamento nas inspeções preventivas. O desafio era mudar esse quadro por meio de metodologias de manutenção bem estruturadas e inovação tecnológica. Para isso, a empresa dividiu o plano em quatro etapas: diagnóstico inicial, treinamento das equipes, uso de ferramentas de qualidade e monitoramento digital. Sensores foram instalados em pontos estratégicos para antecipar falhas e agir de forma preventiva.

Após seis meses, a Michelin conseguiu reduzir as paradas em 60%, aumentar a eficiência em 15% e promover uma melhor integração entre as equipes. Esses resultados mostram que a combinação de capacitação, processos padronizados e tecnologia avançada traz ganhos reais em produtividade e confiabilidade.

No cenário internacional, outras empresas do setor automotivo adotam caminhos parecidos. (NAKAJIMA, 1988) aponta que a Toyota usa o Kaizen junto com o TPM para eliminar desperdícios e dar mais autonomia aos operadores. (SCHMIDT e KOCH, 2021) destacam que a BMW cortou até 40% dos custos de manutenção ao investir em sensores inteligentes e análises preditivas. Essas práticas confirmam que a Michelin está alinhada com as principais tendências globais de excelência industrial. A experiência mostra

que o ponto forte da manutenção moderna está na união entre pessoas treinadas, processos organizados e tecnologia, criando uma cultura de melhoria contínua e resultados duradouros.

CONCLUSÃO

A integração das metodologias de manutenção com as ferramentas de melhoria contínua permitiu que a Michelin alcançasse ganhos significativos em eficiência e fortalecesse uma cultura voltada para a excelência operacional. Os resultados mostraram que a manutenção deixou de ter um papel apenas corretivo, passando a ser estratégica, com foco na prevenção, inovação e confiabilidade dos processos produtivos. A redução das paradas não programadas, o aumento da eficiência e o maior envolvimento dos operadores confirmam que o modelo adotado é eficaz tanto do ponto de vista técnico quanto organizacional.

Ficou evidente que o sucesso não depende apenas da aplicação das ferramentas, mas da integração entre pessoas, processos e tecnologia. O comprometimento das equipes, aliado à padronização das práticas e ao uso de tecnologias inteligentes, mostrou-se essencial para manter resultados sustentáveis ao longo do tempo. Dessa forma, este estudo reforça que a manutenção moderna deve ser entendida como um diferencial competitivo e um fator estratégico para a indústria automotiva, contribuindo para a qualidade, a inovação e a continuidade produtiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, J.; REY, M.; LOPEZ, C. Trend analysis of car recalls: evidence from the US market. ResearchGate, 2013.

Acesso em: 4 set. 2025.

DREWNIAK, J.; DREWNIAK, P. *The impact of TPM implementation on production efficiency: A case study*. Journal of Maintenance Engineering, 2022.

Acesso em 16 out. 2025.

GALHARDO, L. M. Análise e aplicabilidade da manutenção para melhoria contínua em uma indústria do setor automobilístico. 2022.

Acesso em: 11 set. 2025.

GARCÍA, J. A.; CRESPO, A.; MARTÍN, J. Intelligent predictive maintenance in the context of Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 69, p. 196–210, 2023.

Acesso em: 02 out. 2025.

KUMAR, S. et al. Predictive maintenance using IoT and machine learning: A systematic review. *Sensors*, v. 23, n. 5, p. 1–18, 2023.

Acesso em: 02 out. 2025.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3–8, 2015.

Acesso em: 02 out. 2025.

MEGIOLARO, Marcello Rodrigo de Oliveira. *Indicadores de manutenção industrial relacionados à eficiência global de equipamentos*, 2020.

Acesso em 22 out 2025.

NAKAJIMA, Seiichi. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge: Productivity Press, 1988.

Acesso em 09 out. 2025.

PARIDA, A.; KUMAR, U. Maintenance performance measurement (MPM): Issues and challenges, 2006.

Acesso em: 24 set. 2025.

RIBEIRO, Celso Ricardo. Processo de implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM) na indústria brasileira. 2009.

Acesso em: 4 set. 2025.

RODRIGUES, Thiago de Almeida; Seleme, Robson; Cleto, Marcelo Gechele. *Processo de tomada de decisão quanto à política de manutenção*, 2016.

Acesso em 22 out 2025.

SCHMIDT, Thomas; KOCH, Andreas. *Smart Maintenance in Automotive Industry: Predictive Analytics and Efficiency*. Munich: Springer Verlag, 2021.

Acesso em: 09 out. 2025.

SILVA, R.; CARVALHO, L.; PEREIRA, F. Impacto dos recalls voluntários na confiança do consumidor: um estudo de caso na indústria automotiva. *Revista Brasileira de Marketing*, v. 18, n. 2, p. 45-62, 2019.

Acesso em: 4 set. 2025.

CAPÍTULO 3

TPM E DESEMPENHO EM MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM EQUIPAMENTO DE UMA INDÚSTRIA REFRATÁRIA

Cleyse da Silva dos Santos

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
cleysessantos@souunisuam.com.br

Lorena Arigoni Vannucci

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
lorena.vannucci@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM),
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

Este artigo teve como base a análise da importância da manutenção industrial para garantir a confiabilidade e eficiência dos processos produtivos, especialmente em indústrias refratárias, onde a continuidade operacional é essencial para o desempenho e a segurança. O estudo foca na análise da manutenção aplicada a um elevador de canecas utilizado no transporte de matérias-primas refratárias, examinando suas falhas recorrentes, os impactos na produtividade e as possíveis estratégias de melhoria. Busca-se compreender a relevância da gestão da manutenção no contexto produtivo, relacionando conceitos teóricos à prática industrial, com o objetivo de propor soluções que reduzam paradas não programadas e aumentem a disponibilidade e eficiência dos equipamentos.

Palavras-chave: TPM; Indicadores de manutenção; Indústria refratária; OEE; Eficiência operacional.

INTRODUÇÃO

A manutenção desempenha um papel estratégico dentro das organizações industriais, sendo um fator determinante para a competitividade e sustentabilidade dos processos produtivos. Com o avanço das tecnologias e o aumento das exigências por eficiência e qualidade, a gestão da manutenção passou de uma atividade corretiva para uma abordagem planejada e integrada, alinhada aos objetivos da empresa. No contexto das indústrias refratárias, a confiabilidade dos equipamentos é crucial, uma vez que falhas podem comprometer não apenas o fluxo produtivo, mas também a integridade dos produtos e a segurança dos colaboradores. O elevador de canecas, componente essencial no transporte vertical de matérias-primas, é frequentemente sujeito a desgastes e falhas que exigem atenção sistemática e estratégias de manutenção adequadas. Assim, compreender as causas e os impactos dessas falhas torna-se essencial para aprimorar a disponibilidade do equipamento, reduzir custos e aumentar a eficiência operacional.

OBJETIVO GERAL

Analizar o sistema de manutenção aplicado ao elevador de canecas de uma indústria refratária, identificando falhas recorrentes, seus impactos na produção e propondo melhorias que contribuam para a eficiência e confiabilidade do equipamento.

Objetivo específico

- Identificar os principais tipos de manutenção aplicáveis ao equipamento e suas características.
- Levantar as causas mais comuns de falhas no elevador de canecas e seus efeitos no processo produtivo.
- Analisar os custos e impactos das falhas sobre a disponibilidade do sistema.

Propor melhorias no planejamento e controle das atividades de manutenção, buscando maior confiabilidade e redução de paradas.

JUSTIFICATIVA

A escolha do elevador de canecas como objeto de estudo justifica-se pela sua importância no fluxo produtivo da indústria refratária e pela frequência de falhas que afetam diretamente a eficiência da linha. O aprimoramento da gestão da manutenção desse equipamento pode resultar em benefícios significativos, como a redução de custos operacionais, o aumento da vida útil dos componentes e a elevação dos índices de desempenho produtivo. Além disso, o estudo contribui para o fortalecimento da cultura de manutenção planejada e contínua dentro da organização, alinhando-se às práticas modernas de gestão da qualidade e produtividade industrial.

REFERENCIAL TEÓRICO

Conceitos e tipos de manutenção

A manutenção industrial pode ser compreendida como o conjunto de ações técnicas e administrativas destinadas a garantir que os equipamentos, instalações e sistemas mantenham suas funções dentro de padrões aceitáveis de desempenho e segurança (XENOS, 1998). De acordo com Slack et al. (2019), a manutenção é um elemento essencial do desempenho operacional, sendo determinante para a confiabilidade, a disponibilidade e a produtividade dos processos industriais.

Historicamente, a manutenção evoluiu de um modelo reativo, centrado na correção de falhas, para abordagens cada vez mais estratégicas, integradas e orientadas à prevenção e melhoria contínua (CAMPOS, 2004). Essa evolução pode ser observada em cinco principais fases: corretiva, preventiva, preditiva, autônoma e produtiva total (TPM).

- Manutenção corretiva: é caracterizada pela execução de reparos apenas após a ocorrência da falha. Segundo Kardec e Nascif (2013), trata-se de um tipo de manutenção indispensável, porém onerosa, já que as falhas não planejadas geram paradas de produção, perda de produtividade e, em alguns casos, riscos à segurança.
- Manutenção preventiva: busca reduzir a probabilidade de falhas por meio de inspeções e substituições programadas de componentes, conforme tempo ou uso. Essa abordagem, conforme Moubray (1997), representa uma mudança de paradigma, pois visa atuar antes da falha, diminuindo custos indiretos e aumentando confiabilidade dos equipamentos.
- Manutenção preditiva: baseia-se em técnicas de monitoramento da condição dos equipamentos (como análise de vibração, termografia e ultrassom), permitindo prever falhas antes que elas ocorram (SOUZA; LOPES, 2016). Essa modalidade está alinhada ao conceito de manutenção inteligente, amplamente discutido no contexto da Indústria 4.0, em que sensores e sistemas digitais coletam dados em tempo real para otimizar intervenções (LEE et al., 2015).
- Manutenção autônoma: é um dos pilares da TPM e envolve a participação direta dos operadores nas atividades de manutenção básica, como limpeza, inspeção e lubrificação (NAKAJIMA, 1988). Essa prática promove senso de responsabilidade, reduz falhas simples e fortalece a cultura de cuidado com os equipamentos.

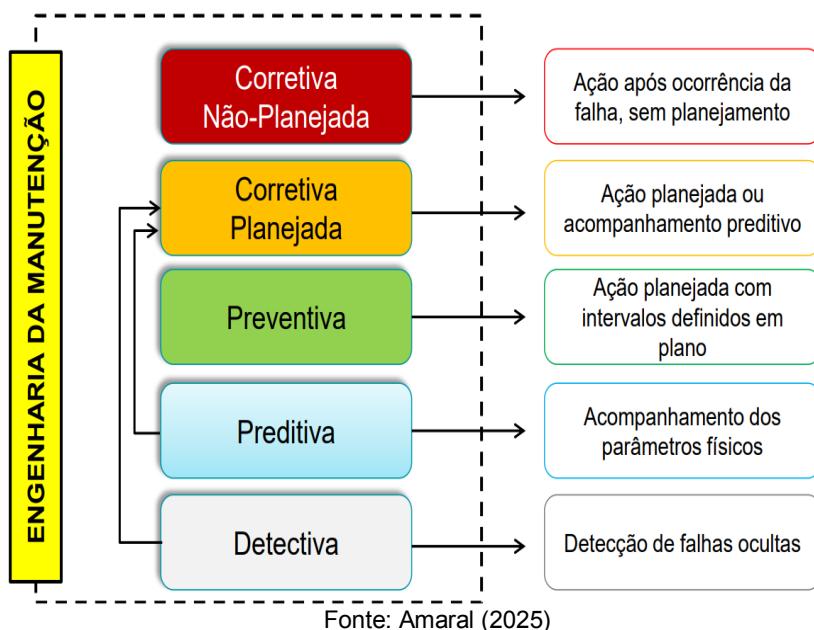
Por fim, a Manutenção Produtiva Total (TPM) surge como uma filosofia que integra a manutenção à estratégia de produção, buscando zero falhas, zero defeitos e zero acidentes. Segundo Suzaki (1993), a TPM amplia o papel da manutenção de uma função de suporte para uma atividade estratégica, estimulando a melhoria contínua e a colaboração entre todos os setores da empresa.

No cenário atual, a manutenção é entendida como um fator estratégico dentro das organizações industriais, especialmente em sistemas

produtivos de alta complexidade, como os encontrados em indústrias refratárias, vemos na Figura 1 uma explicação clara de como os tipos de manutenção são divididos. O foco não se limita à correção de falhas, mas se estende à criação de processos sustentáveis, confiáveis e eficientes, que assegurem a continuidade operacional e a competitividade do negócio.

Figura 1 – Os tipos de manutenção

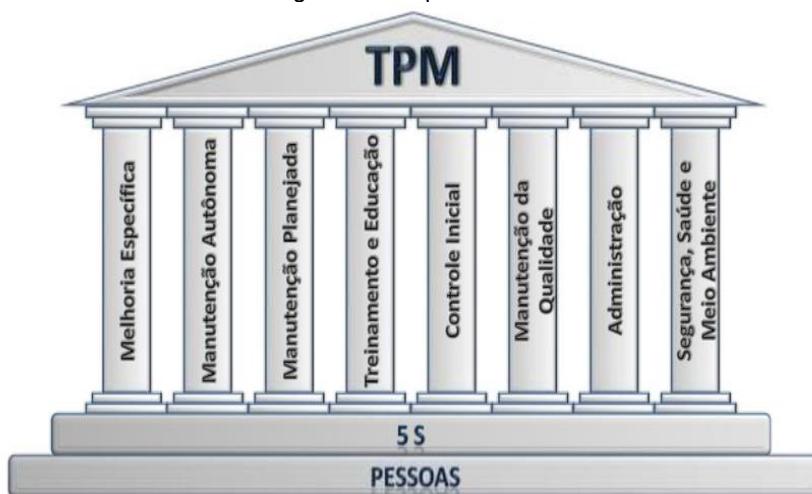
Tipos de Manutenção



Total Productive Maintenance (TPM) e seus pilares

A TPM é uma metodologia de gestão da manutenção criada no Japão na década de 1970, com o objetivo de maximizar a eficiência dos equipamentos, reduzir falhas e perdas, e envolver toda a organização no cuidado com os ativos produtivos (NAKAJIMA, 1989), a estrutura da metodologia é dividida conforme vemos na Figura 2. Diferente da manutenção tradicional, a TPM integra operadores, equipes de manutenção e gestores em um esforço coletivo para aumentar a disponibilidade, a confiabilidade e o desempenho global dos equipamentos, além de reduzir custos e melhorar a competitividade (SLACK et al., 2019).

Figura 2 – Os pilares do sistema TPM



Fonte: Bruno Luciano – Abecon (2025)

O TPM é estruturado em oito pilares principais:

- I. Manutenção Autônoma: Foca no envolvimento dos operadores em atividades básicas de conservação, como limpeza, lubrificação e inspeção. Esse pilar desenvolve senso de responsabilidade e ajuda a prevenir falhas simples (PINTO; XAVIER, 2001).
- II. Manutenção Planejada: Organiza atividades preventivas e preditivas com base em dados históricos de falhas e indicadores de desempenho, reduzindo paradas inesperadas e aumentando a disponibilidade dos equipamentos (SLACK et al., 2019).
- III. Melhoria Específica (Kaizen): Busca identificar e eliminar as principais fontes de perdas e desperdícios, aumentando a eficiência global dos equipamentos e elevando o OEE (MIGUEL; RENTES, 2002).
- IV. Educação e Treinamento: Capacita continuamente operadores e equipes de manutenção, garantindo habilidades técnicas e gerenciais necessárias para a efetividade do TPM (SUZUKI, 1994).
- V. Gestão Inicial (*Early Management*): Aplica práticas de manutenção desde a fase de projeto e aquisição de novos equipamentos, reduzindo falhas de concepção e facilitando a operação futura (NAKAJIMA, 1989).
- VI. Controle da Qualidade: Previne defeitos e falhas que possam comprometer a produção, garantindo que os produtos estejam em conformidade e integrando a manutenção ao processo produtivo (SLACK et al., 2019).
- VII. Segurança, Saúde e Meio Ambiente (SSMA): Prioriza práticas seguras e sustentáveis, prevenindo acidentes e minimizando

impactos ambientais (MIGUEL; RENTES, 2002).

VIII. TPM Administrativo (Eficiência em Áreas de Apoio): Estende os princípios do TPM para áreas de apoio e processos indiretos, como logística e compras, aumentando a eficiência global da organização (PINTO; XAVIER, 2001).

Custos de manutenção e impactos na produção

A gestão dos custos de manutenção é um dos pilares fundamentais para a sustentabilidade financeira e operacional de qualquer indústria. Conforme Xenos (1998), o custo total de manutenção engloba não apenas os gastos diretos com materiais, mão de obra e serviços, mas também os custos indiretos associados a paradas não programadas, perda de produtividade e retrabalho. Assim, o controle eficiente desses custos é essencial para garantir o equilíbrio entre confiabilidade, disponibilidade e viabilidade econômica dos equipamentos.

De acordo com Kardec e Nascif (2013), os custos de manutenção podem ser classificados em três grupos principais:

- Custos Diretos: relacionados às atividades de reparo, inspeção e substituição de componentes;
- Custos Indiretos: que incluem o impacto das paradas na produção, perdas de eficiência e custos administrativos; E
- Custos de Falhas: que correspondem às perdas resultantes da indisponibilidade do equipamento e aos prejuízos decorrentes de falhas não previstas.

No contexto da indústria refratária, esses custos assumem grande relevância, pois a interrupção de processos contínuos, como a preparação e transporte de matérias-primas, afeta diretamente o desempenho global da produção. A mensuração desses impactos pode ser feita por meio do indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que avalia a eficácia global dos equipamentos considerando três variáveis: disponibilidade, desempenho e qualidade (NAKAJIMA, 1988).

A análise de falhas recorrentes no elevador de canecas, objeto deste estudo, evidencia a importância de um planejamento de manutenção eficiente para minimizar custos e maximizar o tempo de operação. Segundo Slack et al. (2019), a gestão eficaz da manutenção requer o monitoramento constante de indicadores-chave, permitindo a identificação de padrões de falhas e o estabelecimento de estratégias de melhoria contínua.

Investimentos em programas de manutenção preventiva e preditiva tendem a reduzir custos a médio e longo prazo, uma vez que evitam falhas catastróficas e prolongam a vida útil dos equipamentos (SUZAKI, 1993). Dessa forma, o foco da manutenção moderna não está apenas na correção de falhas, mas na otimização de recursos e no aumento da confiabilidade operacional.

No caso específico do elevador de canecas, a quantificação dos custos de parada e de substituição de componentes críticos permite avaliar a viabilidade econômica das ações de manutenção. Essa abordagem possibilita priorizar intervenções com base em dados técnicos e financeiros, integrando a manutenção ao processo decisório da gestão industrial.

Ferramentas da qualidade aplicadas à manutenção

As ferramentas da qualidade são instrumentos essenciais para a análise, o controle e a melhoria contínua dos processos industriais. Sua aplicação na área de manutenção permite identificar causas de falhas, reduzir desperdícios e aumentar a confiabilidade dos equipamentos, promovendo uma abordagem sistemática para a resolução de problemas (CAMPOS, 2004).

De forma geral, as ferramentas da qualidade têm como finalidade transformar dados em informações úteis à tomada de decisão, favorecendo a gestão baseada em evidências. Segundo Paladini (2012), essas ferramentas contribuem para padronizar procedimentos e garantir que as ações corretivas e preventivas estejam alinhadas com os objetivos estratégicos da organização.

Entre as ferramentas mais utilizadas na gestão da manutenção estão o Diagrama de Ishikawa, o 5W2H e o Ciclo PDCA. Cada uma delas atua em uma etapa distinta do processo de melhoria, desde a identificação das causas até a implementação e o monitoramento das soluções.

O Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa na década de 1960 com o objetivo de identificar e classificar as causas que contribuem para um determinado problema. Segundo Ishikawa (1985), a representação gráfica em formato de espinha de peixe permite visualizar de maneira clara as relações entre o problema central e suas possíveis origens, geralmente agrupadas nas categorias: máquina, método, material, mão de obra, meio ambiente e medição.

No contexto da manutenção industrial, o Diagrama de Ishikawa é amplamente aplicado para investigar causas de falhas recorrentes em equipamentos. Sua utilização no caso do equipamento da indústria refratária possibilitou identificar fatores que contribuíam para paradas não programadas, tais como desgaste excessivo de componentes, ausência de inspeções regulares e falhas de comunicação entre as equipes de operação e manutenção. A partir dessa análise, foi possível propor ações corretivas e preventivas, alinhadas aos princípios da melhoria contínua e da Manutenção Produtiva Total (TPM).

Indicadores de desempenho na manutenção

Os indicadores de desempenho são instrumentos fundamentais para avaliar a eficácia das ações de manutenção e sua contribuição para os resultados organizacionais. Segundo Kardec e Nascif (2013), a mensuração

de desempenho na manutenção permite monitorar a eficiência dos equipamentos, identificar gargalos operacionais e direcionar melhorias baseadas em dados objetivos.

De acordo com Xenos (1998), os principais indicadores utilizados na manutenção industrial são: MTTR (*Mean Time To Repair*), MTBF (*Mean Time Between Failures*), Disponibilidade, Confiabilidade e OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Esses índices permitem mensurar o desempenho técnico dos ativos e alinhar as estratégias de manutenção aos objetivos de produtividade e qualidade da empresa.

O MTTR indica o tempo médio gasto para restaurar um equipamento ao seu estado operacional após uma falha. Ele reflete a agilidade das equipes de manutenção e a eficiência dos processos de reparo. Valores reduzidos de MTTR representam maior capacidade de resposta e menor impacto nas operações (KARDEC; NASCIF, 2013).

$$MTTR = \frac{\text{Tempo total de reparo}}{\text{Número de Falhas}} \quad (1)$$

O MTBF mede o intervalo médio de tempo em que um equipamento opera de forma contínua e sem falhas. Conforme Moubray (1997), esse indicador está diretamente relacionado à confiabilidade, sendo essencial para avaliar a estabilidade dos processos produtivos e a eficácia das estratégias preventivas e preditivas.

$$MTBF = \frac{\text{Tempo total de operação}}{\text{Número de Falhas}} \quad (2)$$

A Disponibilidade é a relação entre o tempo total em que o equipamento está disponível para operação e o tempo total programado de produção. Ela expressa o quanto um ativo está efetivamente apto a cumprir sua função, considerando tanto o tempo de funcionamento quanto as paradas planejadas e não planejadas (SLACK et al., 2019).

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \times 100 \quad (3)$$

A Confiabilidade, por sua vez, expressa a probabilidade de um equipamento desempenhar sua função sem falhas durante um determinado período sob condições específicas de operação. Segundo Lee et al. (2015), esse indicador assume papel central em ambientes produtivos automatizados, nos quais interrupções podem gerar perdas significativas de produtividade e custos elevados.

$$R(t) = e^{(-\frac{t}{MTBF})} \quad (4)$$

Por fim, o OEE representa um dos indicadores mais completos da gestão da manutenção. Desenvolvido por Nakajima (1988), o OEE combina

três variáveis fundamentais: disponibilidade, performance e qualidade, fornecendo uma visão holística da eficácia operacional dos equipamentos. O cálculo do OEE permite identificar perdas associadas a paradas, lentidão de processos e retrabalhos, orientando ações corretivas e preventivas.

$$\text{Performance} = \frac{\text{Produção real}}{\text{Produção teórica}} \quad (5)$$

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Peças boas}}{\text{Peças totais produzidas}} \quad (6)$$

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade} \quad (7)$$

No caso do elevador de canecas na Indústria Refratária X, a utilização de indicadores como MTTR, MTBF e OEE possibilita avaliar de forma objetiva o impacto das falhas e a eficiência das intervenções de manutenção. Essa análise auxilia na priorização de recursos, na redução de paradas não programadas e no aumento da produtividade global do sistema.

Portanto, o uso sistemático de indicadores de desempenho é indispensável para uma gestão de manutenção moderna e orientada a resultados. Além de possibilitar o acompanhamento contínuo da performance dos equipamentos, eles promovem a melhoria contínua e sustentam decisões estratégicas baseadas em dados confiáveis.

Gestão da Qualidade Total (TQM) e ISO 9001

A Gestão da Qualidade Total (TQM – *Total Quality Management*) é uma filosofia gerencial que busca a excelência organizacional por meio da melhoria contínua dos processos, do envolvimento de todos os colaboradores e da satisfação do cliente. Segundo Feigenbaum (1994), a TQM consiste em integrar qualidade a todos os níveis da organização, tornando-a uma responsabilidade compartilhada, não restrita apenas aos setores de inspeção ou controle.

De acordo com Juran (1990), a TQM baseia-se em três pilares fundamentais: planejamento da qualidade, controle da qualidade e melhoria da qualidade. O planejamento visa definir padrões e metas alinhados à estratégia organizacional; o controle envolve o monitoramento dos resultados e correção de desvios; e a melhoria contínua busca o aperfeiçoamento constante dos processos, produtos e serviços. Essa abordagem está diretamente associada à competitividade das empresas no mercado globalizado.

Na área de manutenção industrial, a TQM contribui para a padronização de processos, a redução de variabilidade e o aumento da confiabilidade dos equipamentos. De acordo com Slack et al. (2019), o foco na qualidade total promove a integração entre manutenção, produção e engenharia, garantindo que os equipamentos operem dentro das

especificações e que as falhas sejam tratadas como oportunidades de aprendizado organizacional.

A norma ISO 9001, publicada pela *International Organization for Standardization* (ISO), é um dos principais instrumentos de suporte à implementação da TQM. Ela estabelece requisitos para um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ), permitindo que as organizações demonstrem sua capacidade de fornecer produtos e serviços que atendam consistentemente às exigências dos clientes e regulamentações aplicáveis (ABNT NBR ISO 9001:2015).

Entre os princípios fundamentais da ISO 9001 estão: foco no cliente, liderança, engajamento das pessoas, abordagem de processos, melhoria contínua, tomada de decisão baseada em evidências e gestão de relacionamento com partes interessadas (ISO, 2015). Esses princípios servem de guia para alinhar a gestão da manutenção aos objetivos estratégicos da organização, promovendo confiabilidade, eficiência e sustentabilidade operacional.

No contexto do elevador de canecas, a aplicação dos princípios da TQM e da ISO 9001 permite uma abordagem sistemática na identificação e solução de falhas, com foco na prevenção em vez da correção. A padronização dos procedimentos de inspeção, o registro sistemático de dados no sistema MES e o acompanhamento de indicadores de desempenho são práticas alinhadas aos requisitos de um SGQ robusto.

Além disso, a integração entre manutenção e qualidade proporciona ganhos significativos de produtividade, redução de custos de retrabalho e aumento da satisfação dos clientes internos e externos. Segundo Paladini (2012), a gestão da qualidade é um processo contínuo de aprendizado, em que cada falha ou desvio se transforma em uma oportunidade de aprimoramento dos processos produtivos.

Portanto, a adoção de práticas de Gestão da Qualidade Total e conformidade com a ISO 9001 fortalecem a cultura de excelência organizacional, consolidando a manutenção como um pilar estratégico para o desempenho global da empresa.

METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, com abordagem qualitativa e descritiva, desenvolvido em uma indústria do ramo de refratários. O estudo teve como foco a implementação dos princípios da TPM no elevador de canecas, equipamento essencial para o transporte vertical de materiais no processo produtivo.

Segundo Gil (2019), o estudo de caso permite uma análise aprofundada de um fenômeno dentro de seu contexto real, sendo adequado para compreender os efeitos de uma intervenção organizacional como a aplicação da TPM. A abordagem qualitativa possibilitou observar e interpretar os resultados de forma contextualizada, considerando fatores humanos, técnicos e organizacionais.

A coleta de dados foi conduzida por meio de observação direta no ambiente fabril, complementada por entrevistas informais com operadores e supervisores de manutenção. Além disso, foram analisados registros de produção, como o caderno de anotações e o relatório “hora a hora”, que permitem o monitoramento das paradas e do desempenho operacional. As informações obtidas serviram de base para a identificação dos principais problemas operacionais e para o acompanhamento das melhorias resultantes da implementação da TPM.

A metodologia de trabalho seguiu as etapas sugeridas por Nakajima (1988), adaptadas à realidade da empresa:

1. Diagnóstico inicial do equipamento e levantamento de falhas;
2. Definição de metas de desempenho e confiabilidade;
3. Padronização das rotinas de inspeção e limpeza;
4. Treinamento da equipe operacional; e
5. Monitoramento contínuo dos resultados.

Para a análise dos resultados, foram utilizados indicadores de desempenho como MTBF, MTTR e índice de disponibilidade do equipamento, comparando os valores obtidos antes e depois da implementação. As informações foram interpretadas com base em referenciais teóricos sobre manutenção produtiva total e gestão da qualidade, como os de Slack et al. (2019) e Paladini (2012).

A adoção dessa metodologia permitiu uma avaliação sistemática dos impactos da TPM sobre a confiabilidade e eficiência do elevador de canecas, destacando a importância da integração entre manutenção, produção e qualidade para a competitividade industrial.

Estudo de caso: aplicação do TPM em um elevador de canecas

O presente estudo de caso aborda a aplicação da TPM em um elevador de canecas, equipamento demonstrado na Figura 3, localizado na planta de mistura de matérias primas em uma indústria refratária. O elevador de canecas é um equipamento essencial no transporte vertical de materiais em pó ou granulares, neste caso, matérias-primas como alumina, resinas e aditivos utilizados na fabricação de tubos refratários para lingotamento contínuo de aço. Sua função principal é transportar os materiais da base da planta até silos ou moinhos localizados em níveis superiores, garantindo o fluxo contínuo da produção.

O elevador de canecas é composto por diversos elementos críticos, incluindo correias ou correntes transportadoras, caçambas (ou canecas) fixadas ao sistema de elevação, polias motrizes e de retorno, motores, redutores e dispositivos de segurança. Cada componente desempenha um papel essencial para o transporte eficiente e seguro do material. Qualquer falha em um desses elementos pode provocar paradas inesperadas, interrompendo a alimentação dos silos e moinhos, gerando atrasos na produção, aumento de custos com manutenção corretiva e perdas de material. Além disso, paradas prolongadas podem impactar negativamente

outros processos integrados na planta, comprometendo a confiabilidade do sistema produtivo como um todo.

Dada a criticidade do equipamento, a aplicação do TPM se torna estratégica, permitindo monitoramento constante, manutenção preventiva e preditiva, redução de falhas e aumento da disponibilidade operacional. Com isso, a planta garante maior eficiência, confiabilidade no fluxo de produção e redução de custos associados a paradas não planejadas.

Figura 3: Elevador de canecas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Sua função é essencial para a eficiência operacional, uma vez que assegura o abastecimento regular das etapas subsequentes, evitando interrupções e perdas de produtividade. O sistema é composto por uma correia com canecas fixadas em intervalos regulares, que realizam o transporte do material de forma sequencial e contínua.

Foram observadas falhas recorrentes, como desalinhamento da correia, desgaste e quebra das canecas e acúmulo de material na base do elevador. Tais ocorrências estão associadas, em grande parte, à abrasividade dos materiais transportados, à falta de manutenção preventiva e a ajustes inadequados. O presente estudo visa analisar essas falhas e propor melhorias que aumentem a confiabilidade e a disponibilidade do equipamento.

Levantamento de Dados

O levantamento de dados foi realizado a partir da análise de relatórios de manutenção corretiva e preventiva bem como do histórico de paradas do elevador de canecas demonstrados nas Figuras 4 e 5, mantendo o nome dos colaboradores ocultos por questões de confidencialidade, estes dados se encontram disponíveis no sistema interno da empresa.

Figura 4 - Registros de paradas de manutenção

DATA	HORA INICIAL	HORA FINAL	MÁSCARAS/USO	OCORRÊNCIA	TURNO
13/03/2024	22:10	00:20	PLANTA MIX 4,5 "DESLOGADA"	AQUECIMENTO DA PLANTA	C
13/03/2024	22:30	22:55	11 11	QUEDA DE LUZ	C
13/03/24	00:23	00:43	HISTORIADOR ERICH	FAUNA NA INFILTRAÇÃO DE J100	C
14/03/24	02:00	06:00	11	FALTA DE MATERIAIS PLASTA	C
14/03/24	07:20	09:00	SETUP.	SETUP. TETO 1186 975.163	A
14/03/24	09:10	12:45	MES	FLUORURO DO TETO DO MES	A
14/03/24	12:49	14:00	Setup TA	POSSA FALTA	A
14/03/24	22:10	22:30	SKIP	FALTA DE DESLIGAMENTO AUTÔMATICO NO ASSISTENTE ERICH	C
14/03/24	03:40	04:40	ELEVADOR DE CANECAS BOND-LINK EDITION PULL	11:30H - PARA PINTURA DE PAREDE	C
14/03/24	04:50	05:00	"	QUEDA DE LUZ	C
15/03/24	05:45	08:20	PERFUM.	PAUSA PARA INSCRIÇÃO	A
15/03/24	08:30	12:00	15000004	QUEDA DO GOREGE	A
15/03/24	12:00	13:00	TETO SECADOR	AJUSTE DA VELA DO TETO	A

Fonte: Capturada pelo autor (2025)

Figura 5 – Registros de paradas de manutenção (nomes ocultos por confidencialidade)

ACOMPANHAMENTO DIARIO					
28/07/2025 3º TURNO - EQUIPE C LIDER: OPERADORES: 1					
META DO TURNO: 20 batches MIX:					
Hora	Mat.	Rej.	Wast.	Wast.	PESO DOS BATCHES
22:00	0	0			
23:00	2	1	856		
0:00	3	3	865	864	864
1:00	0	4	872	873	873
2:00	1	0			
3:00	2	3	863	866	
4:00	0	4	873	867	862
5:00	3	4	869	877	865
6:00	3	0			
6:20	1	0			
Total Real: 18 batches 15.646 kg HORAS DE PARADAS: 3:02					
Rejeito: zero OBS: AJUSTE MANUAL - 2X					
Absentismo: zero OBS: zero					
ACOMPANHAMENTO DE PARADAS					
Horas Iniciais	Horas Finais	Horas Parada	Equipamento / Fator	Ocorrência / Fornecedores Programadas	
22:00	22:20	0:20	DDS	PARADA PROGRAMADA	
22:25	23:47	1:22	SCRWU FEEDER	DESARME DA REDUTORA POR COMPACTAÇÃO DE MATERIAL	
1:30	2:00	0:30	JANTAR	PARADA PROGRAMADA	
2:00	2:30	0:30	VALVULA ROTATIVA	DESARME POR COMPACTAÇÃO DE MATERIAL	
2:30	2:50	0:20	ELEVADOR DE CANECAS	RETRATADA DOS TAMBORES DE SUCATA	
ATENÇÃO AOS APONTAMENTOS NO VERSO DA FOLHA!					

Fonte: Capturada pelo autor (2025)

Foram conduzidas entrevistas com operadores e técnicos de manutenção, com o objetivo de identificar as principais falhas observadas e compreender as condições operacionais do equipamento.

Além disso, foram efetuadas observações de campo durante o funcionamento do elevador, permitindo verificar o comportamento do sistema em operação e registrar eventuais anomalias. Em paralelo, foram analisadas planilhas de indicadores de desempenho, como o OEE e indicadores de qualidade como a planilha de rejeito demonstrada na Figura 6, possibilitando correlacionar os registros de falhas com o impacto na eficiência, qualidade e na disponibilidade do equipamento.

Figura 6 – Registro de rejeitos do elevador de canecas

Tipo	Código	Data	Peso(Kg)	Origem
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	11/02/2025	2910	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	07/04/2025	5893	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	07/05/2025	5138	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	13/05/2025	1347	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	03/06/2025	4878	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	17/06/2025	1565	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	01/07/2025	5275	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	05/07/2025	5657	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	23/07/2025	1812	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	15/07/2025	3875	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	24/07/2025	1500	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	25/07/2025	1228	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	28/07/2025	306	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	30/07/2025	635	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	30/07/2025	737	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	12/08/2025	4735	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	22/08/2025	615	Limpeza do Pit do elevador de canecas
SUCATA LIMPEZA	MX_FG_LIMPEZA	03/09/2025	570	Limpeza do Pit do elevador de canecas
Total			48676	

Fonte: Capturada pelo autor (2025)

Diagnóstico Inicial

O diagnóstico foi realizado com base nos dados levantados. Para identificar as causas-raiz, foi utilizado o Diagrama de Ishikawa, conforme demonstrado na Figura 7. As causas foram agrupadas em seis categorias principais: Máquina, Método, Mão de obra, Materiais, Meio ambiente e Medição. Entre as principais causas destacam-se o desgaste de correias e caçambas, falhas em rolamentos e eixos, ausência de plano estruturado de manutenção, falta de treinamento dos operadores, qualidade insuficiente de peças de reposição e condições ambientais adversas, como poeira e alta temperatura.

A análise evidenciou a necessidade de adotar práticas sistematizadas de manutenção preventiva e autônoma, conforme os pilares do TPM, visando aumentar a confiabilidade e disponibilidade do equipamento.

Figura 7 – Diagrama de Ishikawa das falhas do elevador de canecas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Aplicação dos Princípios do TPM

A aplicação dos princípios do TPM teve como objetivo aumentar a confiabilidade e disponibilidade do elevador de canecas, reduzindo paradas não planejadas e melhorando o desempenho operacional do equipamento. As ações foram desenvolvidas com base nos pilares da manutenção autônoma, manutenção planejada e desenvolvimento de pessoas.

Inicialmente, foram realizadas atividades de manutenção autônoma, envolvendo a capacitação dos operadores para a execução de inspeções básicas como: limpeza, lubrificação e identificação precoce de anomalias. Foram criados checklists diários de verificação, com o objetivo de padronizar as rotinas de inspeção e promover maior envolvimento da equipe operacional na conservação do equipamento.

Em paralelo, foi estruturado um plano de manutenção planejada, com base no histórico de falhas e nas recomendações dos fabricantes. Esse plano incluiu a definição de periodicidades de inspeção, reposição preventiva de componentes críticos (como correias, rolamentos e caçambas) e o registro sistemático das intervenções realizadas.

Também foi realizado um programa de treinamento voltado para operadores e técnicos de manutenção, com foco em boas práticas de operação, segurança e monitoramento de condições do equipamento. Essa ação reforçou o pilar de desenvolvimento de competências e contribuiu para a integração entre as áreas de operação e manutenção.

Por fim, foram padronizados os procedimentos de lubrificação, limpeza e alinhamento, e implementadas rotinas visuais de acompanhamento, como etiquetas de controle e painéis de indicadores de desempenho. Essas medidas fortaleceram a cultura de melhoria contínua e aumentaram a eficiência das atividades de manutenção.

4.4 Indicadores de Desempenho

Os dados utilizados para o cálculo dos indicadores de manutenção e produção foram obtidos a partir de diferentes fontes integradas do sistema fabril. As informações de tempos de operação, eventos de parada e alarmes foram extraídas dos logs do SCADA/PLC, que registram automaticamente os estados do equipamento (ligado, parado, falha, microstop, reinício).

Os tempos de reparo e ordens de manutenção foram obtidos por meio do sistema CMMS, enquanto os dados de produção e quantidade de peças boas e rejeitadas foram extraídos dos relatórios do Controle de Qualidade, integrados ao MES (*Manufacturing Execution System*).

A partir desses registros, foram calculados os principais indicadores de desempenho do equipamento: MTTR, MTBF, Disponibilidade, Performance, Qualidade, OEE, Confiabilidade e Paradas Não Planejadas.

Para o período analisado equivalente a 30 dias de operação (720 horas programadas) consideraram-se dois cenários: antes e depois da implantação do TPM, com duas abordagens de contagem de falhas, conforme os critérios a seguir.

MTTR (Eq. 1):

$$\text{Antes} = \frac{40}{20} = 2h \quad \text{e} \quad \text{Depois} = \frac{12}{10} = 1,20h$$

MTBF (Eq. 2):

$$\text{Antes} = \frac{680}{20} = 34h \quad \text{e} \quad \text{Depois} = \frac{708}{10} = 54,4h$$

Disponibilidade (Eq. 3):

$$\text{Antes} = \frac{34}{34+2} \times 100 = 94,44\% \quad \text{e} \quad \text{Depois} = \frac{54,4}{54,4+1,2} \times 100 = 97,84\%$$

Confiabilidade (Eq. 4):

Para $t = 720h$:

$$\text{Antes} = e^{-720/34} = 6,36 \times 10^{-10} \approx 0\%$$

$$\text{Depois} = e^{-720/54,4} = 1,78 \times 10^{-6} \approx 0,00018\%$$

Para $t = 168h$ (1 semana):

$$\text{Antes} = e^{-168/34} = 0,0071 \rightarrow 0,71\%$$

$$\text{Depois} = e^{-168/54,4} = 0,0456 \rightarrow 4,56\%$$

Performance (Eq. 5):

$$\text{Antes} = \frac{11.968}{13.600} \times 100 = 88\% \quad \text{e} \quad \text{Depois} = \frac{13.027}{14.160} \times 100 = 92\%$$

Qualidade (Eq. 6):

OEE (Eq. 7):

$$\text{Antes} = (0,9444 \times 0,88 \times 0,95) = 0,7896 \rightarrow 78,96\%$$
$$\text{Depois} = (0,9784 \times 0,92 \times 0,98) = 0,8821 \rightarrow 88,21\%$$

Análise dos Resultados

Conforme compilado na Tabela 1, a análise dos resultados obtidos após a implementação dos princípios do TPM evidencia melhorias significativas no desempenho e na confiabilidade do elevador de canecas. A comparação entre os indicadores medidos antes e depois das ações permite constatar o impacto positivo das práticas adotadas.

Tabela 1 – Comparativo dos indicadores de desempenho antes e depois da aplicação do TPM

Indicador	Antes do TPM	Depois do TPM	Variação
Ocorrências (mensais)	20	10	-50%
Tempo total de reparo (h)	40,0	12,0	-70,0%
MTTR (h)	2,00	1,20	-40,0%
Tempo de operação (h)	680,0	708,0	+4,12%
MTBF (h)	34,00	54,40	+60,0%
Disponibilidade (%)	94,44%	97,84%	+3,40 p.p.
Performance (%)	88,00%	92,00%	+4,00 p.p.
Qualidade (%)	95,00%	98,00%	+3,00 p.p.
OEE (%)	78,96%	88,21%	+9,25 p.p.
Confiabilidade R(720h)	~0%	0,00018%	+0,00018 p.p.
Confiabilidade R(168h)	0,71%	4,56%	+3,85 p.p.
Paradas não planejadas (nº)	20	10	-50%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A análise dos indicadores evidencia melhorias significativas após a implementação da TPM no equipamento. O número de paradas não planejadas caiu 50%, enquanto o tempo médio para reparo (MTTR) foi reduzido de 2,00 h para 1,20 h, mostrando maior eficiência da equipe de manutenção e maior disponibilidade de peças sobressalentes.

O tempo médio entre falhas (MTBF) apresentou um aumento de 60%, evoluindo de 34,00 h para 54,40 h, indicando uma redução na frequência das falhas e maior estabilidade operacional do sistema.

Como resultado, a disponibilidade subiu de 94,44% para 97,84%, enquanto o OEE cresceu de 78,96% para 88,21%, evidenciando uma melhoria global na eficiência do equipamento.

Os dados de performance e qualidade, obtidos via SCADA/MES e Controle de Qualidade, demonstram uma operação mais estável e com menor índice de retrabalho. A produção rejeitada caiu de 600 para 270 peças, correspondendo à melhoria de 95% para 98% no indicador de qualidade. Esse avanço reflete o impacto direto das atividades de limpeza, inspeção e manutenção autônoma implementadas no âmbito do TPM.

Por fim, a confiabilidade ($R(t)$), quando calculada para o horizonte mensal de 720 h, tende a valores próximos de zero devido à diferença entre o MTBF e o período analisado. Entretanto, ao observar o comportamento semanal (168 h), o aumento de 0,71% para 4,56% confirma a maior estabilidade do processo em intervalos operacionais curtos, que são os mais relevantes para a rotina fabril.

Dessa forma, os resultados demonstram que o TPM contribuiu diretamente para:

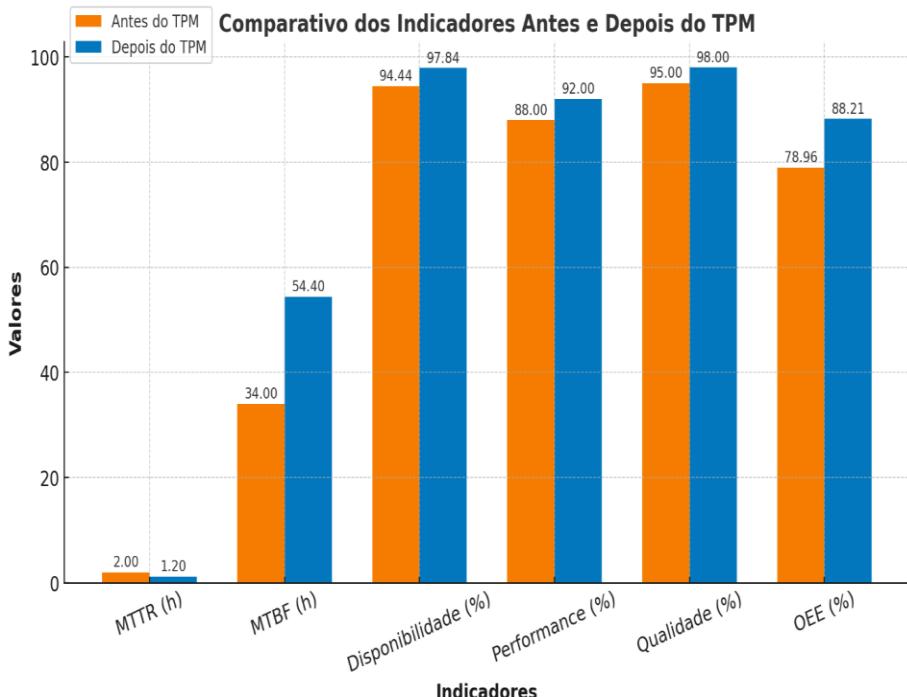
- Reduzir falhas reincidentes;
- Melhorar a eficiência global (OEE);
- Aumentar a confiabilidade e a qualidade; E
- Consolidar uma cultura de manutenção preventiva e autônoma dentro da operação.

Os resultados demonstram que a implementação do TPM impactou positivamente a confiabilidade e a eficiência do elevador de canecas, por meio de:

- Padronização de rotinas e checklists, garantindo inspeções consistentes;
- Capacitação dos operadores, aumentando a identificação precoce de anomalias;
- Manutenção planejada e preventiva, reduzindo falhas inesperadas; E
- Monitoramento contínuo e registro de indicadores, permitindo análise e melhoria contínua.

Em síntese, as ações de TPM resultaram em maior estabilidade operacional, redução de custos e aumento da produtividade, reforçando a importância da manutenção integrada e da participação ativa dos operadores no cuidado com o equipamento.

Figura 8 – Comparativo dos indicadores do elevador de canecas antes e após a aplicação do TPM



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras

Apesar dos resultados positivos obtidos com a aplicação dos princípios da TPM no elevador de canecas, o estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos dados e no planejamento de ações futuras.

Uma das principais limitações está relacionada ao período de observação relativamente curto, o que pode não refletir completamente a variabilidade operacional do equipamento ao longo de diferentes condições de produção, turnos e lotes de materiais. Um acompanhamento mais prolongado permitiria validar a consistência dos resultados e avaliar a sustentabilidade das melhorias implementadas.

Outra limitação refere-se à disponibilidade de dados históricos. Em alguns casos, os registros de falhas e intervenções anteriores eram incompletos ou não padronizados, dificultando análises comparativas mais robustas. A ausência de dados detalhados sobre custos indiretos como perda de produtividade e retrabalho também restringiu a mensuração do impacto econômico total das ações de manutenção.

Adicionalmente, variações nas condições operacionais como mudanças de formulação das matérias-primas, turnos de operação e ajustes de processo podem ter influenciado os resultados dos indicadores de desempenho, especialmente o OEE e o MTBF. Essas variações devem ser consideradas em análises futuras para garantir maior precisão na correlação entre causa e efeito.

Outro ponto relevante diz respeito à limitação na integração de sistemas digitais de monitoramento. Embora o acompanhamento tenha sido realizado com base no sistema MES e registros manuais, a ausência de sensores de monitoramento contínuo (como vibração, temperatura e corrente elétrica) limitou a adoção de uma abordagem preditiva mais avançada, característica de ambientes produtivos alinhados à Indústria 4.0.

Com base nessas limitações, algumas ações futuras são recomendadas para dar continuidade e ampliar os resultados obtidos:

- Expansão da TPM para outros equipamentos críticos da planta, como misturadores, transportadores de correia e fornos, visando disseminar a cultura de manutenção produtiva total e ampliar os ganhos de disponibilidade e confiabilidade.
- Implantação de tecnologias de manutenção preditiva, integrando sensores IoT, sistemas de análise de dados e dashboards em tempo real, de modo a antecipar falhas e otimizar o planejamento de intervenções.
- Criação de um banco de dados estruturado de falhas e intervenções, garantindo rastreabilidade, padronização das informações e suporte à tomada de decisão baseada em evidências.
- Aprofundamento dos treinamentos e programas de capacitação para operadores e equipes de manutenção, com foco em análise de falhas, lubrificação correta e identificação precoce de anomalias.
- Realização de estudos de viabilidade econômica detalhados, correlacionando os custos de manutenção com o impacto na produtividade e na eficiência energética, de forma a evidenciar o retorno sobre o investimento (ROI) do TPM.
- Recomenda-se a integração futura da abordagem TPM com tecnologias digitais da Indústria 4.0 como sensores IoT, monitoramento em tempo real, digital twin e análise preditiva baseada em machine learning para transformar a manutenção em um processo inteligente e conectado. Essa convergência permitirá previsões mais precisas de falhas, acionamento automático de ordens de trabalho no CMMS, redução do tempo de parada e otimização contínua das atividades autônomas e de manutenção planejada, alinhando o programa TPM às demandas atuais de eficiência e resiliência operacional.

Em síntese, embora o estudo tenha evidenciado ganhos significativos em confiabilidade, disponibilidade e redução de custos, há oportunidades de evolução na digitalização dos processos e na ampliação da cultura de

manutenção integrada. A continuidade dessas ações poderá consolidar o TPM como um modelo sustentável de excelência operacional dentro da indústria refratária.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a implementação da TPM no elevador de canecas proporcionou melhorias significativas na confiabilidade e no desempenho do equipamento. Indicadores como disponibilidade, taxa de falhas e MTBF apresentaram aumento expressivo, refletindo a eficácia das práticas de manutenção preventiva, preditiva e autônoma aplicadas.

O envolvimento direto dos operadores mostrou-se essencial para a identificação precoce de problemas e redução de paradas não programadas, evidenciando a importância do engajamento humano no sucesso do TPM. Entretanto, limitações relacionadas ao engajamento dos operadores, variações operacionais e fatores externos, como disponibilidade de peças e condições específicas da fábrica, devem ser consideradas ao interpretar os resultados.

Apesar dessas restrições, os achados indicam que a continuidade e expansão da TPM podem gerar benefícios ainda maiores. A integração com soluções de Indústria 4.0, incluindo sensores inteligentes e monitoramento remoto, surge como uma oportunidade promissora para otimizar a manutenção, aumentar a confiabilidade e permitir decisões baseadas em dados reais do equipamento.

Em síntese, a aplicação do TPM trouxe ganhos operacionais tangíveis, reforçou a importância da participação ativa da equipe e serviu como base sólida para futuras melhorias e expansão para outros equipamentos da linha de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR ISO 9001:2015 Sistemas de gestão da qualidade. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

CAMPOS, Vicente Falconi. TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês). 8. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

FEIGENBAUM, Armand V. Controle da Qualidade Total: gestão e sistemas. São Paulo: Makron Books, 1994.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

ISHIKAWA, Kaoru. Controle de Qualidade Total: à maneira japonesa. Rio de Janeiro: Campus, 1985.

JURAN, J. M. Juran na Liderança pela Qualidade: um guia para executivos. São Paulo: Pioneira, 1990.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. Manutenção: função estratégica. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.

LEE, Jay; BAGHERI, Behrad; KAO, Hung-an. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, p. 18–23, 2015.

MIGUEL, Paulo A. Cauchick; RENTES, Antônio Fernando. Melhoria Contínua e o Papel do Seis Sigma: uma análise exploratória. *Revista Produção*, v. 12, n. 2, p. 36–49, 2002.

MOURBRAY, John. Reliability-Centered Maintenance (RCM II). Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

NAKAJIMA, Seiichi. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Cambridge: Productivity Press, 1988.

PALADINI, Edson Pacheco. Gestão da Qualidade: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

PINTO, José Carlos; XAVIER, Jorge. Manutenção Produtiva Total: implantação e resultados. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. Administração da Produção. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

SOUZA, Fábio Henrique de; LOPES, Paulo Sérgio. Manutenção produtiva total: aplicação prática em uma indústria de alimentos. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, p. 482–507, 2016.

SUZAKI, Kiyoshi. O Novo Desafio Japonês: o gerenciamento participativo. São Paulo: Editora Pioneira, 1993.

SUZUKI, Tokutaro. TPM in Process Industries. Cambridge: Productivity Press, 1994.

XENOS, Harilaus. Gerenciamento pela Qualidade Total: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

CAPÍTULO 4

TRANSIÇÃO ESTRATÉGICA DA MANUTENÇÃO CORRETIVA PARA A MANUTENÇÃO PREDITIVA COM SUPORTE DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: ESTUDO DE CASO APLICADO À FÁBRICA DA COCA-COLA EM MATOLA-GARE.

Matheus Pedroso de Oliveira

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
matheuspedroso@souunisuam.com.br

Nathalia Nair Dias da Silva

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
nathalia.dias@souunisuam.com.br

Victor Franco Ferreira

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
victorfranco@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM)
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

Este artigo examina a substituição da ineficiente Manutenção Corretiva pela Manutenção Preditiva potencializada pela Inteligência Artificial (IA). A Manutenção Corretiva, por ser reativa, gera interrupções não planejadas e altos custos emergenciais. Em contraste, a Manutenção Preditiva, utilizando sensores de IoT e algoritmos de IA, processa dados em tempo real (vibração, temperatura) para prever a probabilidade e o momento exato da falha. IA transforma a gestão de ativos de reativa para proativa, permitindo intervenções programadas e otimizadas. As principais vantagens desta abordagem incluem a drástica redução de custos operacionais e de materiais, o aumento da disponibilidade e vida útil dos equipamentos e a melhoria da segurança no trabalho. Conclui-se que a Manutenção Preditiva com IA é uma

prioridade essencial da Indústria 4.0, garantindo maior eficiência operacional e competitividade.

Palavras-Chave: Manutenção Preditiva; Inteligência Artificial; Manutenção Corretiva; Indústria 4.0; Gestão de Ativos; IoT; Redução de Custos.

INTRODUÇÃO

Segundo Higgins, Mobley e Smith (2002) em um cenário industrial de crescente competitividade, a confiabilidade de ativos e a eficiência de processos produtivos emergem como elementos cruciais para a sustentabilidade e o desempenho operacional das organizações. Nesse contexto, a gestão da manutenção desempenha um papel estratégico, com impacto direto na produtividade, segurança e custos operacionais.

A manutenção corretiva é caracterizada por intervenções reativas após a ocorrência de falhas. Contudo, apesar de uma percepção inicial de baixo custo, esse modelo tem se mostrado ineficiente a médio e longo prazo, resultando em paradas não planejadas, perdas de produção e elevados custos associados a emergências técnicas.

Diante desse panorama, o presente estudo propõe uma transição da manutenção corretiva para a manutenção preditiva. A fundamentação dessa proposta se baseia no estudo de caso conduzido por Nunes Fernando Machava (2023) na fábrica da Coca-Cola em Matola-Gare, Moçambique. Esse caso real evidencia, de forma prática, os impactos operacionais negativos da abordagem reativa e as oportunidades de melhoria com a implementação de técnicas preditivas.

Adicionalmente, esta pesquisa expande a proposta original de Machava por meio da integração da inteligência artificial (IA) na estratégia de manutenção preditiva. Essa aliança visa aprimorar a tomada de decisão, permitir a antecipação de falhas críticas e automatizar o gerenciamento de ordens de serviço. A abordagem busca, assim, reposicionar o setor de manutenção para um pilar de vantagem competitiva e excelência operacional.

A partir dessa base teórica e prática, este trabalho busca responder à seguinte questão de pesquisa: "Em que medida a implementação de uma estratégia de manutenção preditiva, suportada por inteligência artificial, pode aumentar a disponibilidade de ativos críticos, reduzir custos e otimizar o desempenho operacional em contextos industriais que ainda se baseiam em modelos reativos?"

Para abordar a questão, são explorados os aspectos técnicos e operacionais da manutenção preditiva. A análise considera tanto os resultados do estudo de caso quanto às inovações propostas. O objetivo final é fornecer um modelo replicável que possa ser implementado em outras organizações industriais que enfrentam desafios similares.

OBJETIVO GERAL

Analisar a viabilidade e os impactos da implementação de uma estratégia de manutenção preditiva, otimizada com o uso de inteligência artificial, em substituição ao modelo corretivo tradicional, com base no estudo de caso da Coca-Cola em Matola-Gare.

Objetivo específico

- a) Identificar os principais prejuízos operacionais decorrentes da manutenção corretiva no sistema de refrigeração da planta analisada;
- b) Apresentar as técnicas utilizadas na manutenção preditiva (análise de vibração, termografia, tribologia e ultrassom);
- c) Investigar os benefícios da integração da inteligência artificial no processo de manutenção preditiva;
- d) Propor um modelo replicável de gestão de manutenção para outras indústrias com desafios similares;

JUSTIFICATIVA

A escolha do tema se justifica pela necessidade crescente das indústrias em aumentar a confiabilidade dos ativos e reduzir custos operacionais, alinhando-se às exigências da Indústria 4.0. A manutenção preditiva, aliada à inteligência artificial, representa uma solução inovadora e eficaz para reduzir riscos, prevenir falhas e melhorar o desempenho produtivo. O estudo contribui para o avanço do conhecimento técnico-científico na área de engenharia de manutenção, além de oferecer um modelo prático e aplicável a diversos contextos industriais que ainda adotam práticas reativas.

ESTUDO DE CASO: CRÍTICA À MANUTENÇÃO CORRETIVA E PROPOSTA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NA COCA-COLA.

O modelo de manutenção corretiva, que se manifesta pela intervenção reativa após a ocorrência de uma falha, tem sido objeto de intensa crítica no âmbito industrial. Essa abordagem, que negligencia a previsibilidade das falhas, acarreta interrupções na produção que afetam a competitividade e resultam em perdas financeiras significativas, uma vez que a correção emergencial de falhas é a abordagem menos econômica (LIMA, 2011).

Um exemplo disso foi o estudo de caso na fábrica da Coca-Cola da Matola-Gare, em Moçambique, que identificou um ponto crítico de vulnerabilidade que reside no sistema de refrigeração *chiller*. Este equipamento é indispensável para o processo de produção, pois garante que a temperatura do xarope seja reduzida e mantida a 14 °C para posterior engarrafamento. A falha inesperada do sistema de refrigeração pode paralisar a produção de refrigerantes, causando consideráveis perdas financeiras e atrasos. Contudo, a dependência da fábrica ao tipo de

manutenção corretiva para os *chillers* resulta em danos significativos (MACHAVA, 2023). A dinâmica da competitividade de mercado exige que as indústrias operem em um estado de prontidão contínua para atender às demandas do consumidor, um esforço que só se sustenta com a eficiência plena de seus equipamentos. A opção por este modelo reativo, portanto, expõe a operação a riscos e custos imprevistos, em clara desvantagem em relação às abordagens proativas.

Ademais, a transição para um novo paradigma de manutenção, focado na prevenção e na predição, é uma alternativa para mitigar os riscos associados ao modelo corretivo. A manutenção preditiva, em particular, utiliza o monitoramento de variáveis para antecipar falhas, reduzindo custos e aumentando a vida útil dos equipamentos (LIMA, 2011). Logo, a implementação de um plano preditivo na Coca-Cola da Matola-Gare, com foco no sistema *chiller*, tem como objetivo principal otimizar o desempenho, a partir da adoção de técnicas específicas de monitoramento. O estudo de Machava (2023) apresenta uma solução robusta ao propor a implementação de um plano de manutenção preditiva para o sistema de refrigeração *chiller*. Ao contrário da manutenção corretiva, a preditiva se baseia na monitoração constante das condições do equipamento para identificar falhas que vão gradativamente evoluindo para falhas mais graves e antecipar a necessidade de reparos. O autor fundamenta sua proposta em um conjunto de técnicas e equipamentos que, em conjunto, criam um diagnóstico abrangente da saúde do sistema:

- a) Análise de Vibração: Essencial para o monitoramento do compressor, um dos componentes mais críticos. A utilização de um monitor como o NK200 permite a identificação de padrões de vibração anormais que sinalizam desgaste ou desalinhamento.
- b) Termografia: Destinada à vigilância dos trocadores de calor, como condensador e o evaporador. A medição de anomalias de temperatura com um scanner como o SUPER-DAQ 1586A é fundamental, uma vez que variações térmicas são um dos primeiros indicadores de falhas que comprometem a qualidade do produto.
- c) Análise de Óleo (Tribologia): Uma técnica para rastrear o desgaste das peças e a condição do lubrificante. O Minilab 153, por exemplo, permite uma análise completa do óleo, revelando contaminação, viscosidade inadequada e a presença de partículas de desgaste.
- d) Ultrassom: Empregado na detecção precoce de vazamentos em tubulações e válvulas. O detector LD 300, proposto no estudo, capta a alta frequência gerada pelo fluxo turbulento em pontos de fuga, algo imperceptível a olho nu.

Apesar do alto investimento inicial para a implementação, Machava (2023) argumenta que o plano se justifica financeiramente a longo prazo, por meio da redução de custos com manutenção, do aumento da vida útil

dos equipamentos e da maximização da produção. A manutenção, nesse contexto, deixa de ser vista como um gasto inesperado e passa a ser considerada uma estratégia de negócio, fundamental para a confiabilidade e eficiência da produção.

A integração de inteligência artificial: Otimizando a preditiva

Embora a proposta anterior seja tecnicamente sólida, ela pode ser aprimorada com a integração da Inteligência Artificial (IA), elevando o conceito de manutenção preditiva para um patamar mais sofisticado e automatizado. A solução, que chamaremos de Manutenção Preditiva Otimizada por IA, não substitui as técnicas de Machava (2023), mas as centraliza e potencializa.

A viabilidade dessa abordagem reside na capacidade da IA de processar grandes volumes de dados de forma contínua e autônoma, superando as limitações da intervenção humana. Com todos os sensores do *chiller* conectados a uma plataforma de IA, os algoritmos de aprendizado de máquina podem analisar dados de vibração, temperatura, qualidade do óleo e pressão em tempo real. Essa análise não se limita a identificar um problema já existente, mas a prever sua ocorrência com base em padrões complexos de dados.

A inteligência artificial pode prever a probabilidade de falha de um componente específico e gerar alertas proativos, permitindo que a equipe de manutenção planeje intervenções antes que o problema cause uma parada na produção. Essa antecipação estratégica não só minimiza os riscos, mas também permite que a empresa realize a manutenção no momento mais economicamente vantajoso. Além disso, a automação na geração de ordens de serviço e na análise de dados reduz a carga de trabalho da equipe, que pode se concentrar em tarefas de maior complexidade. A adoção desse modelo assegura uma disponibilidade quase máxima do equipamento, convertendo o departamento de manutenção de um centro de custo para um pilar estratégico da eficiência operacional. Contudo, enquanto o plano proposto por Machava (2023) se concentra em monitorar variáveis (vibração, temperatura, óleo) para diagnosticar um problema existente, a solução baseada em IA utiliza esses mesmos dados para aprender, prever a probabilidade de falha e estimar o Tempo de Vida Útil Restante (Remaining Useful Life - RUL) do equipamento.

A IA processa volumes massivos de dados multivariados para identificar padrões de falha complexos que um analista humano ou um sistema de regras simples não conseguiria detectar e isso é possível pelos componentes chave e métodos Implementação abaixo:

- a) Camada de Aquisição de Dados (Digitalização - IoT Industrial)

Esta camada é a base e expande a coleta de dados:

Sensores Aprimorados (IIoT - Industrial Internet of Things): Além dos sensores de vibração, termografia, ultrassom e análise de óleo já propostos, seriam adicionados sensores contínuos de pressão, vazão, consumo de energia elétrica, e dados operacionais diretamente do PLC (Controlador Lógico Programável) do chiller.

Exemplo de Dados Coletados: Temperatura do gás de sucção/descarga, pressão do condensador/evaporador, corrente e tensão do compressor, taxa de refrigeração e dados meteorológicos externos.

Gateway e Nuvem/Edge Computing: Os dados em alta frequência (em tempo real ou quase) são enviados para um sistema de armazenamento (nuvem ou servidores locais) para processamento.

b) Camada de Processamento e Modelagem (Machine Learning)

Pré-processamento de Dados: Limpeza, normalização e sincronização dos dados de diferentes sensores.

Desenvolvimento do Modelo de IA: Utilização de modelos de Machine Learning (ML) como:

- I) Redes Neurais Recorrentes (RNN) ou Transformadores: Excelentes para analisar séries temporais e prever o próximo estado do equipamento com base no histórico.
- II) Árvores de Decisão (como XGBoost ou Random Forest): Para identificar quais variáveis são as mais críticas para a falha e em que limiares.
- III) Modelos de Aprendizado Não-Supervisionado (Ex: Autoencoders): Para detecção de anomalias, identificando qualquer desvio do "comportamento normal" do chiller, mesmo que não seja um padrão de falha conhecido.

Treinamento: O modelo é treinado com dados históricos de operação do chiller, incluindo períodos de funcionamento normal e, crucialmente, dados que antecederam falhas passadas (se disponíveis).

c) Camada de Resultado e Ação

O resultado da IA é transformado em ações de negócio:

Geração do RUL e Probabilidade de Falha: O modelo de ML gera continuamente a estimativa do Tempo de Vida Útil Restante (RUL) do compressor e de outros componentes críticos, e a Probabilidade de Falha.

I) Alerta Inteligente: Em vez de alertar apenas sobre uma temperatura alta (como faria um sistema simples), a IA alerta, por exemplo, que "O compressor terá uma falha de rolamento com 85% de probabilidade em 15 dias".

II) Manutenção Preditiva-Prescritiva: O sistema não apenas prevê, mas prescreve a ação ideal.

Exemplo: "Agende a substituição do óleo do compressor e o alinhamento do motor em 14 dias para evitar uma interrupção não programada." Isso permite à fábrica planejar a intervenção para o momento de menor impacto na produção.

Desafios da manutenção inteligente

Apesar das inúmeras vantagens, a adoção da manutenção preditiva baseada em tecnologias da Indústria 4.0 ainda enfrenta alguns desafios. Entre eles, destaca-se a necessidade de garantir a qualidade e a consistência dos dados coletados pelos sensores, pois falhas na coleta podem comprometer toda a análise preditiva. Além disso, a implementação dessas tecnologias requer investimentos iniciais significativos em infraestrutura digital e capacitação técnica da equipe. Outro ponto crítico é a integração dos sistemas de monitoramento com os processos decisórios da empresa, exigindo mudanças culturais e operacionais.

UTILIZAÇÃO DO INDICADOR OEE (OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS) NA AVALIAÇÃO DA PROPOSTA DE MELHORIA:

O OEE (Eficácia Global do Equipamento) é um indicador crucial para medir a contribuição dos equipamentos no desempenho industrial, sendo o melhor meio para quantificar sua eficácia durante a operação. O OEE quantifica quanto valor o equipamento agrega ao produto e serve como métrica de melhoria contínua dos equipamentos e processos. Um OEE consistente de 85% é considerado uma referência de "classe mundial". Além disso, ele é um indicador obtido pela multiplicação dos fatores de Disponibilidade, Eficiência e Qualidade (SILVA,2013). O caso do chiller demonstra que a transição da manutenção corretiva para a preditiva com IA impacta diretamente a disponibilidade, que é o fator mais penalizado pelas quebras inesperadas. Diante disso, abaixo estão os dados base para o cálculo.

Quadro 1

Parâmetro	Valor Base	Justificativa
Tempo Total Disponível (Planejado)	24.000 minutos (17 dias de 24h)	Base de cálculo para um período de 17 dias de operação contínua.
Tempo de Parada Programada	2.400 minutos	Paradas planejadas (limpeza, setup, inspeções). Equivalente a 10% do Tempo Total.
Tempo de Ciclo Ideal	100 garrafas por minuto	Velocidade máxima nominal de produção da linha de engarrafamento.
Meta de Qualidade (Q)	99,0%	Padrão alto da indústria de bebidas.
Fórmula OEE	$OEE = D \times P \times Q$	Disponibilidade x Desempenho x Qualidade

3.1 Cenário antes: Manutenção Corretiva

Cálculo da Disponibilidade (D)

Quadro 2

Componente de Tempo	Valor (Minutos)	Impacto da Corretiva
Tempo Operacional Total (A)	24.000 min	Tempo total do período.
Parada Programada (B)	2.400 min	Setup, limpezas.

Parada Não Programada (Falhas do Chiller)	3.600 min (60 horas)	Longas paradas devido à falha inesperada, diagnóstico e espera por peças (característica da Corretiva).
Tempo de Produção Líquido (C)	$A - B - (\text{Falhas Chiller}) = 24.000 - 2.400 - 3.600$	18.000 min

Fórmula: $D = \frac{\text{Tempo de Produção Líquido}}{\text{Tempo Disponível de Produção}} = \frac{C}{A-B}$

$$D = \frac{18.000 \text{ min}}{24.000 \text{ min} - 2.400 \text{ min}} = \frac{18.000}{21.600} \approx 0,8333$$

$$\mathbf{D_{Corretiva} \approx 83,33\%}$$

Cálculo do Desempenho (P):

Quadro 3

Componente de Velocidade	Valor	Justificativa
Produção Real (Boa + Ruim)	1.700.000 garrafas	Produção efetivamente realizada no tempo líquido (C).
Produção Ideal (Teórica)	1.800.000 garrafas	18.000 min x 100/min (Baseado no Tempo de Produção Líquido).

Fórmula: $P = \frac{\text{Produção Real}}{\text{Produção Ideal}}$

$$P = \frac{1.700.000 \text{ garrafas}}{1.800.000 \text{ garrafas}} \approx 0,9444$$

$$\mathbf{P_{Corretiva} \approx 94,44\%}$$

Cálculo da Qualidade (Q)

Quadro

4

Componente de Qualidade	Valor	Justificativa
Produção Total	1.700.000 garrafas	Produção Real.
Garrafas Reprovadas (Refugo)	34.000 garrafas	Refugo de 2% (4% acima do ideal de 99%).
Produção Boa	$1.700.000 - 34.000 = 1.666.000$ garrafas	Produto final conforme as especificações.

$$\text{Fórmula: } Q = \frac{\text{Produção Boa}}{\text{Produção Real}}$$

$$Q = \frac{1.666.000 \text{ garrafas}}{1.700.000 \text{ garrafas}} \approx 0,9800$$

$$Q_{\text{Corretiva}} = 98,00\%$$

OEE final:

$$OEE_{\text{Corretiva}} = D \times P \times Q$$

$$OEE_{\text{Corretiva}} = 0,8333 \times 0,9444 \times 0,9800$$

$$OEE_{\text{Corretiva}} \approx 77,06\%$$

3.2 Cenário após: Manutenção preditiva e IA

Cálculo da Disponibilidade (D)

Quadro 5

Componente de Tempo	Valor (Minutos)	Impacto da MP-IA
Parada Não Programada (Pós-IA)	360 min	Redução drástica das falhas críticas. (10% do tempo de parada anterior).
Tempo de Produção Líquido (C)	24.000 - 2.400 - 360	21.240 min

Fórmula: $D = \frac{\text{Tempo de Produção Líquido}}{\text{Tempo Disponível de Produção}}$

$$D = \frac{21.240 \text{ min}}{21.600 \text{ min}} \approx 0,9833$$

$$D_{\text{MP-IA}} \approx 98,33\%$$

Cálculo do Desempenho (P)

A intervenção preditiva e o monitoramento contínuo da IA garantem que o *chiller* e o compressor operem em condições ótimas.

Previsão de Desempenho: A manutenção preditiva e IA elimina perdas de velocidade e mantém a linha operando muito próxima da capacidade ideal.

$$P_{\text{MP-IA}} = 98,50\%$$

Cálculo da Qualidade (Q)

A IA monitora a termografia e a pressão (parâmetros de qualidade do xarope) continuamente, evitando desvios antes que afetem o produto. A meta é atingir ou superar o padrão de 99%.

$$Q_{\text{MP-IA}} = 99,00\%$$

OEE Final (Preditiva com IA)

$$OEE_{MP-IA} = D \times P \times Q$$

$$OEE_{MP-IA} = 0,9833 \times 0,9850 \times 0,9900$$

$$\mathbf{OEE}_{MP-IA} \approx 95,78\%$$

A implementação da Manutenção Preditiva Otimizada por IA no sistema *chiller* supera significativamente de 80% de OEE, levando a planta para o patamar de excelência operacional.

Quadro 6

Fator OEE	Cenário 1: Manutenção Corretiva	Cenário 2: Manutenção Preditiva com IA
Disponibilidade (D)	83,33%	98,33%
Desempenho (P)	94,44%	98,50%
Qualidade (Q)	98,00%	99,00%
OEE Total	77,06%	95,78%

O ganho mais expressivo está na Disponibilidade, que aumenta em 15 pontos percentuais, provando que a eliminação de paradas não planejadas pelo uso da IA é o principal fator de otimização de custo e produção.

METODOLOGIA DE MELHORIA CONTÍNUA APLICADA À MANUTENÇÃO PREDITIVA

A adoção de metodologias de melhoria contínua, como o ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act), tem se mostrado eficaz na identificação e na resolução de problemas, garantindo um modelo de gestão mais direcionado. A gestão da manutenção, por sua vez, se constitui de ações, normas e instruções relacionadas a um sistema estruturado, cujo a finalidade é definir objetivos e metas para obter o melhor aproveitamento de pessoas, equipamentos e materiais (Teixeira, 2015). Todas essas estratégias necessitam de uma ferramenta de gestão que possibilite a correta utilização dos recursos disponíveis e assegure o alcance dos resultados desejados. Nesse contexto, o ciclo PDCA, composto pelas etapas de Planejamento (P), Execução (D), Monitoramento (C) e Ações corretivas (A), mostra-se uma ferramenta ideal

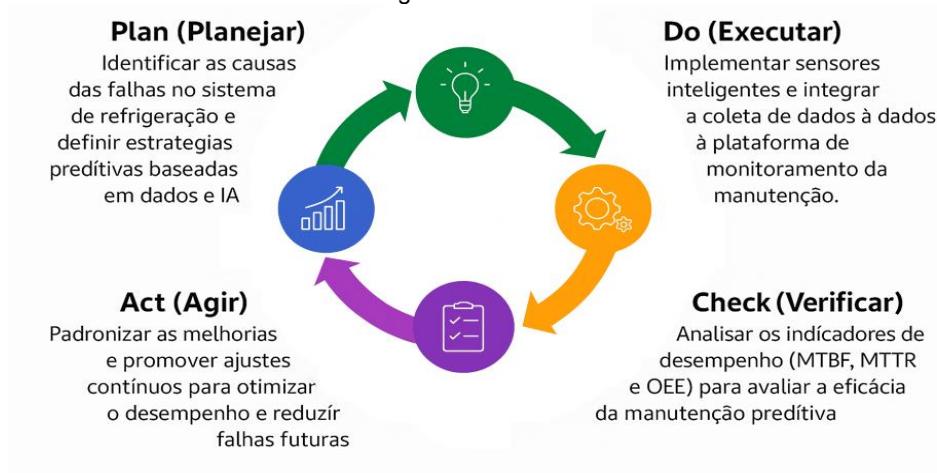
para a gestão da manutenção, devido a sua simplicidade e à promoção da melhoria contínua.

O ponto de partida é o exemplo observado na fábrica da Coca-Cola da Matola-Gare, em Moçambique, onde o sistema de refrigeração (chiller) foi identificado como um ponto crítico de vulnerabilidade devido à dependência da manutenção corretiva. A falha inesperada deste equipamento, indispesável para manter a temperatura do xarope a 14 °C, pode paralisar a produção de refrigerantes e gerar perdas consideráveis, evidenciando a importância de aplicar o PDCA como suporte para uma transição estratégica rumo à manutenção preditiva.

Metodologia (Ciclo PDCA)

PDCA é uma metodologia de gestão voltada para a melhoria contínua de processos, produtos e serviços. É um ciclo contínuo de planejamento, execução, verificação e ação, que busca garantir a eficiência, reduzir falhas e promover a evolução constante nas organizações.

Figura 1



Fonte: De autoria própria (2025)

Plan (Planejar)

O início da transição é estruturado pela etapa Plan do ciclo PDCA, focada em definir o problema e o plano de ação. O problema central é a baixa disponibilidade do chiller devido ao modelo corretivo.

Para detalhar as causas, utiliza-se o Diagrama de Ishikawa (Análise da Causa-Raiz). O plano de ação é a implementação da Manutenção Preditiva Otimizada por IA, que integra as técnicas de campo com a análise preditiva dos algoritmos.

Diagrama de Ishikawa

No contexto da gestão da qualidade e da melhoria contínua de processos, o Diagrama de Causa e Efeito também conhecido como Diagrama de Ishikawa ou Espinha de Peixe se destaca como um instrumento tradicional, porém indispensável. Sua função primária reside em auxiliar na identificação e no mapeamento das causas fundamentais (causas-raiz) que levam a um problema ou resultado indesejado (CARVALHO; PALADINI, 2012).

Em termos de estrutura, o Diagrama de Ishikawa é caracterizado por um processo analítico que se apoia em um conjunto de categorias predefinidas, universalmente conhecidas como 6Ms. Tais categorias representam os eixos principais de onde se originam as causas e englobam: Método, Máquina, Medida, Meio Ambiente, Mão de Obra e Material (ALMEIDA et al., 2017). Embora essa seja a estrutura completa, é crucial reconhecer a flexibilidade do modelo: nem sempre todas as seis categorias serão pertinentes ao detalhamento das causas, permitindo que a análise se ajuste à realidade específica do processo em estudo.

Adicionalmente, para que o diagrama seja construído de maneira eficaz, a simples aplicação do modelo dos 6Ms não é suficiente. É fundamental o envolvimento ativo da equipe que executa o processo. A experiência e o conhecimento prático dos colaboradores são insubstituíveis. Por isso, Nascimento (2021) estabelece que o desenvolvimento do diagrama exige a realização de uma sessão consultiva com os responsáveis diretos pela execução. Essa prática é vital para extrair a expertise do grupo, garantindo que as informações utilizadas na montagem do Diagrama de Ishikawa (Figura 2) refletem a realidade operacional e resultem em um diagnóstico preciso e completo

Figura 2



Fonte: De autoria própria (2025)

Do (Executar)

O OEE (Eficácia Global do Equipamento) é um indicador crucial para medir a contribuição dos equipamentos no desempenho industrial, sendo o melhor meio para quantificar sua eficácia durante a operação. A etapa Do envolve a instalação física dos sensores preditivos no *chiller* e, criticamente, a integração desses dados em tempo real na plataforma de IA. A execução se manifesta na alteração do fluxo de trabalho: as intervenções de manutenção passam a ser disparadas por alertas preditivos da IA (e não pela falha do equipamento), permitindo que a equipe execute o reparo planejado.

Check (Verificar)

A etapa Check valida a eficácia da nova estratégia. O principal indicador de verificação é o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que mede a eficácia do equipamento combinando Disponibilidade, Performance e Qualidade.

A intervenção preditiva e a automação de processos pela IA devem resultar em um aumento na Disponibilidade (redução do Tempo de Parada Não Planejada) e na Qualidade (redução de perdas e falhas do produto final). A análise dos novos valores do OEE valida o impacto financeiro e operacional da transição.

Act (Agir)

A etapa Act tem como objetivo padronizar e consolidar as melhorias. As ações de manutenção que demonstram eficácia são convertidas em planos de manutenção e procedimentos operacionais padrão. O modelo de manutenção Preditiva Ottimizada por IA é formalizado, com a criação de Dashboards de acompanhamento diário para monitoramento contínuo. O sucesso da intervenção torna o modelo replicável em outras organizações industriais que enfrentam desafios similares.

DISCUSSÃO E CONTRIBUIÇÃO ORIGINAL

Resultados e Implicações (Validando a fase Check)

A etapa de Verificação (Check) do ciclo PDCA é crucial para validar a transição da manutenção corretiva para a preditiva otimizada com IA. A eficácia da nova estratégia é quantificada pelo indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

A) Aumento na Disponibilidade: A intervenção preditiva, planejada com base nos alertas gerados pela Inteligência Artificial, permite uma redução significativa nas paradas não planejadas. Essa antecipação estratégica no ativo crítico (o *chiller*) garante maior disponibilidade e permite que a manutenção seja realizada no momento mais economicamente vantajoso.

B) Sustentabilidade da Qualidade: Ao garantir que o equipamento opere dentro das condições ideais por meio de monitoramento contínuo, o processo contribui para a estabilidade e a qualidade do produto final, reduzindo perdas e falhas, conforme refletido no fator Qualidade do OEE.

C) Validação Metodológica: O aumento no OEE geral valida o plano de implementação (MP com IA). Embora a parte descritiva (o que foi feito) esteja bem desenvolvida, a implicação é que a abordagem estruturada do PDCA torna a melhoria tangível e mensurável, diferentemente do modelo corretivo.

Contribuição da Inteligência Artificial (Inovação no PLAN)

A integração da IA representa a principal contribuição original deste trabalho. A IA otimiza a Manutenção Preditiva, superando as limitações da intervenção humana, conforme proposto na fase Plan.

A) Previsão Preditiva Avançada (Inovação Autoral): A IA não se limita a detectar anomalias (função das técnicas preditivas), mas a prever a probabilidade de falha e estimar o tempo de vida útil remanescente (RUL) por meio da análise de grandes volumes de dados. Isso reforça o que exatamente é a inovação proposta pelos autores e não apenas uma extensão do estudo de Machava.

B) Automação e Eficiência: A IA potencializa as ações da fase Do ao automatizar a geração de ordens de serviço e a análise de dados. Essa automação converte o departamento de manutenção de um centro de custo para um pilar estratégico da eficiência operacional.

4.2.3 Implicações e Replicabilidade (Direcionamento da Fase ACT)

A fase Act do PDCA foca na padronização e no aprendizado, garantindo a sustentabilidade e a relevância prática do trabalho.

A) Replicabilidade do Modelo: A base teórica, a aplicação do PDCA e o uso do OEE estão bem alinhados com a área, o que confere ao trabalho um valor de replicabilidade em outras plantas industriais. O modelo de MP Otimizada por IA deve ser formalizado para que outras indústrias com desafios similares possam adotá-lo.

B) Limitações e Desafios: É crucial discutir as implicações críticas. O sucesso da transição exige o reconhecimento de barreiras de implementação real, incluindo investimentos iniciais significativos em infraestrutura e capacitação técnica da equipe. Além disso, a qualidade e a consistência dos dados coletados pelos sensores são críticas para não comprometer a análise preditiva.

CONCLUSÃO

A transição da manutenção corretiva para a manutenção preditiva com suporte de inteligência artificial representa uma mudança estratégica essencial para o aumento da confiabilidade e da eficiência operacional nas indústrias modernas. O estudo de caso aplicado à fábrica da Coca-Cola em Matola-Gare evidenciou, de forma clara, as limitações do modelo corretivo, responsável por paradas não planejadas, desperdícios de recursos e comprometimento da produtividade. Em contrapartida, a implementação de um plano de manutenção preditiva otimizado pela IA demonstrou ganhos expressivos em disponibilidade, desempenho e qualidade refletidos na elevação do OEE de 77,06% para 95,78%, aproximando a planta dos padrões de classe mundial.

A análise desenvolvida confirmou que o uso de sensores inteligentes, combinados a algoritmos de aprendizado de máquina, permite prever falhas com antecedência, reduzindo custos e tempo de inatividade. A integração da IA amplia a capacidade de decisão, transformando a manutenção em uma atividade estratégica e não apenas corretiva, capaz de gerar vantagem competitiva e sustentabilidade operacional.

O emprego do ciclo PDCA como metodologia de melhoria contínua mostrou-se fundamental para estruturar o processo de mudança, garantindo que cada fase — planejamento, execução, verificação e padronização — fosse conduzida de forma sistemática e mensurável. Tal abordagem consolidou a aplicabilidade do modelo e reforçou seu potencial replicabilidade em outras plantas industriais com desafios semelhantes.

Conclui-se, portanto, que a manutenção preditiva otimizada por inteligência artificial não apenas melhora o desempenho técnico dos equipamentos, mas redefine o papel da manutenção dentro da organização, elevando-a ao patamar de ferramenta estratégica de gestão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MACHAVA, Nunes Fernando. Proposta de implementação de um plano de manutenção preditiva para o sistema de refrigeração chiller na Coca-Cola da Matola- Gare. 2023.

MOBLEY, R. Keith. *Maintenance Fundamentals*. 2. ed. New York: Butterworth-Heinemann, 2002.

HIGGINS, Lindley R. *Maintenance Engineering Handbook*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

DA SILVA LIMA, Leandro. Uma Abordagem Sobre a Manutenção Preventiva Como Meio Para Diminuir a Manutenção Corretiva, Pitágoras 2011

Transição estratégica da manutenção corretiva para a manutenção preditiva com suporte de inteligência artificial: estudo de caso aplicado à fábrica da Coca-Cola em Matola-Gare.

CARVALHO, Marly Monteiro, PALADINI, Edson Pacheco. Gestão da Qualidade: Teoria da Qualidade. Rio de Janeiro: Campos. 2005.

SILVA, M. T.; ALMEIDA, D. R.

Manutenção preditiva com sensores inteligentes: estudo de caso em sistemas de refrigeração da indústria alimentícia. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 28, n. 2, p. 77–90, 2013.

BUSSO, Christianne Matias; MIYAKE, Dario Ikuo. Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica. Production, v. 23, p. 205-225, 2013.

Teixeira, Matheus; Silva, Sérgio R.; Medeiros, Jailson T. O CICLO PDCA COMO FERRAMENTA PARA ALCANÇAR A EFICIÊNCIA E EFICÁCIA NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO (2015)

CAPÍTULO 5

OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO ESTRATÉGICA DE RASPADORES

Leonardo Carvalho Matos de Moura

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
leoo.carvalho.matos@gmail.com

Matheus Alves Pinto

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção
matheusalvespinto@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM),
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

O presente estudo esclareceu sobre o que são correias transportadoras e os seus componentes, bem como explicou o que são raspadores de correia e elucidou sucintamente sobre a correta instalação dos raspadores primários em correias transportadoras, visando minimizar a quantidade de material de transporte que se acumula sob um transportador, reduzindo assim os custos, desperdícios e, principalmente, os perigos em que os colaboradores são expostos durante as suas atividades de limpeza, causadas pela queda de material.

Palavras-chave: Transporte; Correias transportadoras; Raspadores, logística.

INTRODUÇÃO

O interesse por um método eficiente e econômico para transportar materiais a granel tem crescido constantemente. Atualmente, o transporte por

meio de correias transportadoras é o método mais empregado para esse fim, sendo amplamente adotado por empresas de diversos setores, como mineração, siderurgia, pedreiras e agronegócios. Esses equipamentos são altamente reconhecidos por profissionais da indústria e são essenciais para o transporte de diversos tipos de materiais, desde os leves, como embalagens, até os pesados, típicos da mineração.

De acordo com a Mercúrio, as primeiras correias transportadoras surgiram na Inglaterra, na segunda metade do século XVIII, como resultado dos avanços da Revolução Industrial. Inicialmente, eram feitos de lona, couro ou borracha e deslizavam sobre superfícies planas de madeira. Esses equipamentos simples eram usados principalmente em padarias e matadouros. Posteriormente, passou a transportar caminhões para navios de curta distância. Com o tempo, essas correias foram aprimoradas e, em 1804, a Marinha Britânica instalou uma correia transportadora acionada por máquina a vapor.

As correias transportadoras mantêm sua posição no transporte de materiais graças a vantagens como economia, segurança na operação, confiabilidade, confiança e ampla capacidade. Eles são utilizados em diversos setores e possuem características técnicas que permitem sua aplicação em sistemas de transporte e elevação de materiais de diferentes tamanhos, desde pequenos até grandes, conforme sua configuração adequada (FERDORKO et al., 2013; ANDRIANOV e HORSSEN, 2008).

Os transportadores de correia vêm sendo utilizados há décadas para movimentar grandes quantidades de materiais em longas distâncias. Provaram-se por várias vezes serem um método confiável e econômico para esta tarefa. As correias podem transportar materiais subindo inclinações íngremes, contornando cantos, sobre montanhas e vales, através de cursos d'água, sobre o chão ou abaixo dele. Estes se integram bem a outros processos, como britagem, peneiramento, carregamento e descarregamento de vagões e navios e operações de empilhamento e recuperação.

Entretanto o domínio desta ferramenta pode não ser tarefa simples, caso alguns fatores sejam negligenciados, desde a concepção de projeto até os cuidados na operação e manutenção. Dentre os fatores determinantes para o sucesso de uma operação de transporte de grãos está, justamente, a limpeza deles. E incluso neste quesito encontram-se os estudos e avaliações sobre os equipamentos de raspagem dos materiais que ficam retidos no transportador, que, caso não sejam removidos, podem gerar problemas catastróficos, tanto relacionados a questões ambientais, quanto a saúde dos colaboradores que atuam em plantas operadas através de correias transportadoras. Dentre tais estudos, inclui-se o presente trabalho, que busca a determinação da correta utilização dos raspadores sobre a correia transportadora.

OBJETIVO

Determinar a correta aplicação dos raspadores em correias transportadoras.

Objetivo Geral

A finalidade principal do presente trabalho é determinar o posicionamento correto de raspadores primários de correias transportadoras diante de variadas condições de serviços, tanto ambientais (temperatura e umidade), bem como variações nas propriedades do material transportado (granulometria, densidade e umidade).

Objetivo Específico

Como finalidade específica, ao determinar-se o posicionamento ideal, os resultados deste estudo devem fornecer aos operadores dos equipamentos informações que lhes permitam minimizar a quantidade de material de transporte que se acumula sob um transportador, reduzindo assim os custos e, principalmente, os perigos na limpeza causadas por este material fugitivo.

JUSTIFICATIVA

Para um controle efetivo do material transportado faz-se necessário, impreterivelmente, uma aplicação correta das ferramentas de limpeza do transportador de correias.

Dentro deste grupo de equipamentos inclui-se os raspadores. De modo que, conhecer e medir sua eficiência, bem como suas limitações, será sempre chave fundamental para o sucesso na operação de qualquer planta que faz uso do manuseio de granéis.

A posição correta que a lâmina deve exercer sobre a correia, geralmente, é informada pelo fabricante dos limpadores. Entretanto, também é comum neste mercado, a comercialização dos equipamentos em uma modalidade de contrato conhecida como comodato, que se caracteriza como o empréstimo gratuito de coisas não fungíveis, ou seja, objetos que não se gastam ou não se consomem após o uso. De modo que o fabricante entrega ao cliente o raspador e cobra apenas pela comercialização das lâminas, que, de fato, é o elemento que se desgasta. O que pode se configurar em um dilema para empresa que compra o equipamento, onde o fabricante determina a forma correta de uso e, concomitantemente, obtém ganhos proporcionais exclusivamente com a frequência de troca das lâminas. Com isso surge a necessidade de estabelecer um método prático para avaliação de desempenho dos raspadores.

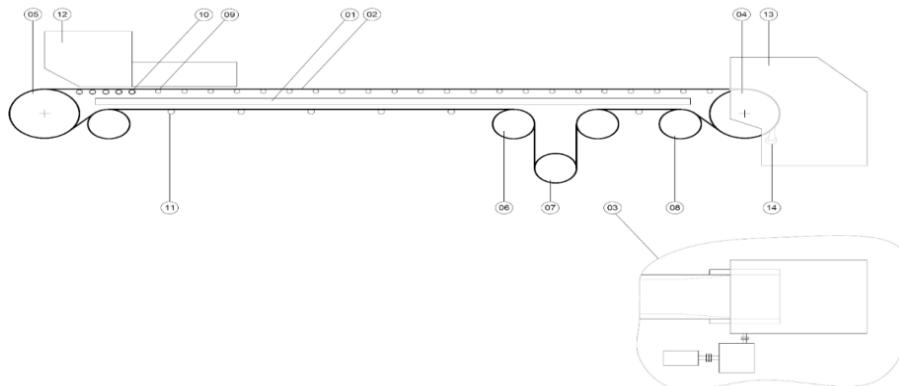
DESENVOLVIMENTO

Os transportadores de correia são, de longe, o transportador de manuseio de materiais mais comum em uso hoje. Eles são geralmente o

transportador motorizado menos custoso e capazes de lidar com uma ampla gama de materiais. Dependendo do tipo escolhido, os transportadores de correia podem transportar tudo, desde cascalho e carvão soltos até caixas de papelão rígidas cheias de produtos (McGuire, 1962).

Tipicamente, os transportadores de correia são usados para transportar materiais por longas distâncias com um único motor. Os transportadores de correia podem variar de uma única unidade com apenas poucos centímetros de comprimento até unidades combinadas que cobrem milhares de metros. A larga utilização dos transportadores de correia é maior comprovação do seu alto desempenho, rapidez e economia na movimentação dos mais variados tipos de carga. É importante fazer uma distinção: o termo “transportador de correia” refere-se ao equipamento completo, enquanto “correia transportadora” designa apenas a correia em si. A referir-se a um transportador de correia trata-se por relacionar uma série de elementos que devem ser bem analisados, pois todos eles participam de maneira direta para o cumprimento da finalidade de um projeto. Na Figura 1 foram listados os pontos de 01 a 14, a fim de fornecer a nomenclatura e o posicionamento dos componentes de um transportador de correia convencional, conforme apresentado em vários manuais de transportadores, como o Manual Técnico de Correias Transportadoras da fabricante de correias Mercúrio:

Figura 1 - Componentes de um transportador de correia: 01 - Estrutura, 02 - Correia Transportadora, 03 - Conjunto de Acionamento, 04 - Tambor de Acionamento, 05 - Tambor de Retorno, 06 - Tambor de Desvio, 07 - Tambor de Esticamento, 08 - Tambor de Encosto, 09 - Rolete de Carga, 10 - Rolete de Impacto, 11 - Rolete de Retorno, 12 - Chute de Alimentação, 13 - Chute de Descarga, 14 - Raspador.



Fonte: Imagem do autor, 2024.

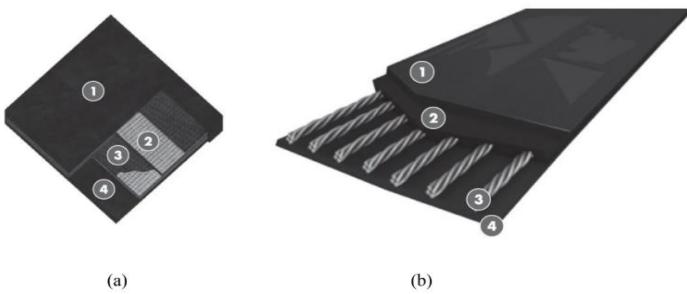
Correias

Para se entender uma correia transportadora é fundamental compreender sua construção. Basicamente é constituída por carcaça e coberturas. Para um transportador a correia em si é o principal e mais

importante elemento, e, como tal, representa uma grande fatia do seu custo. Operar de forma eficiente uma correia transportadora é um fator determinante para a produtividade da planta onde ela tenha sido instalada, de modo que garantir sua integridade deve ser o foco de todos que interajam com ela.

As correias, de modo geral, são constituídas de coberturas de borracha ou policloreto de polivinila (PVC) combinadas com uma carcaça responsável pelo tensionamento interno que pode ser fabricado com tecidos sintéticos ou cabos de aço. Sendo que a carcaça possui a função mais importante do ponto de vista de estrutural (SWINDERMAN et al, 2009). Ou seja, os quatro componentes básicos de uma correia, como mostrados na Figura 2, são: cobertura superior, borracha de ligação, reforço (lona ou cabo de aço), cobertura inferior.

Figura 2 - Componentes básicos de uma correia transportadora: (a) 1 - Cobertura Superior, 2 - Borracha de Ligação, 3 - Lona, 4 - Cobertura Inferior. (b) 1 - Cobertura Superior, 2 - Borracha de Ligação, 3 - Cabo de Aço, 4 - Cobertura Inferior



Fonte: Manual técnico correias transportadoras Mercúrio, 2014.

Raspadores

Na tentativa de reduzir o problema de derramamento, a indústria de transportadores desenvolveu vários métodos para limpar as correias transportadoras operacionais. Estes métodos de limpeza variam muito em design e eficácia. A maioria tenta remover o material aderente da correia raspando ou limpando a correia quando ela se separa do lado inferior do tambor-cabeça para iniciar a sua viagem de retorno sob a estrutura do transportador.

Muitos métodos diferentes são usados para realizar a limpeza, estes incluem: raspagem com lâminas rígidas, raspagem com lâminas montadas na mola ou móveis, escovar com escovas rotativas. Sendo que o mais comumente utilizado destes sistemas é o dispositivo de raspagem de lâmina segmentada, conforme RHOADES, HEBBLE, GRANNES (1989).

Geralmente, os sistemas de limpeza são formados por um ou mais raspadores instalados na polia de descarga (frontal) ou em sua proximidade, com a função de remover os resíduos aderidos à correia enquanto ela passa pela polia motriz. Raspador de correia é definido pela ABNT NBR 6177:2016

como “dispositivos mecânicos, dotados de ajustes mecânicos, pneumáticos, hidráulicos ou elétricos, que possuem elementos de desgaste que tocam a correia transportadora de forma a promover a retirada de uma fração agregada na correia após a descarga do material transportado”.

Em um sistema de limpeza, é mais seguro e eficaz aplicar diversos impactos intermitentes e intensos do que um único golpe com maior pressão e ângulo agressivo. Por essa razão, costuma-se utilizar um sistema de múltiplos raspadores, formado por um raspador primário (Figura 3) e ao menos um raspador secundário (Figura 4).

Defina-se como raspador secundário qualquer raspador posicionado na área que vai desde o ponto em que a correia se desprende da polia motriz até a área anterior ao contato da correia com a polia traseira. Já o raspador primário é definido como aquele instalado na superfície do tambor dianteiro (cabeça) logo abaixo da trajetória onde o material é descarregado da correia. Este utiliza a uma baixa pressão da lâmina na correia para remover a camada superior e a maioria do material morto. Isso permite que o raspador secundário, ajustado com a pressão ideal para a limpeza da correia, efetue uma remoção final precisa dos resíduos aderentes, sem ser sobre carregado por uma massa excessiva de material acumulado.

Cada tipo de raspador assume funções específicas na tarefa de limpar a correia, motivo pelo qual são específicos e fabricados de maneiras diferentes (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 3 - Raspador primário



Fonte: Martin Engineering, 2025.

Figura 4 - Raspador secundário



Fonte: Martin Engineering, 2025.

Procedimentos Básicos de Sistemas de Limpeza Eficazes

Geralmente o raspador primário é posicionado à frente da polia motriz, conforme ilustrado na Figura 5, logo abaixo do local onde o material é descarregado da correia. Essa posição oferece uma vantagem significativa, pois o material de retorno é imediatamente reintegrado ao fluxo principal, proporcionando a chance de liberação sobre os componentes de rolamento e no ambiente fabril.

Quando os raspadores são tensionados contra a correia, que ainda estão atualizados nas polias frontais, o controle da pressão entre a lâmina e a correia torna-se mais preciso. A polia motriz oferece uma superfície firme para a fixação do raspador. Aproveitar o espaço disponível fixando o primeiro raspador na posição primária libera mais espaço para a instalação de um ou mais raspadores nas posições secundárias e terciárias. Com o raspador primário instalado, quanto mais à frente dos demais raspadores, menor será a possibilidade de fuga do material de retorno (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 5 - Posicionamento do raspador no ciclo de retorno do transportador



Fonte: Martin Engineering, 2025.

Um raspador colocado na trajetória do material pode causar danos prematuros no suporte e na parte posterior das lâminas, exigindo a substituição das lâminas antes que a capacidade de limpeza seja comprometida. O posicionamento ideal de um raspador na posição primária requer que a ponta da lâmina fique abaixo da linha horizontal da polia, conforme a figura 6. Apesar de instalado fora da trajetória do material, o raspador ainda pode acumular material aderido em suas superfícies externas.

Figura 6 - Instalação do raspador fora do fluxo de material



Fonte: Martin Engineering, 2025.

Um aspecto fundamental na escolha de um raspador é reduzir ao máximo qualquer risco que ele possa representar à correia ou à emenda, uma vez que esses sistemas são instalados justamente para proteger a correia.

Os sistemas de limpeza devem ser projetados para permitir que a lâmina se desloque sobre a correia caso uma emenda, uma seção danificada ou outra obstrução ultrapasse o raspador junto com a correia.

Os sistemas de tensionamento do raspador, especialmente do primário, onde o ângulo de ataque é mais acentuado, precisam incluir um mecanismo que proteja contra o impacto da emenda. Um raspador primário agressivo, com alta pressão de limpeza, tende a danificar mais rapidamente a superfície da correia, apresentando um risco maior de prender-se em saliências da emenda ou da correia.

É importante escolher cuidadosamente o material em contato com a correia. Materiais como fatias de correias usadas nunca devem ser usados como elementos de limpeza ou colocação, pois podem conter cabos de aço ou resíduos que causem danos. Esses materiais fixados provocam desgaste excessivo na cobertura da correia (SWINDERMAN et al., 2009).

Princípios de Projeto de Raspadores

Embora existam outros sistemas de limpeza, como os pneumáticos e de fricção, a maioria dos raspadores ainda é do tipo laminado. Esses equipamentos utilizam uma lâmina para remover o material da superfície da correia e acionam uma fonte de energia, como uma mola, reservatório de ar comprimido ou elemento espiral elastomérico, para pressionar a ponta do raspador contra a correia.

A lâmina que entra em contato direto com a correia está sujeita a desgastes e danos, devendo ser reajustada periodicamente e reduzida quando necessário para garantir a eficiência da limpeza (SWINDERMAN et al., 2009).

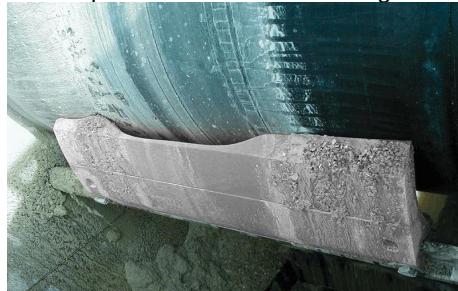
Área da Correia Coberta pelo Raspador

Normalmente, as lâminas dos raspadores não cobrem toda a largura da correia, já que nem sempre são usadas integralmente para transportar materiais. A CEMA recomenda que a lâmina cubra no mínimo dois terços da largura da correia. Diferentes fabricantes possuem suas próprias medidas padrão de cobertura das lâminas. Embora muitos adotem uma cobertura mínima maior, raramente a largura da lâmina é igual ou superior à largura total da correia.

Para uma limpeza eficiente, é importante observar ou calcular a largura do material transportado sobre a correia e compará-la com a largura do raspador. Em alguns casos, usar uma lâmina mais larga, pois a faixa de diâmetro do material pode gerar padrões indesejados de desgaste. A parte central da lâmina tende a se desgastar mais rapidamente do que as extremidades, pois concentra maior quantidade de material abrasivo. Isso faz com que as bordas da lâmina se afixem à correia, permitindo a passagem do material de retorno entre a lâmina e a correia, o que acelera o desgaste central da lâmina (Figura 7).

O material sobre a correia também atua como agente de refrigeração e lubrificação para a lâmina, por isso é fundamental evitar a cobertura excessiva da correia. Na ausência desse efeito de drenagem, o calor acumulado nas extremidades da lâmina pode causar falhas na lâmina e danos à correia (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 7 - Exemplo de raspador com excesso de desgaste no centro da correia



Fonte: SWINDERMAN, 2009.

Segmentos de Lâmina Simples ou Múltiplos

Um projeto que utiliza múltiplas lâminas com molas individuais ou suportes de elastômero para cada lâmina de limpeza garante que cada uma mantenha uma tensão adequada, permitindo que elas cedam a pressão mais baixas em vez de suportar a força total do dispositivo de tensionamento. Lâminas estreitas têm melhor desempenho, pois acompanham as variações no contorno da correia, saltam para permitir a passagem da emenda e retornam à posição de limpeza com maior facilidade do que uma lâmina única. Isso torna o sistema de lâminas múltiplas mais eficaz e seguro tanto para o raspador quanto para a correia. Avanços recentes em poliuretano

melhoraram o desempenho das lâminas simples na manutenção do contato com a correia.

Diversos materiais são usados na fabricação das lâminas dos raspadores, incluindo borracha, poliuretano, aço leve e aço inoxidável. Muitas lâminas são reforçadas com enxertos de carboneto de tungstênio ou incorporam ligas, contas ou pedaços de vidro para melhorar sua resistência ao desgaste e eficiência na limpeza. Os fabricantes ampliaram uma variedade de poliuretanos disponíveis, buscando melhor desempenho em condições específicas, como maior resistência ao desgaste, calor, produtos químicos e umidade. Em alguns casos, testes comparativos são necessários para identificar o material mais adequado para cada aplicação (SWINDERMAN et al., 2009).

Principais Materiais para Lâminas de Raspadores

Os raspadores de correias transportadoras utilizam lâminas fabricadas a partir de materiais específicos para garantir uma limpeza eficiente e proteger a integridade da correia. O poliuretano é um dos materiais mais comuns, sendo bastante popular pela sua alta resistência à abrasão, flexibilidade e por ser mais suave para a correia, funcionando bem, inclusive, com emendas grampeadas. Para aplicações mais rigorosas e com maior necessidade de durabilidade, utiliza-se o carboneto de tungstênio (ou metal duro), que oferece um desempenho superior em termos de vida útil e desgaste uniforme. Outros materiais, como o aço inoxidável, são empregados em componentes de raspadores para resistência à corrosão, especialmente em aplicações como mineração e processamento de alimentos, dependendo sempre das características do material transportado (abrasividade, temperatura etc.) e da aplicação.

A escolha entre poliuretano e carboneto de tungstênio para lâminas de raspadores de correias transportadoras depende diretamente da aplicação, do tipo de material e do estado da correia.

Poliuretano (PU)

Vantagens	Desvantagens
Suavidade para a Correia: É um material mais macio e flexível, que minimiza o desgaste e a chance de danos à superfície da correia.	Menor Durabilidade/Eficiência em Serviços Pesados: Desgasta-se mais rapidamente do que o metal duro em aplicações de alta abrasão e limpeza pesada.

<p>Compatibilidade com Emendas: Funciona bem em correias que utilizam emendas com grampos (mecânicas), sem danificá-las.</p>	<p>Limpeza Menos Agressiva: Pode não atingir a mesma eficiência de limpeza (remoção de material fino) que o carboneto de tungstênio em certas aplicações.</p>
<p>Conformidade com a Correia: Pode se desgastar no formato da correia (conformação) ao longo do tempo, mantendo uma limpeza eficaz mesmo em correias gastas, irregulares ou com deformidades.</p>	<p>Resistência Química: Embora tenha boa resistência química, formulações específicas podem ser necessárias para aplicações com exposição severa a certos produtos químicos.</p>

Carboneto de Tungstênio (Metal duro)

Vantagens	Desvantagens
<p>Durabilidade e Longa Vida Útil: É extremamente duro e resistente à abrasão, durando significativamente mais tempo em ambientes agressivos.</p>	<p>Maior Risco de Dano à Correia: Por ser um material muito duro, há um risco maior de danificar a correia (especialmente emendas com grampos ou a própria superfície) se o tensionamento não for ajustado corretamente.</p>
<p>Eficiência de Limpeza Superior: Sua dureza e perfil de desgaste uniforme oferecem uma eficiência de limpeza superior, removendo mais material, inclusive partículas finas.</p>	<p>Não Recomendado para Emendas Mecânicas: Geralmente não é recomendado para correias com emendas grampeadas, sendo ideal apenas para correias vulcanizadas.</p>
<p>Melhor Desempenho em Condições Severas: É o material preferido para aplicações pesadas, alta velocidade e materiais altamente abrasivos (ex.: coque, clínquer, minério de ferro).</p>	<p>Preço: Tende a ser mais caro que o poliuretano.</p>

2.8 Selecionar um Raspador de Correia

A seleção de um raspador para uma aplicação específica exige uma análise de diversos fatores. A seguir, estão as informações básicas que um fornecedor precisa ter para recomendar um sistema de limpeza adequado:

(1) Velocidade e largura da correia; (2) Largura da carga sobre a correia; (3) Diâmetro da polia; (4) Características do material (inclusive

tamanho da partícula, teor de umidade, temperatura, abrasividade e corrosividade); (5) Comprimento do transportador.

O comprimento do transportador é uma variável importante, pois a ação ondulatória da correia ao passar sobre as roldanas faz com que o material se fixe e se compacte na correia. Esse efeito é especialmente significativo em transportadores longos utilizados em aplicações terrestres, tornando a limpeza dessas correias mais desafiadora em comparação com correias mais curtas. Além disso, correias curtas ou vazias que funcionam por longos períodos podem apresentar problemas de aquecimento gerados pelo raspador, devido à fricção entre a lâmina e a correia.

Quando uma lâmina está em contato contínuo com a correia, o atrito provoca aquecimento, que pode se acumular na lâmina e no seu mecanismo de retenção, reduzindo sua vida útil ou até danificando o suporte. Em correias curtas, a capacidade de cobertura para dissipar esse calor é limitada, o que pode levar à manipulação. A aplicação de alta tensão do raspador contra a correia pode agravar o problema, fazendo com que a lâmina fique presa na correia quando está parada.

Além do comprimento, outras variáveis que influenciam o desempenho ideal do sistema de limpeza e que devem ser consideradas na seleção incluem:

(1) Espaço disponível para instalação e manutenção; (2) Possibilidade de mudanças nas características do material transportado, como variações entre material molhado e aderente ou seco e fragmentado; (3) condições extremas de temperatura; (4) Danos na superfície da correia, como cortes, fendas, riscos ou rachaduras causados por desgaste ou uso inadequado; (5) Emendas mecânicas deformadas, sólidas ou múltiplas; (6) Vibração da correia, geralmente causada pelo acúmulo de material nas polias e em outros componentes de rolamento, dificultando o contato constante do raspador com a correia; (7) Material que pode aderir ou envolver no sistema de limpeza; (8) Acúmulo de material sem rampa de desvio.

Na elaboração de uma proposta por parte do fornecedor e na análise dessa proposta, é importante considerar diversos aspectos, tais como:

- (1) O nível desejado ou exigido de desempenho na limpeza;
- (2) O nível necessário ou disponível para manutenção do sistema;
- (3) Habilidade e experiência para a instalação;
- (4) O preço inicial em comparação com o custo total de propriedade ao longo do tempo;
- (5) A confiança do fabricante, incluindo a qualidade do serviço oferecido e garantias de desempenho.

Existem diversas facilidades disponíveis para auxiliar na combinação entre um sistema de limpeza e sua aplicação específica, incluindo sistemas

de seleção online. Esses sistemas analisam características do material transportado e as especificações do transportador para oferecer recomendações de raspadores de correia adequados. Essas ferramentas otimizaram o processo de escolha, trazendo eficiência e assertividade ao identificar o modelo mais adequado para cada contexto operacional. Além disso, facilitam a redução de erros e o tempo para implementação do sistema de limpeza, contribuindo para a manutenção da integridade e desempenho das correias transportadoras (SWINDERMAN et al., 2009).

Instalação de Raspadores

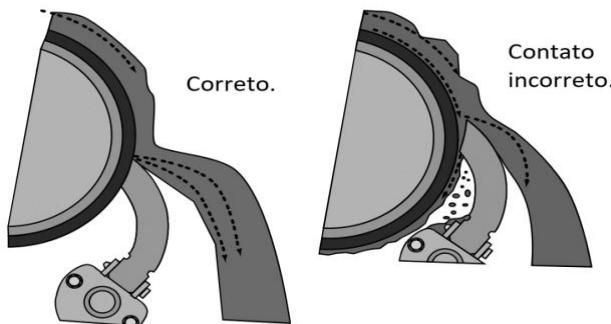
A instalação adequada é um fator crítico para o desempenho eficaz do sistema de limpeza da correia transportadora. Uma instalação incorreta pode comprometer o desempenho do raspador, reduzindo a vida útil da lâmina e a eficiência da limpeza. Por isso, conforme as instruções fornecidas pelo fabricante devem ser seguidas rigorosamente. Entre os fatores que influenciam a posição de instalação do raspador estão:

- (1) O modelo do limpador;
- (2) Os requisitos de tensionamento e montagem;
- (3) A necessidade de soldagem ou fixação do raspador;
- (4) A forma de instalação, seja em parede de calha ou suspensão por molas;
- (5) A posição dos condutores, rolamentos e vigas do transportador.

Independentemente da marca, o ponto essencial na instalação é que a estrutura de suporte do raspador seja posicionada a uma distância correta da superfície da correia (Figura 10). Essa distância adequada evita problemas como a “recuperação”, quando a correia puxa o raspador invertido, resultando em danos estruturais. Mantenha a distância correta e garantida de que a lâmina fique no ângulo ideal para proporcionar limpeza eficiente, desgaste controlado e longa durabilidade.

É comum que raspadores primários tenham uma ponta da lâmina em contato inicial com a correia e que o dispositivo gire para manter esse contato conforme a ponta se desgastar. No entanto, problemas ocorrem quando a lâmina de elastômero é instalada muito próxima da correia, fazendo com que a base da lâmina toque a correia antes da ponta. Isso gera um espaço onde o material pode se acumular, forçando a lâmina para fora e permitindo que grandes quantidades de material passem sem serem removidas, aumentando o desgaste e prejudicando a eficácia da limpeza. A solução é preservar a distância correta para que a ponta da lâmina seja o primeiro ponto de contato (SWINDERMAN et al., 2009).

Figura 10 - Posicionamento da base do raspador primário



Fonte: SWINDERMAN, 2009.

Custos de Manutenção e Impactos na Produção

Falhas em raspadores de correia transportadora podem causar grandes prejuízos, indo muito além do custo de uma simples substituição de peça. Para entender melhor os custos e impactos, vamos analisar um caso que reflete o cenário real encontrado na indústria.

Cenário: Falha de um Raspador Secundário

Uma mineradora de grande porte utiliza uma correia transportadora para transportar minério de ferro. O sistema é crítico para a operação, e a manutenção é programada para ocorrer a cada 3 meses.

O raspador secundário, que deveria remover finos e umidade da correia, falha prematuramente. Isso significa que ele para de funcionar corretamente, acarretando impactos diretos e indiretos, tais como:

- Acúmulo de material e derramamentos: Sem a raspagem adequada, o minério de ferro úmido e pegajoso começa a se acumular nas polias, roletes e estruturas.
- Custo com a mão de obra extra para limpeza, estimado em R\$ 4.000 por dia até que o problema seja resolvido.
- Danos a Componentes do transportador devido ao acúmulo de material, aumentando o desgaste e a carga sobre os roletes e as polias. A sobrecarga leva à falha do rolamento nos roletes, que precisa ser substituído.
- Custo com a substituição do rolete e seu rolamento é de R\$ 1.500. O tempo de inatividade para a substituição é de 2 horas, resultando em uma perda de R\$ 4.400.000,00 na produção (considerando uma produção de 5.000 toneladas por hora).

- Aumento do desgaste da correia: Embora a correia não falhe imediatamente, sua vida útil é reduzida em 20%. O custo médio de uma nova correia é de R\$ 200.000,00. A redução de 20% representa um prejuízo futuro de R\$ 40.000 em custos de substituição antecipada.
- Riscos de segurança: Derramamentos de material criam um ambiente de trabalho perigoso, com riscos de escorregamento e quedas. A limpeza manual em áreas de difícil acesso aumenta a exposição dos trabalhadores a riscos.

Este caso demonstra que o custo de uma falha em um raspador de correia é muito maior do que o custo de um novo raspador, que pode variar entre R\$ 2.000 e R\$ 10.000, dependendo do modelo. O valor de um bom raspador não está apenas em sua durabilidade, mas na prevenção de custos indiretos e sistêmicos que podem paralisar a produção e gerar prejuízos significativos. Investir em raspadores de alta qualidade e em um plano de manutenção preditiva e preventiva é fundamental para garantir a eficiência e a segurança das operações.

A Importância do MTBF para Raspadores de correia

O MTBF representa o tempo médio de operação de um equipamento ou componente entre a ocorrência de uma falha e a próxima. Para os raspadores de correias transportadoras, ter um MTBF alto é vital, pois falhas nesses componentes podem levar a:

- Acúmulo excessivo de material (carryback): Aumentando a necessidade de limpeza, o desgaste da correia e de outros componentes (roletes, tambores) e o risco de acidentes.
- Danos à correia: Desgaste desigual ou desregulagem das lâminas podem danificar a superfície da correia, causando rasgos e interrupções caras e prolongadas.
- Paradas não planejadas: A falha de um raspador pode exigir uma parada de emergência para reparo ou substituição, impactando a produtividade do sistema de transporte.

Modos de Falha Comuns em Raspadores

Os modos de falha que influenciam o MTBF dos raspadores geralmente estão ligados a:

- Desgaste da Lâmina: É o modo de falha mais comum. Lâminas desgastadas perdem a eficiência de raspagem, resultando em carryback e exigindo a troca. O monitoramento contínuo (por exemplo, por vibração ou inspeção) pode ajudar a prever o momento da falha potencial (Curva P-F) e planejar a manutenção.
- Desregulagem/Perda de Tensão: A perda da pressão adequada entre a lâmina e a correia (tensão) impede a remoção eficiente do material, sendo considerada uma falha funcional.
- Danos Mecânicos/Estruturais: Quebra de suportes, molas ou outros mecanismos que fixam ou tencionam o raspador, resultando em inoperância total ou parcial.

O cálculo básico do MTBF é feito pela fórmula: $MTBF = \frac{\text{Tempo Total de Operação}}{\text{Número de Falhas}}$

O "Tempo Total de Operação" é o tempo em que o raspador estava funcionando corretamente entre a primeira falha e a última falha (ou até o momento da análise), descontando o tempo de manutenção (MTTR).

Para aumentar o MTBF de um raspador, a gestão de manutenção deve focar em:

- Monitoramento de Condição: Evoluindo na indústria 4.0, o uso de tecnologias como análise de vibração e dados sensitivos (inspeções) para prever o desgaste da lâmina e a perda de tensão antes que causem uma falha funcional, permitindo a substituição ou ajuste de forma planejada (Manutenção Preditiva).
- Manutenção Preventiva Eficaz: Estabelecimento de um plano de inspeções e ajustes periódicos que garantam a correta tensão e alinhamento do raspador.

TQM (Total Quality Management)

O TQM (Total Quality Management - Gestão da Qualidade Total) se enquadra na aplicação correta de raspadores ao transformar a limpeza da correia de uma tarefa isolada de manutenção para uma filosofia sistêmica que envolve todos os aspectos da operação para garantir a máxima eficiência e qualidade.

Em vez de apenas reagir ao desgaste do raspador, o TQM aplica seus princípios para prevenir a ineficiência, o carryback (material que adere e cai) e as falhas que os raspadores devem evitar.

Como o TQM Se Aplica aos Raspadores

Os principais pilares do TQM (Foco no Cliente, Melhoria Contínua, Envolvimento Total e Abordagem Baseada em Fatos) se manifestam da seguinte forma:

5.1 Foco no Cliente (Interno)

O "cliente" do raspador é o restante do sistema de transporte.

Definindo a Qualidade: A Qualidade do raspador não é apenas sua durabilidade, mas sua eficiência em limpar a correia. O objetivo é que a correia retorne limpa, sem material residual (carryback), que danificaria roletes de retorno, causaria desalinhamento e exigiria limpeza manual.

Requisitos: O TQM garante que o tipo de raspador (primário, secundário) e o material da lâmina sejam selecionados com base nas necessidades reais da operação (tipo de material, velocidade da correia, diâmetro da polia), eliminando falhas de projeto e má aplicação.

Melhoria Contínua (Kaizen)

A ineficiência do raspador é tratada como um "defeito" a ser eliminado progressivamente.

Medição e Análise (PDCA): O TQM exige o monitoramento constante da eficiência de raspagem (por exemplo, usando a medição de carryback conforme normas ABNT) e do MTBF. Se a eficiência cai ou o MTBF diminui, aciona-se um ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Checar, Agir) para descobrir a causa-raiz (ex: perda de tensão, vibração, material abrasivo) e implementar uma solução padronizada.

Padronização da Manutenção: O procedimento de ajuste de tensão e troca da lâmina deve ser padronizado (documentado e treinado) para garantir que a instalação seja correta e consistente, evitando que a má regulagem se torne uma falha recorrente.

Estudo de Caso: Otimização de Raspadores de Correia Transportadora

Uma fábrica de cimento (exemplo baseado em casos internacionais como Cemex, México) ou uma mineradora (como ArcelorMittal ou minas de carvão nos EUA/Austrália) estava enfrentando um problema comum, mas dispendioso: o excesso de material de retorno (carryback) e derramamento (spillage) nas suas correias transportadoras de alta velocidade.

Problema Principal: Limpeza deficiente resultando em acúmulo de material fino e pegajoso na correia de retorno.

Consequências:

- Alto Custo Operacional: Paradas não programadas frequentes (até 24 horas/mês em alguns casos) e a necessidade de dedicar uma equipe (4 a 5 pessoas) para limpeza diária do entorno do transportador.
- Riscos de Segurança: Aumento da exposição dos trabalhadores ao risco de entrada em espaço confinado e manipulação manual próxima à correia em movimento.
- Desgaste Acelerado: Acúmulo de material nos roletes e tambores, causando desalinhamento da correia e danos.

A instalação utilizava um sistema de raspadores considerado "padrão" ou, em alguns casos, soluções "caseiras" (como identificado em uma fábrica de alimentos, por exemplo).

Característica	Detalhe
Tipo de raspador	Raspadores primários e secundários básicos.
Manutenção	Ajuste manual e inspeções visuais periódicas (ex: a cada 2-4 semanas para tensionamento).
Tensionamento	Molas ou contrapesos manuais, propensos a variações de pressão.
Material da Lâmina	Uretoano padrão ou metal

Fonte: própria

O principal gargalo era a falta de pressão e ângulo de limpeza ótimos, levando a um desgaste rápido e ineficiente da lâmina no centro (onde o material é mais concentrado), enquanto as laterais permaneciam com pouca eficácia de raspagem.

Para resolver o problema, a empresa implementou boas práticas baseadas nas recomendações da CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) e em estudos de caso de empresas líderes mundiais em tecnologia de manuseio de granéis (como Martin Engineering e Flexco).

Sistema de Limpeza em Múltiplos Estágios

O sistema "caseiro" foi substituído por uma configuração de raspagem de múltiplos estágios: Raspador Primário (Pré-limpeza): Instalado no tambor de descarga (polia dianteira), abaixo do fluxo de material. A

escolha recaiu sobre um modelo de lâmina de carboneto de tungstênio (tungsten carbide) ou cerâmica em um design robusto (ex: Martin® QC1+™ ou CleanScrape®).

Melhor Prática: O raspador primário é responsável pela remoção de 60% a 70% do material mais grosso, utilizando um ângulo de limpeza constante e positivo para maior eficiência.

Tendência Internacional: O CleanScrape®, um limpador primário de design diagonal, foi adotado em ambientes abrasivos (como pedreiras ou portos) devido à sua capacidade de se conformar à curva da polia, maximizando a área de contato e a vida útil da lâmina (caso Arcelor Mittal - Bélgica e Transnet Port Terminal - África do Sul).

Raspador Secundário (Limpeza Fina): Instalado logo após o raspador primário (onde a correia deixa a polia principal).

Melhor Prática: Lâminas de uretano individualmente tensionadas para remover a película fina e úmida que o primário não consegue.

Tensionamento Otimizado e Automação (Indústria 4.0)

Em vez de ajustes manuais, que são inconsistentes e demorados, implementou-se um sistema de tensionamento avançado:

Tensionamento Pneumático ou de Mola com Torque Constante: Garante uma pressão de lâmina correta e consistente, crucial para a máxima eficácia sem danificar a correia. Estudos mostram que existe uma faixa ótima de pressão; pressionar "mais forte" não limpa melhor e apenas acelera o desgaste.

Monitoramento por Vibração (Predial): Em minas e plantas que adotam a Manutenção 4.0 (como no caso da Dynamox no Brasil), sensores sem fio foram instalados. Curiosamente, níveis mais baixos de vibração indicavam lâminas finas/desgastadas e não níveis mais altos, permitindo uma troca preditiva e estendendo o intervalo de manutenção para 40-45 dias, em vez de inspeções semanais.

Foco em Segurança e Economia (Resultados)

A implementação das boas práticas resultou em um Retorno sobre Segurança e Produtividade (Return on Conveyor Safety™):

Indicador	Antes da otimização	Após a otimização	Economia/melhoria
Limpeza manual	1 hora/dia para 4-5 pessoas (Ex: Pedreira no Reino Unido).	1 hora/semana (com STARCLEAN®).	Redução de 75% no tempo de limpeza (equivalente a 96 horas salvas em 6 meses).
Material de retorno	Considerável, causando poluição e desperdício.	"Mínimo ou quase nulo" (Cemex, México).	Redução de até 60% na perda de sucata (caso de fábrica de alimentos).
Vida útil da correia	Reduzida por acúmulo e desalinhamento.	Aumento da vida útil devido à superfície mais limpa e alinhada.	Aumento da Disponibilidade Operacional.

Fonte: própria

A adoção de tecnologias de raspadores eficientes (primários robustos + secundários de acabamento) combinada com o monitoramento preditivo do desgaste e tensionamento garantiu uma operação mais limpa, segura e significativamente mais lucrativa, alinhada aos mais altos padrões internacionais de manuseio de materiais a granel.

CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) investigou a importância crítica da correta aplicação e manutenção de raspadores em correias transportadoras para otimizar a eficiência operacional e promover a sustentabilidade industrial. A pesquisa confirmou que a escolha e instalação dos raspadores primários e secundários não são detalhes, mas variáveis determinantes para o desempenho do sistema, resultando em benefícios tangíveis. Primeiramente, a remoção eficaz do material aderido (carryback) leva à Redução de Desperdício e Aumento de Eficiência, pois minimiza derrames e a necessidade de limpeza manual, maximizando a produtividade. Além disso, a manutenção da limpeza da correia e seus elementos Prolonga a Vida Útil dos Componentes, diminuindo o desgaste prematuro, reduzindo custos de manutenção e paradas não programadas. Por fim, o controle do carryback contribui para a Melhoria da Segurança e Conformidade Ambiental, criando um ambiente de trabalho mais seguro e auxiliando no atendimento às normas de controle de particulados. Em suma, o TCC conclui que a gestão estratégica e detalhada dos raspadores, aliada a planos de manutenção, os transforma em um investimento crucial, provando que a excelência operacional em correias transportadoras é indissociável da excelência na aplicação desses componentes. O estudo sugere, como perspectiva futura, a realização de estudos de caso para correlacionar o índice de limpeza da correia com a redução de custos operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MERCURIO, Conheça a história das correias Transportadoras. 2025. Disponível em <<https://www.correiasmercurio.com.br/historia-das-correias-transportadoras/>>. Acesso em 06 set. 2025.

ANDRIANOV, I. V., HORSSEN, W. T. On the transversal vibrations of a conveyor belt: applicability of simplified models, *Journal of Sound and Vibration*, v. 313, p. 822–829, 2008.

FEDORKO, L. et al. Hyperbaric oxygen therapy does not reduce indications for amputation in patients with diabetes with nonhealing ulcers of the lower limb: a prospective, double-blind, randomized controlled clinical trial. *Diabetes Care*, v. 39, n. 3, p. 392-399, 2016.

CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) - *Belt Conveyors for Bulk Materials*, Chaners Publishing Company. 6^a edição, 2007.

FÁBRICA DE AÇO PAULISTA S. A. Manual de Transportadores Contínuos. 3^a edição, Brasil, 1981.

LINDSTROM; DOUGLAS; SWINDERMAN. “*Belt Cleaners and Belt Top Cover Wear*”, *Nacional Conference Publication*, Número 93/8, p. 609–611, Estados Unidos da América, 1993.

McGUIRE, P. M., “*Conveyors: application, selection, and integration*”. CRC Press Taylor and Francis Group, LLC. Dayton, Ohio, Estados Unidos da América, 1962.

SWINDERMAN, R. T., “*The Conveyor Drive Power Consumption of Belt Cleaners*,” *Bulk Solids Handling*, p. 487–490. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications. Alemanha, 1991.

SWINDERMAN, R. T.; MARTI, A. D.; GOLDBECK, L. J.; MARSHALL, D.; STREBEL, M. G.; “*Practical Resource for Cleaner, Safer, More Productive Dust & Material Control - FOUNDATION*”, Martin Engineering, 4^a edição, p. 567, Neponset, Illinois, Estados Unidos da América, 2007.

CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION (CEMA). CEMA Belt Conveyors for Bulk Materials. [S.I.]: CEMA, 2017.

FLEXCO. Estudos de Caso e Soluções para Transportadores de Correia. Acesso em: out. 2025.

MARTIN ENGINEERING. Estudos de Caso e Tecnologias de Limpeza de Correias. Acesso em: out. 2025.

GRANNES, S. G.; HEBBLE, T. L.; RHOADES, C. A. Basic parameters of conveyor belt cleaning. Washington, DC: U.S. Bureau of Mines, 1989. 19 p. (Report of Investigations, 9221).

SWINDERMAN, R. Todd et al. (Org.). *Foundations: guia Prático para um Controle Mais Limpo, Seguro e Produtivo de Poeira e Derramamentos*. 4^a ed. Martin Engineering Ltda, 2009.

MARTIN ENGINEERING. Disponível em: <https://www.martineng.com.br/content/product/4011/raspador-primario-inline-xhd>. acesso em 07 nov. 2025.

CAPÍTULO 6

O USO DA INTERNET DAS COISAS COMO MEIO DE MELHORIA DA MANUTENÇÃO E DA QUALIDADE NA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Alex da Costa Silva

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
alexcostasilva@souunisuam.com.br

Luan Caio Gouvea Diniz

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
luandiniz@souunisuam.com.br

Mayara Brenda Brandão de Oliveira Silva

Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Engenharia de Produção.
mayarabrenda@souunisuam.com.br

George Gilberto Gomes Junior

Professor Mestre em Engenharia de Materiais
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
george.junior@souunisuam.com.br

Leonardo Lopes de Campos

Mestre em Desenvolvimento Local com ênfase em Cadeias Produtivas Sustentáveis
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM),
leonardolopes@souunisuam.com.br

Everton Rangel Bispo

Professor Doutor em Engenharia de Materiais e Processos Metalúrgicos
Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), unidade Bonsucesso
evertonbispo@souunisuam.edu.br

RESUMO

Nesta pesquisa, estudou-se o uso da internet das coisas como meio de melhoria da manutenção e da qualidade na produção na Indústria 4.0. A realização deste estudo justificou-se pela relevância de analisar os efeitos concretos da IOT na eficiência, na confiabilidade e na qualidade das operações industriais, assim como por fornecer subsídios a gestores e engenheiros para a adoção de soluções tecnológicas compatíveis com os princípios da Indústria 4.0. Na problemática, agiu-se no sentido de determinar como o uso da Internet das Coisas (IOT) contribui para a melhoria da manutenção e da qualidade na produção no contexto da Indústria 4.0. O principal objetivo aqui foi analisar o uso da internet das coisas como meio de melhoria da manutenção e da qualidade na produção na Indústria 4.0. Para esta pesquisa, foram analisadas dez dissertações publicadas a partir de

2019, disponíveis no Portal CAPES, selecionadas por descritores como “Indústria 4.0” e “IOT”. Adotou-se revisão bibliográfica qualitativa, com critérios rigorosos de inclusão e exclusão, para examinar impactos da IOT em manutenção e qualidade industrial. Os resultados indicam que a IOT aprimora manutenção e qualidade industrial, reduzindo falhas, custos e tempo de inatividade, enquanto fortalece a padronização e rastreabilidade. Para futuras pesquisas, recomenda-se explorar a integração da IOT com inteligência artificial, aprimoramento de indicadores de desempenho e desenvolvimento de estratégias de capacitação de profissionais para otimizar a Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Internet das Coisas (IOT); Manutenção Preditiva; Gestão de ativos; Eficiência operacional.

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem impulsionado transformações profundas no setor industrial, inaugurando a chamada Indústria 4.0, caracterizada pela integração entre sistemas físicos e digitais (PACCHINI et al., 2020). Nesse contexto, a Internet das Coisas (IOT) surge como uma ferramenta estratégica para a coleta, o processamento e a análise de dados em tempo real (BOLETA et al., 2020), permitindo o monitoramento inteligente de máquinas, equipamentos e processos produtivos. O sucesso dessa transformação depende, fundamentalmente, da integração de outras tecnologias habilitadoras, como o Big Data e a Inteligência Artificial, que convertem o vasto volume de dados da IOT em insights acionáveis para a tomada de decisão. Essa interconexão promove a melhoria da manutenção e da qualidade (SANTOS et al., 2024), tornando as operações mais eficientes, seguras e sustentáveis (VACCARI et al., 2023). A IOT, apoiada pela análise inteligente de dados, possibilita a transição de modelos reativos para modelos preditivos, onde falhas podem ser previstas e evitadas antes de causarem prejuízos significativos (SILVA FILHO et al., 2021).

Diante deste cenário, o problema de pesquisa se resume na seguinte indagação: Como o uso da Internet das Coisas (IOT) contribui para a melhoria da manutenção e da qualidade na produção no contexto da Indústria 4.0.

O objetivo geral deste estudo é analisar o uso da Internet das Coisas como meio de melhoria da manutenção e da qualidade na produção na Indústria 4.0.

A justificativa e relevância desta pesquisa reside na crescente necessidade das indústrias de otimizar recursos, reduzir custos operacionais e garantir a consistência dos produtos em um mercado altamente competitivo (BOLETA et al., 2020; PASTÓRIO et al., 2020). O estudo é relevante por permitir a identificação de oportunidades de melhoria na gestão da manutenção e na otimização dos recursos produtivos (PACCHINI et al., 2020), promovendo uma cultura organizacional baseada em dados e inovação. Além disso, justifica-se por fornecer subsídios a gestores e engenheiros para a adoção de soluções tecnológicas compatíveis com a

Indústria 4.0 (PASTÓRIO et al., 2020), ao analisar os impactos práticos da IOT, do Big Data e da Inteligência Artificial na eficiência, confiabilidade e qualidade das operações industriais. Pretende-se, ainda, contribuir para o desenvolvimento de práticas inovadoras, analisando como a IOT, integrada a metodologias de qualidade, fortalece a padronização, a rastreabilidade e a tomada de decisões estratégicas.

Para atingir o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

Determinar como a implementação de práticas de manutenção preditiva baseadas em IOT e análise de dados pode reduzir custos operacionais e minimizar a ocorrência de falhas inesperadas nos equipamentos industriais.

Esclarecer como a integração de tecnologias digitais e indicadores de desempenho (como OEE, MTBF e MTTR) aos processos de manutenção pode elevar a confiabilidade dos ativos e otimizar a eficiência global das operações.

Apontar como a aplicação de metodologias de qualidade, como PDCA, 5W2H e os princípios da ISO 9001, aliadas à IOT, podem padronizar processos, consolidando a qualidade e promovendo a melhoria contínua nas operações industriais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ascensão da Indústria 4.0 representa um catalisador de mudanças profundas nos paradigmas de produção e gestão industrial. Neste novo cenário, a manutenção, historicamente percebida como uma função de suporte reativa e um centro de custo, evoluiu para se consolidar como um componente estratégico essencial para a competitividade, confiabilidade e sustentabilidade das operações. A sua função transcendeu a simples correção de falhas para garantir a disponibilidade contínua dos ativos, tornando-se um pilar para a eficiência global (SILVA, 2018).

De maneira geral, a Internet das Coisas (IOT) atua como tecnologia habilitadora para uma gestão integrada dos custos de manutenção e da qualidade industrial. A convergência entre a coleta de dados em tempo real, a análise preditiva e as metodologias de gestão da qualidade criam um ecossistema inteligente onde as decisões são proativas, e não reativas, gerando valor direto para o negócio. Para desenvolver este argumento, a análise abordará a redefinição da estrutura de custeio da manutenção, a potencialização das ferramentas clássicas da qualidade por meio de dados digitais, o papel central dos indicadores de desempenho (KPIs) como métricas de governança e, por fim, a validação desses conceitos por meio de estudos de caso e boas práticas de mercado (SANTOS et al., 2024).

O novo paradigma: manutenção preditiva e tecnologias da indústria 4.0

A Manutenção Preditiva representa uma ruptura com os modelos tradicionais, que operavam com base em cronogramas fixos ou, no pior cenário, após a ocorrência de uma falha (SILVA, 2018). Esta é uma estratégia proativa que utiliza a análise de dados para antecipar falhas em equipamentos antes que elas ocorram. Diferentemente dos modelos preventivo ou corretivo, a abordagem preditiva intervém apenas quando necessário, otimizando o uso de recursos e maximizando a vida útil dos componentes (BOLETA et al., 2020; SANTOS et al., 2024). Esta capacidade de previsão é viabilizada pela sinergia de três tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0: a Internet das Coisas (IOT), o Big Data, e a Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning (ML).

A Internet das Coisas (IOT) consolida-se como o elemento central que permite a instalação de sensores inteligentes em componentes críticos, coletando dados operacionais continuamente e em tempo real sobre variáveis como vibração, temperatura e pressão. Esta camada tecnológica cria a infraestrutura necessária para a manutenção preditiva, a rastreabilidade digital e a otimização dos recursos industriais. O Big Data assume, então, um papel essencial na gestão desse enorme volume de informações geradas pelos sensores IOT. Sua capacidade de armazenar, processar e analisar dados em larga escala permite identificar padrões, tendências e anomalias que seriam impossíveis de detectar por análises convencionais, oferecendo suporte à tomada de decisão baseada em evidências. O uso integrado do Big Data com IOT consolida uma base sólida para a implementação da Indústria 4.0 e das práticas de manutenção inteligente (BOLETA et al., 2020). Por fim, a Inteligência Artificial (IA) e o Machine Learning (ML) transformam esse vasto volume de dados em informações preditivas e estratégicas. Algoritmos avançados analisam simultaneamente dados históricos e em tempo real para identificar padrões normais e prever a probabilidade de falhas futuras com alta precisão, possibilitando a otimização de processos e a redução de custos com manutenção corretiva. A combinação de sensores IOT, Big Data e inteligência artificial estabelece uma gestão industrial altamente preditiva, estratégica e alinhada aos princípios da Indústria 4.0 (DIAS, 2016).

A combinação sinérgica dessas tecnologias transforma dados brutos em inteligência açãoável, que constitui a base da manutenção inteligente (SILVA FILHO et al., 2021). Esta capacidade de antecipação não apenas aumenta a confiabilidade dos equipamentos e fortalece a segurança operacional, como também contribui para a sustentabilidade industrial ao reduzir desperdícios (VACCARI et al., 2023) e exerce um impacto direto e profundo na gestão financeira das operações de manutenção.

O impacto da IOT no custeio estratégico da manutenção

A capacidade da manutenção preditiva, impulsionada pela IOT, redefine fundamentalmente a estrutura de custos da manutenção. Na Indústria 4.0, a gestão de custos deixa de ser um exercício contábil reativo e se torna uma disciplina estratégica e proativa, focada na maximização do valor (PACCHINI et al., 2020). Para compreender esse impacto, é crucial diferenciar os tipos de custos envolvidos.

Custos Diretos Estes custos englobam os gastos mais visíveis, como mão de obra das equipes de manutenção, peças de reposição e contratos de serviços. A manutenção preditiva otimiza esses recursos de forma precisa: As intervenções são planejadas, o que evita horas extras emergenciais. A compra de peças é feita sob demanda, reduzindo estoques. Os contratos de serviço são mais bem negociados com base em dados de confiabilidade.

Custos Indiretos São frequentemente mais impactantes e difíceis de mensurar, sendo o principal alvo de redução da manutenção inteligente. Englobam perdas de produtividade por paradas não programadas, custos de falhas de qualidade (retrabalho e refugos) e o impacto na reputação da marca. Conforme (SILVA FILHO et al., 2021), estas variáveis são as mais críticas para a competitividade.

O monitoramento em tempo real viabilizado pela IOT permite a transição de um modelo de custeio reativo para um modelo proativo. Organizações podem planejar intervenções com base em previsões acuradas, em vez de orçar para o inesperado. Isso garante máxima eficiência e mínimo impacto na produção. A preservação planejada dos equipamentos gera maior dinamismo e resiliência na linha produtiva. O caso da Coca-Cola ilustra perfeitamente essa dinâmica: a modernização tecnológica e a automação levaram à diminuição dos custos operacionais e ao aumento da previsibilidade (VACCARI et al., 2023).

A gestão eficaz dos custos e a mitigação das falhas de qualidade são duas faces da mesma moeda. Uma baixa qualidade de processo ou produto é um gerador direto de custos de manutenção, seja por meio de retrabalho que sobrecarrega equipamentos ou por falhas que exigem intervenções corretivas. Isso torna a integração com as ferramentas da qualidade um imperativo financeiro.

Integrando ferramentas clássicas e dados digitais

A integração de metodologias de qualidade consagradas com as novas fontes de dados digitais é um pilar estratégico da Indústria 4.0. A IOT e a análise de dados não substituem as ferramentas da qualidade, mas as amplificam, tornando-as mais ágeis, precisas e preditivas. Em vez de analisar problemas após sua ocorrência, as equipes podem identificar desvios em tempo real e agir de forma preventiva (PASTÓRIO et al., 2020). As ferramentas clássicas da qualidade, como o Diagrama de Ishikawa/5 Porquês, o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) e as metodologias 5W2H/MASP,

atuam como um sistema coeso para a melhoria contínua. Quando integradas a dados obtidos por sensores IOT, essas metodologias tornam-se mais eficazes, pois a investigação das falhas passa a ser baseada em evidências concretas, coletadas em tempo real, fortalecendo a confiabilidade operacional e contribuindo para a melhoria contínua da indústria (SILVA FILHO et al., 2021).

A fase de “Check” do ciclo PDCA ganha especial relevância ao ser integrada a dados em tempo real provenientes de sensores IOT, permitindo monitorar indicadores de desempenho, identificar desvios e realizar correções quase imediatas. Esta utilização do PDCA orientada por dados potencializa a prevenção de falhas e a redução de custos, consolidando a gestão da qualidade como proativa e alinhada aos princípios da Indústria 4.0 (BOLETA et al., 2020). Da mesma forma, as metodologias 5W2H e MASP fornecem estruturas detalhadas para planejamento e monitoramento de ações, e, combinadas com dados digitais coletados via IOT, permitem definir metas mais objetivas e acompanhar a eficácia das ações. A aplicação conjunta dessas ferramentas com dados digitais contribui para a confiabilidade operacional, a sustentabilidade industrial e o aprimoramento contínuo da qualidade (SANTOS et al., 2024). Esta busca pela excelência é formalizada por meio de frameworks como a Gestão da Qualidade Total (TQM) e a norma ISO 9001. A IOT atua como um catalisador, fornecendo a base factual para uma gestão mais assertiva (DIAS, 2016), e um poderoso aliado para garantir a conformidade e a melhoria contínua (PACCHINI et al., 2020).

Mensuração de desempenho: o papel dos indicadores na manutenção inteligente

Mensuração de desempenho: o papel dos indicadores na manutenção inteligente. Com base nos estudos revisados, os indicadores de desempenho (KPI) funcionam como a ponte entre a estratégia de manutenção inteligente e sua execução operacional.

A eficácia da Manutenção 4.0 é validada pela otimização desses KPIs, que agora são calculados com precisão e em tempo real.

O OEE (Overall Equipment Effectiveness) é o indicador síntese da eficiência produtiva. Quando aliado a sensores IOT, o OEE torna-se uma ferramenta estratégica, permitindo medir a eficácia das intervenções e aumentar a produtividade (BOLETA et al., 2020).

O MTBF (Mean Time Between Failures) e o MTTR (Mean Time To Repair) são métricas cruciais de confiabilidade e manutenibilidade, respectivamente. O MTBF, que mede o tempo médio entre falhas, permite antecipar falhas quando combinado com dados IOT e Big Data. Isso aumenta a eficiência e contribui para a sustentabilidade operacional (SILVA, 2018).

O MTTR é um instrumento estratégico para otimizar a manutenção, pois reduz custos e fortalece a continuidade dos processos industriais

(SANTOS et al., 2024). Seu cálculo é mais preciso com a coleta de dados em tempo real.

Estratégias de manutenção preditiva visam aumentar o MTBF e reduzir o MTTR, ações que culminam diretamente em um OEE mais alto. A mensuração precisa desses indicadores valida o investimento em tecnologias preditivas e transforma a manutenção em uma disciplina estratégica, alinhada à otimização da Indústria 4.0.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa, utilizou-se como materiais de estudo um conjunto de dez dissertações publicadas a partir do ano de 2019, todas disponíveis no Portal de Periódicos da CAPES, garantindo acesso a trabalhos acadêmicos revisados e de relevância científica reconhecida. A escolha das dissertações considerou a necessidade de fundamentar a investigação em pesquisas recentes, refletindo os avanços tecnológicos e metodológicos aplicáveis à Indústria 4.0, à Internet das Coisas (IOT) e à melhoria de processos de manutenção e qualidade.

Para a busca e seleção dos materiais, foram definidos descritores específicos, alinhados ao tema central da pesquisa, tais como “Indústria 4.0”, “Internet das Coisas”, “manutenção preditiva”, “qualidade industrial” e “eficiência operacional”. Estes termos permitiram delimitar de forma precisa o universo de estudos relevantes, garantindo que os trabalhos analisados estivessem diretamente relacionados ao objeto de investigação (RICHARDSON, 2017; RAMPAZZO, 2012). Adotaram-se critérios de inclusão rigorosos, considerando apenas dissertações publicadas em português, com acesso completo ao texto integral, que abordassem explicitamente a aplicação da IOT em processos de manutenção e controle de qualidade na indústria. Por outro lado, os critérios de exclusão eliminaram estudos que não fossem dissertações, que apresentassem foco exclusivamente teórico sem aplicação prática ou que não fossem publicados no período estipulado, assegurando a pertinência e atualidade das informações coletadas (BARBOSA, 2010).

O método de pesquisa adotado foi a revisão bibliográfica de natureza qualitativa, adequada para consolidar e interpretar informações dispersas na literatura, promovendo uma visão estruturada e crítica sobre o tema (GEWANDSZNAJDER; MAZZOTTI, 2018). Por meio dessa abordagem, tornou-se possível identificar padrões, tendências e lacunas nas pesquisas existentes, além de estabelecer relações entre a aplicação da IOT e os resultados obtidos na manutenção e na melhoria da qualidade industrial. A revisão bibliográfica permitiu, ainda, a análise comparativa entre diferentes estudos, destacando metodologias, resultados e recomendações que contribuem para a compreensão aprofundada do impacto da IOT na Indústria 4.0.

Nessa perspectiva, a pesquisa utilizou materiais recentes, selecionados com base em descritores precisos e critérios claros de inclusão

e exclusão, aplicando um método consistente de revisão qualitativa (VOLPATO, 2019). Esta abordagem assegura que os resultados obtidos refletem de maneira confiável e atualizada os avanços tecnológicos e estratégicos relacionados à melhoria da manutenção e da qualidade na produção industrial moderna.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

A apresentação e análise de dados do presente estudo fundamenta-se na realização gradual dos três objetivos específicos delineados, garantindo que a investigação siga uma lógica estruturada e coerente. Inicialmente, busca-se compreender como a Internet das Coisas (IOT) contribui para a redução de custos e minimização de falhas, analisando dados relativos ao monitoramento preditivo de equipamentos e aos impactos financeiros de paradas não programadas. Em seguida, a análise se concentra no aumento da confiabilidade e da eficiência operacional, utilizando indicadores de desempenho, como OEE, MTTR e MTBF, para avaliar a melhoria na disponibilidade e desempenho dos ativos. Por fim, os dados são examinados sob a perspectiva da consolidação da qualidade e padronização dos processos, verificando como a integração da IOT com metodologias de gestão da qualidade promove padronização, rastreabilidade e melhoria contínua. Esta abordagem sequencial assegura que os resultados estejam alinhados aos objetivos do estudo, permitindo conclusões consistentes e aplicáveis.

Redução estratégica de custos e minimização de falhas

A redução estratégica de custos e a minimização de falhas constituem pilares fundamentais para a competitividade organizacional em um cenário marcado pela transformação digital e pela crescente complexidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, o uso da Internet das Coisas (IOT) e do Big Data tem se consolidado como um dos mais relevantes avanços tecnológicos voltados à gestão eficiente dos recursos empresariais. A integração dessas ferramentas ao processo de manutenção industrial dá origem à manutenção preditiva, que possibilita o monitoramento contínuo de máquinas e equipamentos, transformando dados em informações estratégicas e, assim, promovendo decisões baseadas em evidências concretas (CARNEIRO, 2022).

A aplicação da manutenção preditiva representa uma mudança de paradigma em relação aos métodos tradicionais de manutenção corretiva ou preventiva. Enquanto a primeira ocorre após a falha e a segunda segue cronogramas fixos, a manutenção preditiva baseia-se na análise em tempo real de variáveis operacionais, permitindo identificar padrões e prever possíveis falhas antes que estas aconteçam. Esta capacidade de antecipação reduz significativamente o tempo de inatividade das operações e evita reparos emergenciais, que geralmente apresentam custos elevados e implicam perdas de produtividade (FONSECA, 2019). A tecnologia atua como

um elemento catalisador da eficiência, alinhando inovação e economia de recursos.

O monitoramento em tempo real viabilizado pela IOT, aliado à análise de grandes volumes de dados pelo Big Data, fornece uma visão ampla e detalhada do desempenho dos ativos empresariais. Sensores instalados em equipamentos capturam continuamente informações como temperatura, vibração, pressão e consumo energético, as quais são processadas e interpretadas por algoritmos que identificam desvios e anomalias. Recomenda-se estabelecer um diagnóstico preciso do estado dos equipamentos e planejar intervenções apenas quando necessário, eliminando o desperdício de recursos decorrente de manutenções desnecessárias (LACERDA, 2022).

Além de reduzir custos diretos, como os gastos com peças e mão de obra, a manutenção preditiva contribui para o controle de custos indiretos, entre os quais se destacam as paradas não programadas e as perdas decorrentes de interrupções no processo produtivo. A previsibilidade proporcionada pelas tecnologias digitais assegura maior estabilidade operacional e reforça o planejamento estratégico das organizações (MARCELO, 2022). Em um mercado caracterizado pela busca incessante por produtividade, a capacidade de manter os sistemas em funcionamento contínuo torna-se um diferencial competitivo.

A conversão de dados em informações estratégicas, conforme destacam Oliveira (2019) e Penhaki (2019), também amplia a assertividade na tomada de decisões gerenciais. O tratamento analítico dos dados permite identificar tendências de desgaste, pontos críticos de falha e oportunidades de melhoria no ciclo de vida dos equipamentos. Com isso, a gestão da manutenção deixa de ser um processo reativo e passa a integrar o planejamento estratégico corporativo, orientado por métricas de desempenho e indicadores de confiabilidade. Esta abordagem fundamentada em dados contribui não apenas para a redução de custos, mas também para a sustentabilidade operacional das empresas.

Outro aspecto relevante refere-se à mitigação dos impactos financeiros associados às falhas inesperadas. Conforme argumenta Scolimoski (2022), o custo de uma falha não se limita ao reparo em si, mas envolve efeitos em cadeia, como o atraso na entrega de produtos, o comprometimento da qualidade e a insatisfação do cliente. Ao prevenir tais ocorrências, as empresas não apenas preservam seus ativos físicos, mas também fortalecem sua imagem no mercado e asseguram maior previsibilidade nos fluxos de caixa. A manutenção preditiva torna-se uma ferramenta estratégica de gestão de riscos, integrando-se às práticas de governança corporativa.

Sob essa perspectiva, a utilização da IOT e do Big Data reforça o papel da inovação tecnológica como vetor de sustentabilidade econômica e operacional. Segundo Santini (2022) e Santos (2022), as organizações que adotam tais tecnologias tendem a experimentar ganhos de competitividade,

pois conseguem otimizar seus processos e destinar recursos de forma mais racional. Ao reduzir desperdícios e maximizar o aproveitamento dos ativos, cria-se um ciclo virtuoso de eficiência, no qual a redução de custos e a minimização de falhas retroalimentam o desempenho global da organização.

Entretanto, Silva (2019) ressalta que a adoção dessas tecnologias exige planejamento, capacitação técnica e adequação da infraestrutura digital. A coleta e análise de dados só são eficazes quando amparadas por sistemas integrados, interoperáveis e seguros. Além disso, a cultura organizacional deve ser orientada à inovação e à valorização do conhecimento analítico, de modo que os profissionais saibam interpretar os dados e transformá-los em ações concretas. Portanto, a redução estratégica de custos por meio da manutenção preditiva não depende apenas da tecnologia, mas também da maturidade digital e da gestão eficiente do capital humano.

A integração entre IOT e Big Data revoluciona a gestão da manutenção e consolida-se como um instrumento essencial para a redução estratégica de custos e a minimização de falhas. Ao permitir o monitoramento contínuo, a análise preditiva e a tomada de decisão baseada em dados, essas tecnologias reduzem a incidência de falhas inesperadas, otimizam o uso de recursos e fortalecem a sustentabilidade financeira das organizações. A transformação digital não deve ser compreendida apenas como um avanço tecnológico, mas como um processo estratégico de aprimoramento contínuo, capaz de alinhar eficiência operacional, competitividade e inovação em um ambiente empresarial cada vez mais dinâmico e desafiador.

Aumento da confiabilidade e da eficiência operacional

O aumento da confiabilidade e da eficiência operacional é um dos principais desafios enfrentados pelas organizações inseridas no contexto da Indústria 4.0. A integração entre tecnologia digital e processos produtivos tem redefinido a maneira como a manutenção é concebida, transformando-a em um componente estratégico da gestão empresarial. Nesse cenário, a manutenção preditiva, amparada pela Internet das Coisas (IOT) e pela análise avançada de dados, emerge como um instrumento essencial para assegurar a confiabilidade dos ativos, maximizar sua disponibilidade e otimizar o desempenho operacional (CARNEIRO, 2022).

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela digitalização e interconexão dos sistemas produtivos, o que exige uma abordagem de manutenção mais inteligente e proativa. Diferentemente dos modelos tradicionais, baseados em intervenções corretivas ou preventivas, a manutenção preditiva fundamenta-se na coleta e interpretação contínua de dados provenientes de sensores instalados em máquinas e equipamentos. Esta prática possibilita a identificação de anomalias e tendências de falha antes que elas se concretizem, promovendo maior previsibilidade e estabilidade nos processos (FONSECA, 2019). A partir dessa previsibilidade, as organizações

conseguem reduzir riscos de paradas não programadas e aumentar a confiança na operação dos ativos críticos.

A confiabilidade dos sistemas produtivos está diretamente associada à capacidade de prever e evitar falhas que comprometam o fluxo de produção. A manutenção preditiva, ao incorporar recursos da IOT e do Big Data, transforma grandes volumes de dados em informações relevantes para a tomada de decisão. Esta abordagem fortalece o conceito de manutenção estratégica, em que as ações não se limitam à conservação dos equipamentos, mas visam à garantia da continuidade operacional e à sustentabilidade de longo prazo (LACERDA, 2022). O papel da manutenção evolui de uma função operacional para uma atividade de caráter analítico e estratégico, inserida no núcleo das decisões corporativas.

A eficiência operacional, por sua vez, é resultado direto da confiabilidade dos equipamentos e da otimização dos processos produtivos. Esta eficiência é mensurada por meio de indicadores-chave de desempenho que permitem avaliar o grau de aproveitamento dos ativos. Entre eles, destaca-se o OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que considera três dimensões fundamentais: disponibilidade, desempenho e qualidade. A análise do OEE possibilita identificar gargalos, perdas de produtividade e oportunidades de melhoria contínua, fornecendo subsídios para intervenções mais precisas e eficazes (MARCELO, 2022).

Outras métricas relevantes nesse contexto são o MTBF (*Mean Time Between Failures*) e o MTTR (*Mean Time To Repair*). O MTBF mede o intervalo médio entre falhas, sendo um indicador de confiabilidade do equipamento, enquanto o MTTR avalia o tempo médio necessário para reparo, refletindo a eficiência das ações de manutenção (OLIVEIRA, 2019). A integração entre esses indicadores permite que a gestão da manutenção atue de forma equilibrada entre prevenção e resposta, garantindo a continuidade operacional com o mínimo de interrupções.

Segundo Penhaki (2019), a aplicação sistemática dessas métricas, aliada à análise de dados em tempo real, proporciona uma visão holística do desempenho dos ativos. A partir desse diagnóstico, é possível definir prioridades de intervenção, otimizar recursos e alinhar a manutenção aos objetivos estratégicos da organização. Este alinhamento reforça o papel da manutenção como fator decisivo para a competitividade empresarial, uma vez que equipamentos confiáveis e processos eficientes resultam em menores custos, maior produtividade e melhor qualidade dos produtos e serviços entregues.

Além dos ganhos operacionais, o aumento da confiabilidade impulsiona a sustentabilidade empresarial. A redução de falhas e desperdícios contribui para o uso racional de recursos e para a diminuição de impactos ambientais. Conforme destaca Scolimski (2022), a manutenção preditiva, ao evitar paradas imprevistas e prolongar a vida útil dos ativos, também reduz o consumo de energia e de materiais de reposição. A eficiência

operacional alcança dimensões econômicas, sociais e ambientais, inserindo-se em uma perspectiva de desenvolvimento sustentável.

A digitalização da manutenção demanda, contudo, uma profunda transformação cultural e organizacional. Santini (2022) e Santos (2022) ressaltam que a eficácia das tecnologias digitais depende da capacitação das equipes e da integração entre áreas de engenharia, tecnologia da informação e gestão. A adoção da IOT e do Big Data requer profissionais capazes de interpretar dados complexos e traduzir resultados analíticos em decisões práticas. Nesse sentido, o aumento da confiabilidade e da eficiência não decorre apenas da aquisição de tecnologias, mas da criação de uma cultura organizacional orientada pela inovação e pela melhoria contínua.

Silva (2019) complementa que o uso inteligente dos dados amplia a autonomia das operações e reforça a segurança dos processos produtivos. Com a automação dos diagnósticos e o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, é possível identificar padrões invisíveis à análise humana, o que eleva a precisão das previsões e reduz a margem de erro nas decisões. Esta evolução tecnológica eleva a manutenção a um patamar estratégico, no qual confiabilidade e eficiência tornam-se indicadores de maturidade digital e de competitividade industrial.

O aumento da confiabilidade e da eficiência operacional representa o resultado da convergência entre tecnologia, gestão e estratégia. A manutenção preditiva, apoiada pela IOT e pelo Big Data, transforma dados em inteligência e promove uma gestão baseada em evidências. Ao garantir maior previsibilidade, reduzir falhas e otimizar o uso dos ativos, as organizações alcançam níveis superiores de desempenho e sustentabilidade. No contexto da Indústria 4.0, a confiabilidade não é apenas um atributo técnico, mas um fator estratégico que assegura vantagem competitiva e consolida a eficiência como um valor central da gestão empresarial moderna.

Consolidação da qualidade e padronização dos processos

A consolidação da qualidade e a padronização dos processos configuram-se como elementos fundamentais para o fortalecimento da competitividade e da sustentabilidade industrial no contexto da Indústria 4.0. A incorporação de tecnologias digitais, especialmente a Internet das Coisas (IOT), tem transformado a maneira como as organizações monitoram, avaliam e aperfeiçoam suas operações. Entretanto, para que tais inovações gerem resultados efetivos, é indispensável que estejam sustentadas por metodologias de qualidade capazes de traduzir dados em ações concretas de melhoria contínua (CARNEIRO, 2022). A integração entre tecnologia e gestão da qualidade emerge como um caminho estratégico para consolidar a excelência operacional e assegurar a conformidade com padrões globais de desempenho.

A manutenção industrial apoiada pela IOT tem se destacado como um instrumento essencial para garantir confiabilidade e previsibilidade nos processos produtivos. Sensores inteligentes capturam informações em tempo

real sobre o funcionamento dos equipamentos, permitindo análises precisas e tomadas de decisão baseadas em evidências (FONSECA, 2019). Contudo, o valor real desses dados depende da capacidade organizacional de convertê-los em conhecimento útil. Nesse sentido, metodologias de qualidade, como o Diagrama de Ishikawa, o 5W2H e o ciclo PDCA, oferecem estruturas analíticas que permitem identificar causas de falhas, planejar ações corretivas e padronizar procedimentos. Esta integração entre IOT e ferramentas da qualidade promove maior consistência nas práticas operacionais e eleva o nível de controle sobre os processos.

O Diagrama de Ishikawa, por exemplo, auxilia na identificação das causas raízes dos problemas ao agrupar fatores relacionados a máquinas, métodos, materiais, mão de obra, meio ambiente e medições. Quando aplicado a dados obtidos por dispositivos conectados, esse método torna-se mais preciso e ágil, permitindo o mapeamento detalhado das variáveis que influenciam a qualidade do produto ou serviço (LACERDA, 2022). Já o 5W2H, ao definir claramente o que será feito, por quem, onde, quando, por quê, como e quanto custará, transforma a análise em um plano de ação estruturado, garantindo que as melhorias sejam executadas de forma objetiva e mensurável.

O ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), por sua vez, consolida-se como um dos principais instrumentos da melhoria contínua, especialmente quando aliado à coleta automatizada de dados da IOT. A fase de planejamento é aprimorada pela análise de informações em tempo real, a execução torna-se mais precisa, o controle é sustentado por indicadores confiáveis e a etapa de ação baseia-se em resultados concretos (MARCELO, 2022). Esta abordagem sistemática contribui para a padronização dos processos, reduzindo variações, minimizando falhas e garantindo que as boas práticas sejam reproduzidas em toda a organização.

A padronização, nesse contexto, não deve ser vista como limitação, mas como um meio de assegurar estabilidade e previsibilidade na execução das atividades. Segundo Oliveira (2019), a padronização dos processos cria uma base sólida para a inovação, pois estabelece parâmetros que permitem avaliar o impacto de mudanças e mensurar ganhos de desempenho. Ao alinhar a automação proporcionada pela IOT com métodos padronizados de gestão, as empresas fortalecem sua capacidade de resposta, aumentam a confiabilidade de seus sistemas e asseguram a entrega de produtos e serviços com qualidade constante.

A Gestão da Qualidade Total (TQM) e os requisitos da norma ISO 9001 complementam esse processo de consolidação. Ambas enfatizam a necessidade de padronização, melhoria contínua e foco no cliente como princípios essenciais da excelência organizacional (PENHAKI, 2019). A TQM, ao promover o envolvimento de todos os colaboradores na busca pela qualidade, cria uma cultura orientada para resultados e inovação. Já a ISO 9001 estabelece diretrizes para o controle de processos, a rastreabilidade e a documentação das práticas, garantindo que a eficiência operacional esteja

em conformidade com padrões reconhecidos internacionalmente (SCOLIMOSKI, 2022).

De acordo com Santini (2022), a integração entre as diretrizes da ISO 9001 e as tecnologias digitais amplia a transparência e a confiabilidade dos processos industriais. A rastreabilidade digital, proporcionada pela IOT, permite verificar o histórico completo de um produto ou componente, desde a matéria-prima até o consumidor final, assegurando conformidade e facilitando auditorias. Esta visibilidade integral sobre o processo produtivo reduz a incidência de erros, melhora o controle de qualidade e fortalece a credibilidade da empresa perante o mercado.

Santos (2022) destaca ainda que a consolidação da qualidade requer uma abordagem sistêmica que envolva pessoas, processos e tecnologia. A simples adoção de ferramentas digitais não garante o sucesso se não houver padronização de práticas e comprometimento organizacional com a melhoria contínua. A combinação entre IOT e metodologias de qualidade cria um ambiente de aprendizado constante, no qual os erros são analisados, corrigidos e transformados em oportunidades de aperfeiçoamento. Esta mentalidade de evolução contínua sustenta a resiliência das organizações diante das rápidas mudanças tecnológicas e das exigências crescentes do mercado.

Silva (2019) reforça que a padronização e a qualidade são fatores diretamente relacionados à competitividade industrial. Processos bem definidos e monitorados reduzem custos, evitam desperdícios e garantem a uniformidade dos resultados. Além disso, a integração de dados em tempo real possibilita respostas imediatas a desvios e anomalias, tornando as operações mais ágeis e confiáveis. A qualidade deixa de ser um atributo isolado e passa a constituir um valor organizacional, incorporado a todas as etapas do ciclo produtivo.

A consolidação da qualidade e a padronização dos processos dependem da harmonização entre tecnologia, metodologia e cultura organizacional. A IOT, ao fornecer dados precisos e contínuos, potencializa as ferramentas da qualidade, enquanto as metodologias clássicas garantem que essas informações se traduzam em melhorias concretas e sustentáveis. A aplicação dos princípios da Gestão da Qualidade Total e da ISO 9001 assegura que a eficiência operacional esteja alinhada a padrões globais de credibilidade. A qualidade consolidada e os processos padronizados tornam-se a base para a competitividade, a confiabilidade e a inovação nas organizações que buscam se destacar na era digital.

CONCLUSÃO

Esta pesquisa analisou o uso da Internet das Coisas para aprimorar a manutenção e a qualidade na Indústria 4.0. O estudo comprovou o papel central desta tecnologia no contexto industrial. Sua aplicação, por meio de sensores e monitoramento contínuo, viabiliza a transição da manutenção reativa para a preditiva.

O primeiro objetivo foi integralmente cumprido. Demonstrou-se que a manutenção preditiva baseada em IOT reduz significativamente os custos operacionais. A antecipação de falhas e a consequente redução do tempo de inatividade minimizam gastos com peças de reposição e mão de obra emergencial.

O segundo objetivo foi alcançado pela comprovação de que essa tecnologia fortalece indicadores de desempenho. Os KPIs OEE, MTBF e MTTR são aprimorados. A coleta de dados em tempo real permite planejar intervenções estratégicas. Isso avalia a disponibilidade dos ativos e reduz o tempo médio de reparo.

O terceiro objetivo também foi atingido. A IOT, integrada a metodologias de qualidade (PDCA, ISO 9001), fortalece a padronização e a rastreabilidade. Os dados fornecidos pelo sistema são cruciais para a análise de causa-raiz de defeitos, o que promove a melhoria contínua.

Em síntese, a Internet das Coisas é um vetor eficaz de melhoria da manutenção e da qualidade. Uma limitação identificada no estudo é que as dissertações analisadas nem sempre detalharam a implementação prática. Sugere-se para pesquisas futuras explorar a integração da IOT com a inteligência artificial para aprimoramento de indicadores. Recomenda-se também desenvolver estratégias de capacitação profissional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, Flávio Alves. **Descomplicando o Complicando:** Aprendendo a Fazer uma Pesquisa em Três Dias. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2010.

BOLETA, Roberta Teles et al. A Internet das Coisas (IOT): compreensão e aplicação no contexto da Indústria 4.0. In: Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica (EnICT), 5., 2020, São Carlos. Anais eletrônicos... São Carlos: IFSP, 2020. p. 1-10. Disponível em: <https://arq.ifsp.edu.br/eventos/enict/5EnICT/paper/viewFile/491/295>. Acesso em: 3 set. 2025.

CARNEIRO, Lilia Ramos. **Painel inteligente para gerenciamento da eficiência energética em termelétricas.** 2022. 107 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11740662. Acesso em: 20 out. 2025.

DIAS, Renata Rampim de Freitas. **Internet das coisas sem mistérios:** Uma nova inteligência para os negócios. São Paulo: Netpress Books, 2016.

FONSECA, Michelle Gusmão Burgos da. **Redes neurais artificiais aplicadas à classificação de gestos da mão através de sinais eletromiográficos**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=7637110. Acesso em: 20 out. 2025.

GEWANDSZNAJDER, Fernando; MAZZOTTI, Alda Judith Alves. **O Método nas Ciências Naturais e Sociais Pesquisa Quantitativa e Qualitativa**. 3. ed. São Paulo: Thompson, 2018.

LACERDA, Josué da Costa. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada em regras de Nelson para o monitoramento da condição de unidades motogeradoras**. 2022. 129 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11811924. Acesso em: 20 out. 2025.

MARCELO, Diogo Gonzaga. **Laboratório didático para simulação de subestações blindadas**. 2022. 106 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11905562. Acesso em: 20 out. 2025.

OLIVEIRA, Daniel Moura de. **Object detection, localization, and grasping with visual sensors applied to robotic manipulators**. 2019. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=7879889. Acesso em: 20 out. 2025.

PACCHINI, Athos Paulo Tadeu *et al.* Indústria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. **Exacta**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 278–292, 2020. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/10605>. Acesso em: 3 set. 2025.

PASTÓRIO, André *et al.* Uma revisão sistemática da literatura sobre tolerância a falhas em Internet das Coisas. In: **Simpósio Brasileiro de**

Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC), 10., 2020, Online. Anais... Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 57-64. DOI: 10.5753/sbesc_estendido.2020.13091. Acesso em: 3 set. 2025.

PENHAKI, Juliana de Rezende. **Soft skills na Indústria 4.0**. 2019. 115 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Sociedade) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=7814437. Acesso em: 20 out. 2025.

RAMPAZZO, Lino. **Metodologia científica**: Para alunos dos cursos de graduação e pós-graduação. 2. ed. São Paulo: Loyola, 2012.

RICHARDSON, Roberto. **Metodologia científica**: fundamentos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

SANTOS, D. R. A. dos *et al.* O uso de tecnologias no gerenciamento e controle na manutenção industrial. **Revista Foco**, [S. l.], v. 17, n. 12, p. e7025, 2024. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/7025>. Acesso em: 3 set. 2025.

SANTINI, Mariana. **Machine learning e robotização de processos para gestão e análise dos dados de medição enviados à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica**. 2022. 81 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11754772. Acesso em: 20 out. 2025.

SANTOS, Rosa Lúcia Martins dos. **Análise da viabilidade técnico-econômica da compactação de resíduos de madeira na geração de energia elétrica**. 2022. 93 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11847193. Acesso em: 20 out. 2025.

SCOLIMOSKI, Josnei. **Modelagem cognitiva para robotização de processos de medição e faturamento de energia elétrica**. 2022. 93 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Energia Inteligente) – Instituto Gnarus, Itajubá, 2022. Disponível em: https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie_wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11847193.

legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11651877. Acesso em: 20 out. 2025.

SILVA, Edson Pereira da. A transição da manutenção industrial para o modelo do novo paradigma da Indústria 4.0. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Paulista, São Paulo, 2018.

SILVA, Thiago Henrique de Lisboa e. Aplicação de um método de diagnóstico das tecnologias da Indústria 4.0 com indicadores de sustentabilidade em laboratórios de teste de motores: um estudo de caso. 2019. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019. Disponível em: <https://sucupira->

legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/vie wTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=8685357. Acesso em: 20 out. 2025.

SILVA FILHO, Luciano Costa da et al. Gestão da manutenção na Indústria 4.0: um paralelo entre o hoje e o futuro. **Revista Mythos**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 7–19, 2021. Disponível em: <https://www.periodicos.unis.edu.br/mythos/article/view/518>. Acesso em: 3 set. 2025.

VACCARI, F. D. S. et al. **Cadeia de Suprimentos:** Coca-Cola. 2023. Projeto Integrado (Engenharia de Produção) – Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM), Rio de Janeiro, 2023.

VOLPATO, Gilson. **Como elaborar trabalhos científicos:** monografias, dissertações e teses. 9. ed. Curitiba: Appris, 2019.

Para maiores informações, entre em contato!

contato@epitaya.com.br 

www.epitaya.com.br 

[@epitaya](https://www.instagram.com/epitaya) 

<https://www.facebook.com/epitaya> 

(21) 98141-1708 



Engenharia de produção e de materiais 4.0

métodos preventivos, preditivos,
IOT e 5s para eficiência e
sustentabilidade na indústria

Everton Rangel Bispo
Organizador

ISBN: 978-65-5132-024-8




Editora