

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gustavo Lucas Pereira Lopes

**Manutenção Preditiva: Análise da eficiência da integração automática de avaliações tribológicas em equipamentos pesados.**

Betim

2026

GUSTAVO LUCAS PEREIRA LOPES

**Manutenção Preditiva: Análise da eficiência da integração automática de avaliações tribológicas em equipamentos pesados.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Bruno de Souza Baptista

Betim

## FICHA CATALOGRÁFICA

L864m Lopes, Gustavo Lucas Pereira

Manutenção preditiva: análise da eficiência da integração automática de avaliações tribológicas em equipamentos pesados / Gustavo Lucas Pereira Lopes. – 2026.

69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Bruno de Souza Baptista

1. Manutenção preditiva. 2. Óleos lubrificantes. . 3. Mineração. 4. Análise tribológica. 5. Engenharia Mecânica. I. Lopes, Gustavo Lucas Pereira. II. Título.

CDU: 631.3



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**

**Campus Betim**  
**Diretoria de Ensino**  
**Docentes Mecânica**

Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG  
3135976360 - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos 04 dias do mês de fevereiro do ano de 2026, às dezoito horas e trinta minutos, nas dependências do IFMG - *Campus Betim*, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Bruno de Souza Baptista e demais membros, Evanilton José Alves Barbosa e Norimar de Melo Verticchio. Nesta ocasião o discente Gustavo Lucas Pereira Lopes do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 0055562 do IFMG - *Campus Betim*, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado "Manutenção Preditiva: Análise da eficiência da integração automática de avaliações tribológicas em equipamentos pesados." e foi APROVADO, com 75 (setenta e cinco) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o conseqüente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 60 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e conseqüente reprovação.

A sessão foi encerrada às vinte horas. Para constar, eu, Bruno de Souza Baptista, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 16 de março de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno de Souza Baptista, Professor**, em 16/03/2026, às 19:02, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Evanilton Jose Alves Barbosa, Professor**, em 16/03/2026, às 20:15, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Norimar de Melo Verticchio, Professor**, em 20/03/2026, às 13:59, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2653947** e o código CRC **97595C95**.

---

---

23792.000254/2026-00
----------------------

2653947v1
-----------

Aos meus pais, por todo o esforço,  
dedicação e valores que possibilitaram  
minha formação acadêmica e pessoal.  
À minha amada Ana Julia, pelo amor,  
compreensão e incentivo constantes,  
essenciais para a conclusão desta etapa.  
À minha família e amigos, que estiveram  
presentes ao longo dessa trajetória,  
contribuindo direta ou indiretamente  
para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus, por me capacitar e me conceder sabedoria para a conclusão dessa grande etapa em minha vida.

À minha futura esposa Ana Julia, gostaria de agradecer por ser minha companheira de vida e por fazer parte dessa grande conquista. Você é e sempre será minha maior fonte de motivação para ser um homem melhor.

Aos meus pais agradeço por todo amor incondicional e inspiração. Sem vocês nada disso seria possível, sou eternamente grato por todos os ensinamentos e aprendizados, espero lhes dar muito orgulho.

À minha irmã, obrigado por tornar essa caminhada mais leve, cada risada nossa foi motivo de inspiração para chegar até aqui.

À vovó e o vovô, agradeço por todas as orações e todo carinho. Obrigado por serem a base de tudo.

À família, muito obrigado por me apoiarem em todos os momentos dessa vida, sem vocês essa história não seria escrita dessa maneira.

Aos amigos, obrigado por deixar a vida mais divertida e agradável. Cada risada e gesto de carinho também contribuiu grandemente até aqui.

Ao meu orientador Bruno, que prontamente se disponibilizou para me auxiliar na construção deste trabalho.

E a todos que, de maneira direta ou indireta, fizeram parte e contribuíram para conclusão desse capítulo tão importante em minha vida.

"...A Cruz Sagrada seja minha luz,  
não seja o dragão meu guia."

— *Oração de São Bento*

## RESUMO

A crescente complexidade dos processos produtivos nos setores de mineração e siderurgia impõe desafios significativos à gestão da manutenção de equipamentos de grande porte, exigindo soluções cada vez mais integradas, eficientes e baseadas em dados. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a integração entre um sistema de gestão de manutenção e um serviço especializado de análises automáticas de óleo lubrificante, aplicado a equipamentos utilizados em operações de mineração e siderurgia.

O estudo foi conduzido por meio de um estudo de caso em uma empresa atuante nesses segmentos, contemplando a integração de dados provenientes das análises tribológicas ao sistema de manutenção, permitindo o monitoramento contínuo da condição dos componentes, a padronização das informações e a automação das avaliações técnicas. A metodologia adotada envolveu a coleta, tratamento e análise dos dados operacionais e de manutenção antes e após a integração dos sistemas.

Os resultados evidenciaram ganhos relevantes na eficiência operacional, com melhoria na confiabilidade das informações, redução do tempo de resposta às falhas potenciais e maior assertividade na tomada de decisão relacionada à manutenção preditiva. Além disso, a integração contribuiu para a antecipação de falhas, otimização dos planos de manutenção e fortalecimento da gestão baseada em condição, impactando positivamente a disponibilidade dos equipamentos e a redução de riscos operacionais.

Conclui-se que a integração entre sistemas de gestão de manutenção e análises automáticas de óleo representa uma ferramenta estratégica para empresas dos setores de mineração e siderurgia, promovendo maior controle operacional, confiabilidade dos ativos e suporte à manutenção orientada por dados.

**Palavras-chave:** manutenção preditiva, análise de óleo, integração, mineração, siderurgia e eficiência operacional.

## ABSTRACT

The increasing complexity of production processes in the mining and steelmaking sectors poses significant challenges to the maintenance management of large-scale equipment, requiring integrated, efficient, and data-driven solutions. In this context, this study aims to analyze the integration between a maintenance management system and an automated lubricating oil analysis service applied to equipment operating in mining and steelmaking environments.

The research was conducted through a case study in a company operating in these sectors, focusing on the integration of tribological analysis data into the maintenance management system. This integration enabled continuous condition monitoring of components, data standardization, and automation of technical evaluations. The adopted methodology involved data collection, processing, and analysis of operational and maintenance information before and after the system integration.

The results demonstrated significant improvements in operational efficiency, including increased reliability of maintenance data, reduced response time to potential failures, and enhanced decision-making accuracy related to predictive maintenance actions. Additionally, the integration contributed to earlier fault detection, optimization of maintenance planning, and strengthening of condition-based maintenance practices, positively impacting equipment availability and operational risk reduction.

It is concluded that the integration between maintenance management systems and automated oil analysis services represents a strategic tool for companies in the mining and steelmaking sectors, supporting data-driven maintenance management, improving asset reliability, and enhancing overall operational performance.

**Keywords:** predictive maintenance, oil analysis, integration, mining, steelmaking and operational efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aperam, siderúrgica de Aço Inoxidável.....	16
Figura 2 – Mina Vazante, NEXA.....	17
Figura 3 – Kit Coleta de Lubrificante (frasco, mangueira e ficha pré-registro)....	20
Figura 4 - Tipos de Monitoramento Preditivo.....	26
Figura 5 - Curva Falha Potencial (P) - Falha Funcional (F).....	27
Figura 6 - Função dos Sistemas Tribológicos.....	31
Figura 7 - Ferrografia microscópica.....	33
Figura 8 – Viscosidade de Cisalhamento.....	34
Figura 9 – Painel de controle de manutenção Semana 02/12/2018 a 08/12/2018.....	43
Figura 10 – Tela de abertura de Ordens de Serviço.....	46
Figura 11 – Relatório de Análise.....	47
Figura 12 – Relatório de Análise.....	48
Figura 13 – Ordem de Serviço Automática proveniente do resultado de uma amostra.....	49
Figura 14 – Ordem de Serviço destinado ao mecânico para tratativas.....	50
Figura 15 - Painel Semanal completo 09/12/2018 à 15/12/2018 (Todas as unidades da companhia) .....	51
Figura 16 - Painel Semanal completo 09/02/2020 à 15/02/2020 (Todas as unidades da companhia) .....	51
Figura 17 – Números anterior à integração Filial VAZANTE e TIMÓTEO.....	52
Figura 18 – Números após a integração Filial VAZANTE e TIMÓTEO.....	53
Figura 19 – Gráfico de recorrências críticas unidade Timóteo.....	55
Figura 20 – Gráfico de recorrências críticas unidade Vazante.....	55

Figura 21 – MTTR 2018 a 2025.....	57
Figura 22 – MTBF 2018 a 2025.....	58
Figura 23 – Disponibilidade Física 2018 a 2025.....	60
Figura 24 – Ciclo de melhoria contínua.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processo de coleta e envio de amostras de óleo.....	20
Tabela 2 - Benefícios da Manutenção Preditiva.....	27
Tabela 3 - Relatórios de análise de lubrificantes e resultados dos testes de contaminantes e propriedades do fluido.....	36
Tabela 4 – Análise Amostrar de Óleo .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIB – Produto Interno Bruto;

PCR – Pá Carregadeira;

ESC – Escavadeira;

TSE – Trator de Esteiras;

TAG – Trator Agrícola;

CEP – Caminhão Extra Pesado;

CBA – Caminhão Bâscula Alta;

CLC – Caminhão de Lubrificação Comboio;

CTP – Caminhão Tanque Pipa;

CBK – Caminhão Brook;

EMP – Empilhadeira;

VUT – Veículo Utilitário;

OS – Ordem de Serviço;

DF – Disponibilidade física;

MTTR – (Mean Time to Repair) Tempo Médio de Reparação

MTBF – (Mean Time Between Failures) Tempo Médio Entre Falhas;

KPI – (Key Performance Indicator) Indicador-Chave de Desempenho;

CBM – (Condition-Based Maintenance) Manutenção Baseada na Condição;

ERP – (Enterprise Resource Planning) - Planejamento de Recursos Empresariais;

API – (Application Programming Interface) Interface de Programação de Aplicativos.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. JUSTIFICATIVA .....	21
1.2. OBJETIVOS .....	22
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	22
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1. Condições Operacionais - Mineração .....	23
2.2. Condições Operacionais – Siderurgia .....	24
2.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA .....	25
2.3.1. BENEFÍCIOS .....	28
2.4. TRIBOLOGIA APLICADA À MANUTENÇÃO .....	29
2.4.1. TIPOS DE ANÁLISES TRIBOLÓGICAS .....	32
2.5. INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUTENÇÃO E AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA 37	
2.5.1. SOFTWARE DE MANUTENÇÃO .....	37
2.5.2. LABORATÓRIO DE ANÁLISES TRIBOLÓGICAS .....	38
2.6. INDICADORES DE DESEMPENHO (KPI's) PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA.	41
2.6.1. MTTR (Mean Time to Repair – Tempo Médio para Reparo) .....	41
2.6.2. MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio Entre Falhas) .....	41
2.6.3. Disponibilidade Física (DF) .....	42
3. METODOLOGIA.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
4.1. Aumento das intervenções preditivas realizadas .....	46
4.2. Diminuição da reincidência de falhas críticas .....	54
4.3. Impacto nos KPIs Operacionais .....	56
4.3.1. MTTR (Mean Time to Repair – Tempo Médio para Reparo) .....	56
4.3.2. MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio Entre Falhas) .....	58
4.3.3. Disponibilidade Física (DF) .....	59
4.4. Aplicação da melhoria contínua na rotina dos colaboradores .....	61
5. CONCLUSÃO .....	63
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

A mineração está intrinsecamente associada à história e à formação do estado de Minas Gerais. No âmbito geral, o Brasil se destaca como um dos principais produtores de minérios, com um potencial que se desenvolveu ao longo dos anos. O país ocupa uma posição relevante, tanto em termos de produção quanto de reservas minerais. Dados recentes indicam que, em 2025, o setor mineral brasileiro alcançou faturamento de aproximadamente R\$ 298,8 bilhões, evidenciando sua forte contribuição para a economia nacional e para o saldo da balança comercial do país (Ibram, 2026).

Além da mineração, a siderurgia também está profundamente ligada ao desenvolvimento econômico e industrial do Brasil, sendo um dos pilares fundamentais para a infraestrutura e a produção de bens de consumo. Historicamente, o setor siderúrgico desempenhou um papel estratégico na industrialização do país, utilizando o potencial mineral brasileiro como base para sua evolução. Atualmente, o Brasil se destaca como o maior produtor de aço da América Latina e um dos principais produtores globais, ocupando posição entre os dez maiores produtores mundiais. O país possui uma capacidade instalada de cerca de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano, tendo produzido aproximadamente 33,7 milhões de toneladas em 2024, evidenciando a relevância do setor tanto para o mercado interno quanto externo (Ibs/labr, 2025).

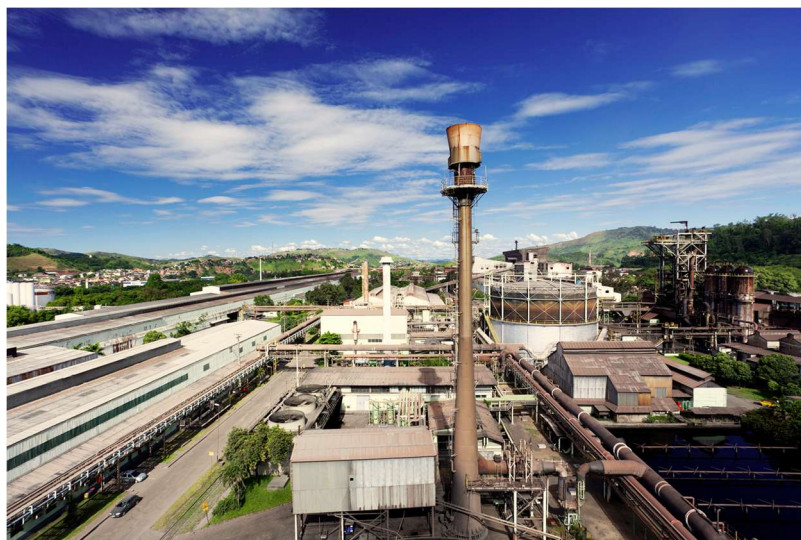
A eficiência operacional é o elemento fundamental que alavanca a competitividade entre as empresas atuantes nos setores de mineração e siderurgia. Para tal, é fundamental controlar a disponibilidade dos equipamentos, maximizar as horas operacionais, reduzir os custos, aumentar a confiabilidade, segurança e eficiência dos processos. Embora a manutenção de equipamentos seja uma atividade essencial em diversos setores industriais, muitas empresas ainda enfrentam desafios relacionados aos princípios de manutenção, principalmente em quesitos preventivos e preditivos, o que pode resultar em altos custos e baixa confiabilidade dos ativos. Sendo assim, é essencial uma compreensão clara e uniforme dos métodos e dos conceitos que sustentam a manutenção produtiva (Xenos, 2014).

O conteúdo deste trabalho é direcionado a frota de equipamentos que atuam nas operações de mineração da Empresa PH (PH INTRALOGÍSTICA E SERVIÇOS), unidade Timóteo/MG e Vazante/MG. Cada uma das unidades analisadas, possui, em média, aproximadamente 60 equipamentos pesados em operação, incluindo:

- PCR – Pá Carregadeira;
- ESC – Escavadeira;
- TSE – Trator de Esteiras;
- TAG – Trator Agrícola;
- CEP – Caminhão Extra Pesado;
- CBA – Caminhão Bâscula Alta;
- CLC – Caminhão de Lubrificação Comboio;
- CTP – Caminhão Tanque Pipa;
- CBK – Caminhão Brook;
- EMP – Empilhadeira;
- VUT – Veículo Utilitário.

Em Timóteo/MG, as atividades ocorrem no site da Aperam conforme Figura 1, siderúrgica de aço inoxidável, caracterizada por elevados níveis de partículas contaminantes e agentes químicos, ou seja, ambiente operacional nocivo aos equipamentos.

Figura 1 – Aperam, siderúrgica de Aço Inoxidável.



Fonte: Aperam, 2011.

Já em Vazante/MG, as operações são realizadas na Mina Vazante conforme Figura 2, inserida no complexo industrial da NEXA, uma das maiores mineradoras de zinco do mundo, onde há intensa exposição à poeira mineral e contaminantes sólidos.

Figura 2 – Mina Vazante, NEXA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ambientes industriais como mineração e siderurgia impõem condições severas de operação aos equipamentos, acelerando os processos de desgaste mecânico, a contaminação de fluidos lubrificantes e a ocorrência de falhas prematuras em componentes críticos, impactando diretamente a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos (Neale; Cowgill, 1997).

Nesse viés, uma gestão eficaz das manutenções preditivas é essencial, visto que, tais manutenções são importantes para manter o desenvolvimento operacional, pois:

- Abre-se a necessidade de serviços de manutenções corretivas do equipamento.
- Elimina-se a chance de desmontagem desnecessária.
- Aumenta-se o tempo de disponibilidade dos equipamentos.

- Reduz-se paradas de emergência.
- Aumenta-se o aproveitamento da vida útil dos equipamentos.
- Aumenta-se a confiabilidade do desempenho operacional por meio de Key Performance Indicators (KPI's) desenvolvidos para os controles de manutenção, e, segundo Almeida (2008) para determinação prévia de interrupções de fabricação.

Segundo Ferreira (2005), a manutenção preditiva está intimamente ligada à tribologia, ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação, aspectos críticos para o funcionamento de equipamentos mecânicos, categoria que está ligada diretamente aos equipamentos pesados utilizados nas operações da empresa. A relação entre os dois temas se dá pelo fato de que muitos problemas detectados e prevenidos por meio da manutenção preditiva têm origem em questões tribológicas de acordo com Duarte (2020). Sendo elas, principalmente, a detecção de desgaste em componentes, contaminação por fatores externos dos fluídos analisados e falta das devidas tratativas durante as manutenções preventivas.

A análise do lubrificante pode ser comparada à análise do sangue humano, pois permite identificar diferentes resíduos capazes de indicar o que ocorre internamente na máquina. Esse processo é realizado por meio da ferrografia, técnica que possibilita a detecção de diversos tipos de desgaste em progresso Engeman (2018). Sendo assim, é necessário sempre estar um passo à frente cuidando da saúde da frota para performar e a manutenção preditiva junto às análises tribológicas são essenciais para tal, caso contrário, a manutenção dos equipamentos, e, principalmente, a operação serão afetados negativamente.

Fatores econômicos também são diretamente afetados, ao se realizar manutenções preditivas e preventivas com menos frequência, conseqüentemente teremos maiores custos nas manutenções corretivas. Além disso, KPI's como:

- DF – disponibilidade física;
- MTTR – (Mean Time to Repair) Tempo Médio de Reparação
- MTBF (Mean Time Between Failures) Tempo Médio Entre Falhas;
- Backlog's.

indicam quando ocorre má qualidade da manutenção preditiva. Dessa forma, o ponto máximo do interesse de uma empresa não será atingido no âmbito operacional.

Para mitigar a ocorrência de problemas crônicos relacionados a quebras e contaminações de componentes, é necessário que a análise tribológica seja realizada de maneira a seguir o protocolo de manutenção estipulado em cada tipo de equipamento, realizando as conferências e substituições necessárias em suas determinadas aplicações e períodos. Mobley (2002) destaca que a análise de óleo é uma das principais ferramentas da manutenção preditiva, permitindo identificar precocemente desgastes anormais, contaminações e falhas em componentes antes que ocorram paradas inesperadas nos equipamentos. Com isso, ações rápidas devem ser tomadas de acordo com o resultado da análise, principalmente quando o resultado se apresenta de maneira negativa. Todavia, em várias empresas, situações adversas impedem que as ações responsivas ao resultado da análise sejam realizadas. Dentre alguns fatores que corroboram para tal, apresentam-se como os principais:

- Tempo de envio da amostra coletada.
- Acesso ao laboratório tribológico.
- Coleta do resultado.
- Tempo para iniciar as tratativas.
- Parada nas operações para intervenções.

A partir do protocolo de manutenção dos equipamentos da frota da Empresa PH, a análise de óleo de um componente é feita mediante uma coleta do lubrificante em um frasco específico disponibilizado pelo fornecedor. Tal frasco é identificado (equipamento/componente) e recebe um código rastreável conforme Figura 3, inserido no software de manutenção para recebimento do resultado da análise e seguir com as tratativas necessárias de acordo com o resultado.

Figura 3 – Kit Coleta de Lubrificante (frasco, mangueira e ficha pré-registro).



Fonte: ALS, 2026.

O processo segue a seguinte ordem lógica conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Processo de coleta e envio de amostras de óleo.

<b>Etapas</b>	<b>Descrição</b>
<b>1. Coleta do óleo</b>	Coleta do óleo do componente.
<b>2. Identificação</b>	Identificação do equipamento/componente no frasco do fornecedor para envio à análise tribológica.
<b>3. Registro no Software de Manutenção</b>	Inserção do código do frasco no Software na Ordem de Serviço Preventiva.
<b>4. Envio da amostra</b>	Envio da amostra para o fornecedor.
<b>5. Resultado da análise</b>	Aguardar o resultado da análise com possíveis níveis: <b>NORMAL, ANORMAL, ATENÇÃO e CRÍTICO.</b>
<b>6. Ações corretivas</b>	Seguir com a abertura da Ordens de Serviço Preditiva para listar as tratativas corretas mediante à análise do resultado da amostra.
<b>7. Tratativas</b>	Destinar a Ordem de serviço ao mecânico responsável para dar início as tratativas listadas.

Fonte: Próprio autor, 2025.

Em todas as etapas do processo, é possível identificar fatores que podem comprometer a precisão da análise da amostra. Este trabalho analisará quatro pontos críticos:

- **Etapa 4:** O tempo (em dias) de envio da amostra para análise muito alto, fator que impede que as tratativas sejam realizadas em tempo hábil para correção.

- **Etapa 5:** O prazo prolongado para a conclusão da análise, uma consequência direta do atraso no envio da amostra.
- **Etapa 6 e 7** (maior criticidade): As tratativas não são realizadas em tempo hábil para corrigir o possível problema do componente analisado, essa etapa apresenta um conjunto de fatores que a compõe, sendo eles, quais tratativas precisam ser tomadas de acordo com a análise, tempo de abertura da Ordem de Serviço preditiva após recebimento do relatório tribológico e realização das tratativas corretas para evitar reincidência de um possível resultado CRÍTICO.

Sendo assim, de acordo com os desafios que estavam sendo encontrados nos processos de manutenção preditiva, somados ao avanço da tecnologia e as constantes evoluções nos serviços de avaliações tribológicas, o setor de manutenção da empresa, realizou uma integração do Software de Manutenção diretamente ao fornecedor que realiza as análises tribológicas dos componentes dos equipamentos. Essa integração passou por inúmeras personalizações e padronizações indo de encontro aos planos de manutenção específicos para a frota. Após a concretização de um período adaptativo, a integração apresentou ganhos significativos na rotina da companhia em diversos âmbitos, fazendo com que o processo adquirisse melhor tempo de resposta e as ações para correção dos problemas detectados fossem tomadas com mais eficácia, conforme destacado na literatura sobre manutenção preditiva e análise tribológica (Mobley, 2002). No decorrer do presente trabalho serão analisados e evidenciados os principais ganhos e resultados da integração supracitada.

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

A realização deste trabalho justifica-se pela importância da manutenção eficiente na gestão de frotas de equipamentos pesados, onde a continuidade operacional está diretamente ligada à disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Em ambientes produtivos altamente demandantes, falhas inesperadas e intervenções corretivas não planejadas podem gerar impactos significativos nos custos operacionais e na produtividade. Dessa forma, torna-se essencial analisar as melhorias nos processos de manutenção, buscando reduzir ocorrências de

falhas, otimizar o uso dos recursos e garantir maior previsibilidade nas operações.

Além disso, a adoção de práticas mais estruturadas de monitoramento e controle da manutenção contribui para melhorias não apenas no aspecto econômico, mas também no desempenho operacional e na gestão dos indicadores de performance (KPIs). Ao aumentar a confiabilidade dos equipamentos e reduzir paradas não programadas, é possível melhorar indicadores como disponibilidade mecânica, tempo médio entre falhas e custos de manutenção por hora trabalhada. Assim, este estudo se mostra relevante por contribuir para o aprimoramento da gestão da manutenção, promovendo ganhos em economia, eficiência operacional e desempenho dos indicadores utilizados na tomada de decisão nas operações industriais.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto nos resultados das manutenções preditivas a partir da integração do sistema de abertura automática de Ordens de Serviço preditivas com o sistema de resultados das análises tribológicas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o número de ordens de serviço e volume de intervenções e tratativas realizadas a partir da integração em questão.
- Avaliar as reincidências críticas nos resultados das amostras dos componentes;
- Avaliar o impacto nos KPIs operacionais MTTR (Mean Time To Repair – Tempo Médio de Reparo), MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio Entre Falhas) e DF (Disponibilidade Física).
- Avaliar o impacto cultural das equipes de manutenção.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Condições Operacionais - Mineração

Segundo Moubray (1997), a confiabilidade dos equipamentos é um fator determinante para o desempenho operacional em ambientes industriais que dependem de ativos complexos e de alta capacidade produtiva. Nesse contexto, a mineração depende de equipamentos robustos e tecnologicamente avançados para operar de maneira eficiente e segura, permitindo a extração de grandes volumes de material em ambientes desafiadores. Além disso, Smith e Hinchcliffe (2004) destacam que equipamentos industriais submetidos a condições severas de operação tendem a apresentar maior desgaste e maior probabilidade de falhas quando não são adequadamente monitorados e mantidos. Dessa forma, o ambiente em que os equipamentos pesados operam é altamente agressivo e contribui significativamente para o desgaste acelerado de componentes mecânicos devido às condições extremas presentes nessas operações. Entre os principais fatores que influenciam esse desgaste, destacam-se:

- **Partículas abrasivas:** A poeira e os detritos gerados durante as operações podem penetrar nos sistemas mecânicos, causando desgaste acelerado em componentes como rolamentos, engrenagens e motores.
- **Altas cargas e tensões:** Os equipamentos precisam lidar com cargas muito pesadas, o que gera maior desgaste estrutural e mecânico.
- **Condições climáticas adversas:** Altas temperaturas, umidade e, em algumas regiões, chuvas ácidas ou ambientes corrosivos (como minas de sal) podem acelerar a corrosão e deterioração dos equipamentos.
- **Impactos frequentes:** Operações envolvendo perfuração, transporte de rochas e explosões colocam os equipamentos sob impacto constante, reduzindo sua vida útil.

## 2.2. Condições Operacionais – Siderurgia

Segundo a World Steel Association (2021), referência global no setor siderúrgico, a produção de aço em larga escala exige operações contínuas e altamente controladas, apoiadas por equipamentos industriais robustos e tecnologicamente avançados, capazes de operar com segurança, precisão e elevada confiabilidade. O ambiente operacional das siderurgias é caracterizado por condições severas, que impõem elevados níveis de desgaste aos equipamentos e sistemas produtivos de acordo com TÜV Rheinland (2024). Dentre os principais fatores associados às condições operacionais nesse setor, destacam-se:

- **Altas temperaturas:** Processos como alto-forno, aciaria e laminação operam sob temperaturas extremas, o que provoca fadiga térmica, dilatação de componentes e degradação acelerada de materiais e lubrificantes.
- **Ambientes altamente abrasivos:** A presença constante de escórias, partículas metálicas, óxidos e poeiras industriais contribui para o desgaste intenso de superfícies, rolamentos, engrenagens e sistemas de transporte.
- **Cargas elevadas e esforços cíclicos:** Equipamentos como pontes rolantes, transportadores, laminadores e redutores são submetidos a grandes cargas e variações constantes de esforço, favorecendo falhas por fadiga mecânica.
- **Atmosferas corrosivas:** Gases, vapores químicos e elevados níveis de umidade, comuns em diferentes etapas do processo siderúrgico, aceleram fenômenos de corrosão, comprometendo a integridade estrutural e funcional dos equipamentos.

### **2.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA**

A manutenção preditiva tem como base a previsão da falha no equipamento por meio de estudos prévios e acompanhamento de parâmetros, que permitem o ajuste ou substituição dos componentes de máquina antes que essa avarie ou trabalhe fora da sua faixa ideal de produtividade. Dessa forma evitando paradas inesperadas ou desnecessárias e ajustes mais precisos que resultam em redução nos custos de manutenção, além do atingimento de uma excelência operacional. (Duarte, 2020)

O tipo de avaliação feita durante uma manutenção preditiva é essencial para realizar uma gestão e controle de manutenção. De acordo com Dhillon (2002), esses tipos de ações são também conhecidos como manutenção baseada em condições. A diferença em relação à manutenção preventiva é que, neste caso, não há uma programação fixa de manutenção, mas determinada por alguma informação vinda do próprio equipamento no qual será realizada a manutenção, tornando esta programação uma manutenção adaptativa e/ou urgente em casos críticos (Kothamasu; Huang; Verduin, 2006).

Dentro da manutenção preditiva está a Manutenção Baseada na Condição (Condition-Based Maintenance – CBM), que busca avaliar a condição de um equipamento por diferentes métodos de monitoramento. Esse tipo de abordagem utiliza técnicas capazes de identificar alterações no comportamento operacional dos equipamentos, permitindo intervenções de manutenção antes da ocorrência de falhas. Entre as principais variáveis monitoradas estão vibração, temperatura, contaminação de lubrificantes, ruído, estado das superfícies e níveis de pressão, conforme ilustrado na Figura 4. De acordo com Gulati (2012), o monitoramento periódico ou contínuo dessas variáveis possibilita que a manutenção seja realizada em um momento programado e economicamente mais adequado, evitando falhas durante a operação dos equipamentos.

Figura 4 - Tipos de Monitoramento Preditivo

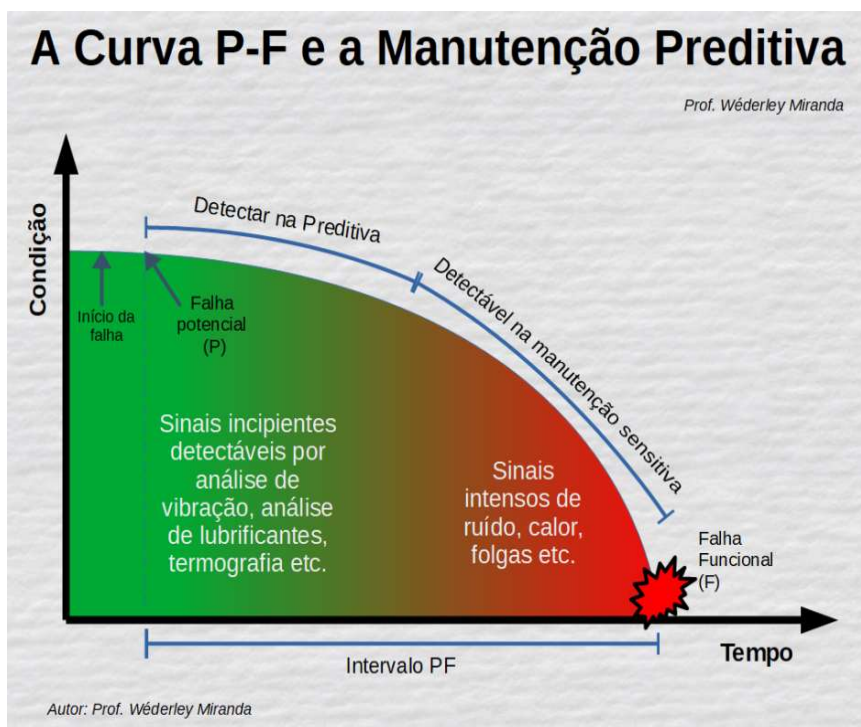


Fonte: Aiko Digital, 2026.

A manutenção preditiva evoluiu significativamente ao longo do tempo, acompanhando o avanço tecnológico e as demandas da indústria por maior eficiência e redução de custos. No início do século XX, a manutenção era predominantemente corretiva, ou seja, realizada após a falha dos equipamentos. Com o desenvolvimento da teoria da confiabilidade na década de 1950, surgiram os primeiros métodos de manutenção preventiva. No entanto, foi a partir da década de 1970, com a introdução de tecnologias de monitoramento de condições, como análise de vibração e termografia, que a manutenção preditiva ganhou destaque. Essa abordagem permitiu prever falhas com base em dados coletados dos equipamentos, reduzindo paradas não planejadas e otimizando os recursos. Segundo Moubray (1997), a manutenção preditiva tornou-se uma peça-chave na gestão da confiabilidade centrada em ativos, ao integrar técnicas avançadas de diagnóstico e monitoramento contínuo.

Sabe-se que toda falha em sistemas ou equipamentos ocorre de maneira gradativa, evoluindo do que chamamos de falha potencial (P), onde aparecem os primeiros sinais de anomalia, até a falha funcional (F), onde uma ação corretiva é necessária (Miranda, 2021). Essa evolução ocorre devido à degradação do equipamento, que pode ser monitorada através da medição da sua condição, como ilustrado na Curva P-F da Figura 5 abaixo:

Figura 5 - Curva Falha Potencial (P) - Falha Funcional (F)



Fonte: Prof. Wederley Miranda, 2021.

Ainda segundo Moubray (1997), a gestão de confiabilidade de ativos imobilizados de uma empresa precisa de monitoramento contínuo e se tratando de manutenção preditivas, um cronograma de inspeções e tratativas sempre deve ser desenvolvido para o atendimento máximo de todos os componentes de uma frota.

### 2.3.1. BENEFÍCIOS

A manutenção preditiva possui diversos benefícios no contexto geral, conforme itens listados na Tabela 2:

Tabela 2 - Benefícios da Manutenção Preditiva

<b>Benefícios</b>	<b>Percentual</b>
Redução dos custos de manutenção	50% a 80%
Redução de falhas nas máquinas	50% a 60%
Redução de estoque de peças sobressalentes	20% a 30%
Redução de horas extras para manutenção	20% a 50%
Redução do tempo de parada das máquinas	50% a 80%
Aumento no tempo de vida das máquinas	20% a 40%
Aumento da produtividade	20% a 30%
Aumento dos lucros	25% a 60%

Fonte: Adaptado de PredPonta Manutenção Preditiva, 2025.

- **Redução de Custos Operacionais:** A manutenção preditiva é uma estratégia eficaz para evitar falhas catastróficas, identificando problemas nos estágios iniciais e reduzindo custos com reparos emergenciais e períodos de inatividade. De acordo com Moubray (1997), intervenções planejadas são significativamente mais econômicas do que ações corretivas não programadas, minimizando prejuízos associados à paralisação das operações.
- **Aumento da Disponibilidade dos Equipamentos:** Com o monitoramento contínuo, a manutenção preditiva assegura que os equipamentos permaneçam mais tempo em operação, reduzindo interrupções inesperadas. Nomus (2024) destaca que o uso de sistemas integrados na manutenção preditiva aumenta a disponibilidade dos ativos ao permitir respostas rápidas e assertivas às falhas potenciais.
- **Melhoria da Confiabilidade dos Equipamentos:** A manutenção preditiva melhora a confiabilidade dos equipamentos ao prever falhas com base em dados técnicos. Conforme Parida e Kumar (2006), a manutenção preditiva contribui para a confiabilidade operacional ao fornecer informações precisas para decisões e intervenções tempestivas.
- **Otimização dos Recursos de Manutenção:** A manutenção preditiva permite que recursos, como mão de obra e peças sobressalentes, sejam utilizados de forma mais eficiente, já que as intervenções são realizadas apenas quando necessário. Coutinho (2020) enfatiza que essa abordagem reduz o desperdício e melhora a eficiência das operações, promovendo uma gestão mais racional dos recursos.

- **Prolongamento da Vida Útil dos Componentes:** A manutenção preditiva prolonga a vida útil dos componentes ao mitigar desgastes excessivos e contaminações. Conforme Stachowiak e Batchelor (2014), a aplicação da tribologia no contexto preditivo é fundamental para prolongar a vida útil dos equipamentos, diminuindo custos de reposição.

## 2.4. TRIBOLOGIA APLICADA À MANUTENÇÃO

A tribologia é a ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação entre superfícies em movimento relativo. Ela desempenha um papel crucial na manutenção preditiva, pois permite a antecipação de falhas mecânicas e o prolongamento da vida útil dos equipamentos. O atrito, um dos principais focos da tribologia, é a força que resiste ao movimento relativo entre duas superfícies em contato, influenciando diretamente o desempenho e a durabilidade de componentes mecânicos (Huthings; Shipway, 2017). Essa força pode ser expressa pela Equação 1 abaixo:

$$F_{atrito} = \mu * \frac{V}{\varepsilon} * A \quad (\text{Equação 1})$$

$\mu$  = Coeficiente de atrito (Pa.s);

$V$  = velocidade relativa entre as superfícies (m/s);

$\varepsilon$  = Espessura do lubrificante (m);

$A$  = Área de contato entre as superfícies (m<sup>2</sup>).

A manutenção preditiva, ao monitorar o atrito, possibilita a detecção precoce de desgastes e falhas, evitando custos elevados com reparos e melhorando a eficiência dos equipamentos. O estudo do atrito é essencial para otimizar o funcionamento das máquinas, reduzindo o consumo de energia e aumentando a vida útil dos componentes.

O desgaste é outro fenômeno tribológico importante, ocorrendo quando uma superfície é gradualmente removida devido ao contato com outra. Existem vários tipos de desgaste, como o desgaste adesivo, abrasivo, corrosivo e de fadiga, que afetam diretamente a performance dos equipamentos. O desgaste adesivo ocorre quando partículas de uma superfície aderem à outra, causando

danos. Já o desgaste abrasivo envolve a remoção de material por partículas duras. A equação clássica de desgaste pode ser expressa pela Equação 2 abaixo:

$$V = K * W * S \quad (\text{Equação 2})$$

$V$  = volume de material desgastado ( $m^3$ );

$K$  = coeficiente de desgaste;

$W$  = carga aplicada (N);

$s$  = distância de deslizamento (m).

A monitorização contínua desses processos por técnicas de manutenção preditiva, como análise de vibração e termografia, permite identificar sinais de desgaste antes que causem falhas catastróficas.

A lubrificação é um dos principais métodos para reduzir o atrito e o desgaste, formando uma camada protetora entre as superfícies em contato. A eficácia da lubrificação depende do tipo de lubrificante, da viscosidade e da condição operacional das superfícies. O modelo de lubrificação de EHL (elasto-hidrodinâmica) descreve a interação entre a camada de fluido e as superfícies sob alta pressão, formando uma película lubrificante. A equação para a espessura dessa película, proposta por Hamrock, Schmid e Jacobson (2004), é dada pela Equação 3 abaixo:

$$h = \frac{C * \sqrt{E}}{p^{1/2}} \quad (\text{Equação 3})$$

$h$  = espessura da película lubrificante (m);

$C$  = constante dependente do material (m);

$E$  = módulo de elasticidade (Pa);

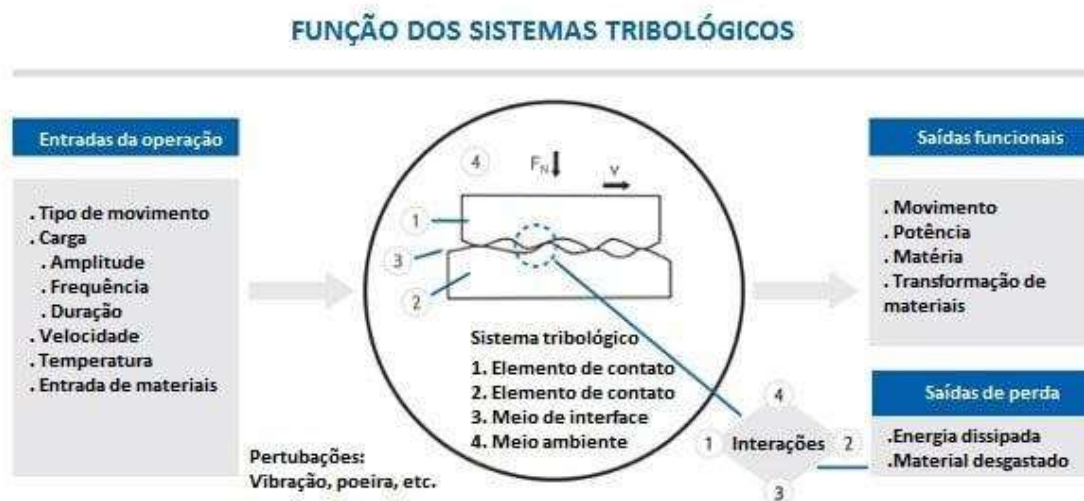
$p$  = pressão no contato (Pa).

A manutenção preditiva monitora a condição da lubrificação, analisando a viscosidade e a presença de contaminantes, de modo a evitar falhas por lubrificação inadequada.

A manutenção preditiva, baseada na tribologia, utiliza diversas tecnologias para monitorar os parâmetros tribológicos em tempo real, como sensores de temperatura, vibração e análise de óleo. Esses dados permitem uma avaliação contínua das condições de atrito, desgaste e lubrificação, possibilitando a previsão de falhas antes que ocorram. A análise de desgaste e a análise de partículas no óleo lubrificante são técnicas comuns utilizadas para detectar materiais desgastados, contaminação externa e prever a vida útil dos componentes. A utilização dessas tecnologias, junto com a tribologia, garante que os equipamentos operem com maior eficiência e menor risco de falhas inesperadas.

Por fim, o estudo da tribologia aplicada à manutenção preditiva é crucial para a melhoria contínua dos processos industriais e a otimização dos custos operacionais. A integração de métodos analíticos avançados, como simulações tribológicas e monitoramento de condições operacionais, permite às empresas anteciparem problemas, melhorar a performance e aumentar a confiabilidade dos equipamentos. O impacto da tribologia na manutenção preditiva é profundo, pois a redução do atrito e desgaste, juntamente com a aplicação de lubrificantes adequados, resulta em um desempenho superior dos sistemas mecânicos e uma maior vida útil dos ativos, conforme ilustrado na Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Função dos Sistemas Tribológicos



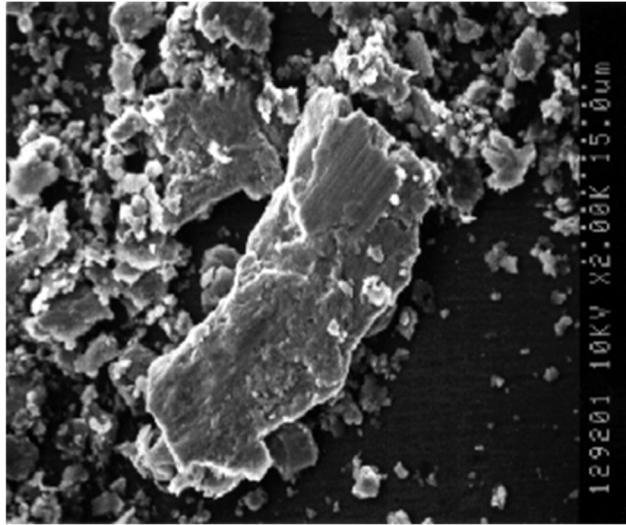
Fonte: Bruno Luciano - Abecom, 2021.

#### 2.4.1. TIPOS DE ANÁLISES TRIBOLÓGICAS

No contexto da manutenção preditiva, a análise tribológica envolve a aplicação de diferentes tipos de análises voltadas ao monitoramento das condições dos lubrificantes e dos equipamentos. O uso integrado dessas técnicas permite uma avaliação mais precisa do estado operacional dos componentes, auxiliando na antecipação de falhas e na tomada de decisões estratégicas de manutenção (Mobley, 2002). Dentre os tipos de análises tribológicas, pode-se citar:

- **FERROGRAFIA:** A técnica de ferrografia é utilizada na análise microscópica para examinar partículas de desgaste encontradas em amostras de óleo provenientes, principalmente, de motores e outros equipamentos mecânicos conforme Figura 7. Seu propósito é identificar falhas e monitorar o estado dos componentes internos desses equipamentos. Esse método requer o preparo de uma lâmina especial feita com base na amostra de óleo lubrificante coletada, para que as partículas sejam separadas e dispostas sobre uma superfície de vidro. Estudando as partículas é possível reconhecer diferentes formas de desgaste — como abrasivo, aderente e desgaste por fadiga — o que contribui para a manutenção preditiva dos equipamentos (Westcott, 2004).

Figura 7 - Ferrografia microscópica.



Fonte: Monteiro, Laercio (2016).

A ferrografia fornece informações importantes sobre a origem do desgaste dos componentes analisados e qual é sua gravidade e tempo de vida útil previsto. De acordo com uma pesquisa conduzida por Koch (2009), “ferrografia é considerada uma das melhores técnicas para identificar problemas em sistemas mecânicos; ela oferece insights detalhados sobre o processo de desgaste em curso e os materiais envolvidos”. Com esse diagnóstico feito precocemente, é possível adotar medidas corretivas antes que uma falha grave ocorra.

- **VISCOSIDADE:** A viscosidade é uma das propriedades mais significativas ao considerar a análise tribológica, pois afeta diretamente a resistência de um fluido (como óleo lubrificante) ao fluxo e influencia a formação da camada protetora entre as superfícies que têm contato entre si. Ao realizar uma análise tribológica, a viscosidade desempenha um papel essencial em minimizar o atrito e o desgaste, pois uma viscosidade correta assegura que o lubrificante permaneça nas áreas de atrito sem gerar contato direto entre metais, além de criar uma camada protetora necessária para preservar os componentes envolvidos. Geralmente, a viscosidade é medida em centistokes (cSt), sendo um fator importante para determinar o quão eficiente é a lubrificação (Stachowiak; Batchelor, 2014).

A relação entre viscosidade e o desempenho do lubrificante em tribologia pode ser entendida a partir da equação de Reynolds para lubrificação hidrodinâmica, que descreve como a viscosidade afeta a formação da película lubrificante. A fórmula é expressa conforme Equação 4 abaixo:

$$\eta = \frac{p \cdot h^2}{\mu \cdot v} \quad (\text{Equação 4})$$

$\eta$  = índice de eficiência da película;

$p$  = pressão no ponto de contato (Pa);

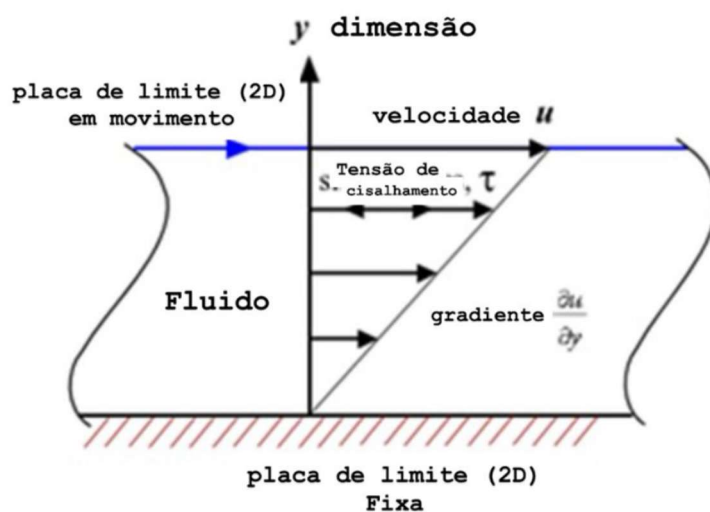
$h$  = espessura da película lubrificante (m);

$\mu$  = viscosidade absoluta do lubrificante (Pa\*s);

$v$  = velocidade relativa entre as superfícies (m/s).

Uma viscosidade inadequada pode levar à formação insuficiente da película lubrificante, resultando em maior atrito e desgaste. Segundo Stachowiak e Batchelor (2014), a viscosidade do lubrificante influencia diretamente a formação da película lubrificante, além de afetar a dissipação de energia no contato e a capacidade de remoção de calor do sistema. Assim, o controle preciso da viscosidade do lubrificante é essencial para manter a eficiência dos sistemas mecânicos em operação e prevenir falhas prematuras conforme Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Viscosidade de Cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Univ of Sci & Tech of China, L. G. Pang, 2009.

- ÍNDICE DE ACIDEZ:** O índice de acidez é uma medida importante na análise tribológica de lubrificantes, pois indica a quantidade de ácidos livres presentes no óleo que podem resultar da decomposição do lubrificante devido ao uso prolongado ou à contaminação por agentes externos. O aumento do índice de acidez no lubrificante pode levar à corrosão das superfícies metálicas e prejudicar a formação da película lubrificante, contribuindo para o desgaste prematuro dos componentes. O índice de acidez é tipicamente expresso em mg KOH/g, que representa a quantidade de hidróxido de potássio necessária para neutralizar os ácidos livres presentes no lubrificante.

A tabela 3 abaixo apresenta, de forma ilustrativa, parâmetros utilizados na avaliação de contaminantes e propriedades físico-químicas de fluidos lubrificantes. Entre os contaminantes analisados estão diluição de combustível, fuligem e água, sendo esta última detectada por FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy). As siglas CG indicam Condição Grave, enquanto E2412 refere-se a um método de ensaio para determinação de fuligem. Na seção de propriedades do fluido, são apresentados parâmetros como viscosidade a 40 °C e 100 °C (cSt), número de acidez (TAN), número de basicidade (TBN), além de

indicadores de oxidação e nitração, que auxiliam na avaliação da condição e degradação do óleo em uso.

Tabela 3 - Relatórios de análise de lubrificantes e resultados dos testes de contaminantes e propriedades do fluido.

Diluição de Combustível (%)	Contaminantes		Propriedade dos Fluidos					
	Fuligem (%)	Água (%)	Viscosidade a 40°C (cSt)	Viscosidade a 100°C (cSt)	Número de Acidez (mg KOH/g)	Número de Basicidade – TBN (mg KOH/g)	Oxidação (abs/cm)	Nitração (abs/0,1mm)
		< 0,1 - FTIR		15,6	2,34	8,49	11	5
4,5 - CG	0,2 - E2412	< 0,1 - FTIR		12,6		5,83	14	9
< 2 - Estimado	< 0,1	< 0,1 - FTIR		13,2		6,9	11	6
4,5 - CG	< 0,1	< 0,1 - FTIR		12,9		8,01	12	8
6,9 - CG	0,2 - E2412	< 0,1 - FTIR		11,6		4,17	14	10
> 10 - CG	0,3 - E2412	< 0,1 - FTIR		10,1		4,62	14	9

Fonte: Adaptado de DEBSHAW, B. (2024).

Em uma análise tribológica, o índice de acidez fornece informações sobre a degradação do óleo e sua capacidade de continuar a proteger as superfícies de contato. O aumento do índice de acidez pode ser um indicativo de que o lubrificante está se deteriorando, o que compromete sua capacidade de reduzir atrito e desgaste. Segundo Bhushan (2013), "o monitoramento do índice de acidez é essencial para garantir a integridade do lubrificante e prevenir danos por corrosão, uma vez que os ácidos presentes no óleo podem atacar as superfícies metálicas e acelerar o desgaste". Assim, o controle do índice de acidez é fundamental para a manutenção preditiva, pois permite a troca de lubrificantes antes que causem danos aos componentes do equipamento.

## **2.5. INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUTENÇÃO E AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA**

Para um controle e gestão de manutenção competente, é interessante a aquisição de um software de manutenção que possa organizar e auxiliar nos planejamentos e realizações de todas as atividades, quer seja preventivas, preditivas ou corretivas (Mobley, 2002).

Além da gestão de manutenção, o software também é essencial para otimizar a gestão de ativos e garantir a eficiência das operações, facilitando o planejamento e o controle das atividades operacionais. Em resumo, faz com que a operação primária não seja afetada por conta das paradas dos equipamentos para realização das manutenções, além de melhorar a tomada de decisões com base em dados. A praticidade para controlar as requisições e solicitações de compra para cada tipo de situação torna a rotina de manutenção mais ágil e coesa, juntamente a um ERP (Enterprise Resource Planning - Planejamento de Recursos Empresariais) para controle de estoque e processos de suprimentos como as compras e importações de materiais. Assim, a gestão de manutenção se torna completa.

### **2.5.1. SOFTWARE DE MANUTENÇÃO**

Os softwares de gestão da manutenção, também conhecidos como CMMS (Computerized Maintenance Management System), são ferramentas utilizadas para organizar, planejar e controlar as atividades de manutenção em equipamentos e instalações industriais. Esses sistemas permitem o gerenciamento de informações relacionadas a intervenções de manutenção, histórico de falhas, planejamento de atividades e controle de recursos, contribuindo para maior eficiência operacional e melhor tomada de decisões.

Entre as principais funcionalidades presentes nesses sistemas destacam-se o planejamento e acompanhamento de manutenções preventivas, preditivas e corretivas, o gerenciamento de ordens de serviço, o controle de peças e materiais em estoque e a geração de relatórios com indicadores de desempenho da manutenção. Tais recursos possibilitam o monitoramento da confiabilidade dos equipamentos e auxiliam na redução de paradas não planejadas.

Além disso, muitos softwares de gestão da manutenção permitem integração com outros sistemas corporativos, como sistemas de gestão empresarial (ERP) e plataformas de monitoramento de equipamentos, possibilitando a centralização das informações e ampliando a capacidade de análise dos dados operacionais.

De modo geral, esses sistemas oferecem funcionalidades como:

- Gestão de manutenção preventiva, preditiva e corretiva, incluindo planejamento e programação de intervenções;
- Gestão de ordens de serviço, com registro de falhas, acompanhamento das atividades e histórico de manutenção;
- Gestão de estoque de peças e materiais, permitindo controle de inventário e reposição de componentes;
- Relatórios e indicadores de desempenho, como MTTR (Mean Time to Repair), MTBF (Mean Time Between Failures) e disponibilidade operacional;
- Gestão documental, com armazenamento de manuais, procedimentos técnicos e certificados;
- Integração com outros sistemas corporativos, possibilitando maior integração de dados operacionais.

No presente trabalho, foi utilizado um software de gestão de manutenção empregado pela empresa PH Intralogística e Serviços, o qual será abordado no estudo de caso apresentado nas seções seguintes.

### **2.5.2. LABORATÓRIO DE ANÁLISES TRIBOLÓGICAS**

Laboratórios especializados em análise tribológica desempenham um papel importante no monitoramento da condição de equipamentos e componentes mecânicos. Esses laboratórios realizam análises de fluidos lubrificantes, principalmente óleos utilizados em motores, sistemas hidráulicos, redutores e outros conjuntos mecânicos, com o objetivo de identificar sinais de desgaste, contaminação ou degradação do lubrificante.

A análise tribológica permite avaliar o estado de funcionamento dos equipamentos por meio da interpretação das propriedades físico-químicas do óleo e das partículas de desgaste presentes na amostra. Essas informações são amplamente utilizadas em estratégias de manutenção preditiva, pois permitem detectar anomalias antes que ocorram falhas mais graves, contribuindo para o aumento da confiabilidade dos ativos e a redução de custos de manutenção. Entre as principais técnicas utilizadas por laboratórios de análise de óleo destacam-se:

- **Análise de óleo lubrificante**

A análise do óleo lubrificante é uma das principais ferramentas para o monitoramento das condições operacionais dos equipamentos. Entre os parâmetros normalmente avaliados estão a viscosidade, o índice de acidez, a presença de contaminantes e a concentração de partículas metálicas presentes no fluido. A variação desses parâmetros pode indicar alterações no desempenho do lubrificante ou a ocorrência de processos de desgaste nos componentes mecânicos.

A presença de partículas metálicas no óleo, por exemplo, pode indicar desgaste em determinados componentes do sistema. A identificação do tipo e da morfologia dessas partículas auxilia na determinação do mecanismo de desgaste predominante, como desgaste abrasivo, adesivo ou por fadiga.

- **Análise de partículas de desgaste**

Outra técnica amplamente utilizada é a ferrografia, que consiste na análise microscópica das partículas de desgaste presentes no óleo lubrificante. Essa técnica permite identificar características das partículas, como tamanho, forma e composição, possibilitando uma melhor compreensão dos mecanismos de desgaste atuantes no equipamento.

A análise detalhada dessas partículas fornece informações relevantes sobre o estado de funcionamento dos componentes, permitindo a identificação precoce de falhas e a definição de ações corretivas ou preventivas.

- **Monitoramento de condição**

Além da análise laboratorial dos lubrificantes, o monitoramento da condição dos equipamentos pode ser complementado por outras técnicas de manutenção preditiva, como análise de vibração, monitoramento de temperatura e análise de pressão em sistemas hidráulicos. A combinação dessas técnicas possibilita uma avaliação mais completa do estado operacional dos ativos industriais.

- **Relatórios técnicos e suporte à manutenção**

Após a realização das análises, os laboratórios especializados fornecem relatórios técnicos contendo a interpretação dos resultados obtidos, além de recomendações para a operação e manutenção dos equipamentos. Esses relatórios geralmente incluem análises de tendência, permitindo acompanhar a evolução das condições do equipamento ao longo do tempo e apoiar o processo de tomada de decisão na gestão da manutenção.

A terceirização das análises de óleo é uma prática comum em diversos setores industriais, especialmente em operações com grandes frotas de equipamentos, como mineração, siderurgia e construção pesada. Esse modelo permite acesso a laboratórios especializados, equipamentos analíticos avançados e profissionais qualificados para interpretação dos resultados, contribuindo para maior confiabilidade das análises e maior rapidez na obtenção dos diagnósticos (Moblely, 2002).

Além disso, muitos laboratórios disponibilizam plataformas digitais que permitem a integração dos resultados das análises com sistemas de gestão da manutenção utilizados pelas empresas. Essa integração possibilita maior agilidade no registro e acompanhamento das condições dos equipamentos, facilitando a tomada de decisões relacionadas ao planejamento de intervenções

e à prevenção de falhas. A automação da troca de informações entre sistemas pode contribuir significativamente para o aumento da eficiência na gestão da manutenção e na preservação dos ativos industriais (Silva; Pereira, 2023).

## **2.6. INDICADORES DE DESEMPENHO (KPI's) PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Os KPIs de manutenção preditiva são métricas essenciais para monitorar a confiabilidade, disponibilidade e eficiência dos equipamentos. Indicadores como MTTR (Mean Time to Repair), MTBF (Mean Time Between Failures) e disponibilidade física ajudam a avaliar o desempenho dos ativos e identificar padrões de falhas ao longo do tempo. De acordo com Mobley (2002), esses indicadores são amplamente utilizados na manutenção preditiva para melhorar o planejamento das intervenções e reduzir o tempo de indisponibilidade dos equipamentos. Além disso, a aplicação sistemática desses indicadores permite otimizar a gestão de ativos e apoiar a tomada de decisões estratégicas voltadas à confiabilidade operacional e à redução de custos de manutenção, contribuindo para o aumento da produtividade dos sistemas industriais, conforme destacado por Alan Kardec e Julio Nascif (2016).

### **2.6.1. MTTR (Mean Time to Repair – Tempo Médio para Reparo)**

O MTTR mede o tempo médio necessário para restaurar um equipamento após uma falha. Ele é calculado pela Equação 5 abaixo:

$$MTTR = \frac{\sum \text{Tempo de Reparo (horas)}}{N^{\circ} \text{ de Falh}} \quad (\text{Equação 5})$$

Esse indicador auxilia na avaliação da eficiência das equipes de manutenção, permitindo identificar a rapidez com que os reparos são realizados e a necessidade de melhorias nos processos de manutenção (Mobley, 2002).

### **2.6.2. MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio Entre Falhas)**

O MTBF representa o tempo médio de operação entre falhas consecutivas de um equipamento, sendo um indicador fundamental da confiabilidade operacional. Ele é calculado pela Equação 6 abaixo:

$$MTBF = \frac{\sum \text{Tempo de Operação (hor)}}{N^{\circ} \text{ de Falhas}} \quad (\text{Equação 6})$$

O aumento do MTBF está diretamente relacionado a boas práticas de manutenção preventiva e preditiva, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e melhorando a produtividade (Smith; Hwakins, 2004).

### 2.6.3. Disponibilidade Física (DF)

A Disponibilidade Física mede a proporção do tempo em que um equipamento está disponível para uso, considerando o tempo total e o tempo de manutenção. A fórmula utilizada é conforme Equação 7 abaixo:

$$DF = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$


Esse KPI é essencial para mensurar a eficiência da manutenção e identificar oportunidades para reduzir o tempo de inatividade dos equipamentos. Manutenções corretivas prolongadas reduzem a disponibilidade, impactando diretamente a produtividade das operações industriais e de campo (Moblely, 2002).

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como um estudo de caso de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e quantitativa, desenvolvido a partir da análise de dados reais de manutenção de uma frota de equipamentos pesados pertencente à empresa PH Intralogística e Serviços. Inicialmente, realizou-se um levantamento e organização dos históricos de manutenção corretiva e preditiva, bem como dos relatórios de análises de óleo e dados tribológicos, referentes ao período de 2016 a 2018, fase em que os processos de monitoramento e análise eram conduzidos de forma não integrada entre os sistemas utilizados, ou seja, eram conduzidos manualmente.

O período em que se realizava os processos de manutenção preditiva de maneira manual foi marcado por resultados ruins no painel de manutenção semanal, esse painel é composto pelos indicadores de manutenção da referida unidade conforme Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Painel de controle de manutenção Semana 02/12/2018 a 08/12/2018.

 <b>PAINEL DE CONTROLE DE MANUTENÇÃO (ANÁLISE S-1)</b>						
PILAR	ITENS DE CONTROLE	PERIODO	PREV X REAL	META	TIMOTEO	VAZANTE
ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO	MANUTENÇÃO PREVENTIVA	S-1	REAL	85% ↑	100%	100%
	MANUTENÇÃO PREDITIVA	S-1	REAL	85% ↑	100%	100%
	LAVAGEM	S-1	REAL	85% ↑	100%	100%
	LUBRIFICAÇÃO	S-1	REAL	85% ↑	86%	100%
	ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO SEMANAL - GERAL	S-1	REAL	85% ↑	96%	100%
GESTÃO	ATRASO MÉDIO APONTAMENTO HORIMETRO (DIAS)	-	REAL	<=3 ↓	1,6	3,2
	PREVENTIVAS ATRASADAS > 50H	-	TOTAL	0 ↓	5	0
	CUSTO MANUTENÇÃO	MÊS 10	TOTAL	100% ↓	98%	152%
O.S	ORDENS DE SERVIÇO - ABERTAS	S-1	ABERTAS	-	156	276
	ORDENS DE SERVIÇO - FECHADAS	S-1	FECHADAS	-	134	71
	ORDENS DE SERVIÇO - BACKLOG	S-1	REAL	<=0% ↓	14%	74%
	TEMPO MÉD. FECHAMENTO (DIAS)	S-1	REAL	↓	7	44
	ORDENS DE SERVIÇO - ABERTAS (INFERIOR SEM. ATUAL)	TOTAL	ABERTAS	↓	480	697
ALS	Δ RESULTADOS (DATA RESULTADO - DATA COLETA)	S-1	REAL	<=10 ↓	11,0	12,0
	Δ AÇÃO - RESULT AMOSTRA (> MO - DATA RESULTADO)	S-1	REAL	↓	19	51
	AMOSTRAS CRÍTICAS EM ABERTO	TOTAL	TOTAL	0 ↓	1	7

Fonte: Dados internos da empresa, 2018.

Em grande maioria, as manutenções programadas estavam sendo realizadas, porém, os indicadores específicos dos resultados de coleta estavam sempre em discordância com as metas estabelecidas conforme destacado na figura 9.

Em 2019, ocorreu a implementação da integração entre softwares de gestão de manutenção e análise de óleo, com o objetivo de automatizar a avaliação dos componentes, padronizar critérios de análise, otimizar a tomada de decisão relacionada à manutenção preditiva, e, principalmente, realizar a abertura automática das ordens de serviço preditivas mediante ao resultado da análise tribológica da amostra de óleo enviada.

O processo de implementação foi conduzido pelo setor corporativo de manutenção da empresa, o fluxo de processos até finalizar as tratativas da manutenção eram os mesmos, porém, após a integração, se tornaram automatizados. Sendo assim, foram realizadas algumas personalizações nas APIs do software de manutenção para que a comunicação entre os sistemas funcionasse se baseando nos planos de manutenção dos equipamentos e de acordo com o resultado da análise do componente em questão. Não houve gastos com treinamentos e nem novos processos, apenas ajustes e uma breve homologação nas rotinas dos controladores de manutenção para que conduzissem da melhor maneira a melhoria do sistema. Ao todo, o investimento total foi de R\$20.000,00, como a empresa contava com 10 filiais no momento da implementação o custo foi rateado igualmente, sendo assim, o custo para cada unidade foi de R\$2.000,00.

No estudo em questão, o ano de 2019 foi considerado como período adaptativo, sendo assim, o histórico de manutenção referente a esse ano não foi avaliado como resultado.

Para fins de comparação e avaliação dos impactos da integração, foram analisados os dados e indicadores de manutenção referentes ao período de 2020 em diante, considerando aspectos como recorrência de falhas, histórico de intervenções, comportamento dos componentes monitorados e eficiência do processo de manutenção preditiva após a automação das análises. Os dados

coletados foram submetidos a um processo de filtragem, síntese e análise comparativa, permitindo a avaliação dos resultados obtidos antes e após a integração dos sistemas. A análise foi complementada por literaturas técnicas, manuais de fabricantes, artigos científicos e documentos técnicos, com o objetivo de embasar teoricamente os conceitos de manutenção preditiva, tribologia e análise de óleo aplicados ao estudo.

Além disso, foram considerados elegíveis, apenas os dados e relatórios diretamente relacionados a frota das unidades operacionais de Timóteo/MG e Vazante/MG para serem analisados no estudo de caso, visto que, mediante às outras filiais da companhia, essas em destaque apresentam uma confiabilidade maior dos dados devido ao tempo de operação e histórico de manutenção. Informações que não apresentaram aderência ao contexto ou que não contribuíram para a análise comparativa proposta foram desconsideradas. Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou avaliar, de maneira prática e fundamentada, os benefícios da integração de softwares e da automação das análises tribológicas, evidenciando seus impactos na confiabilidade, disponibilidade e saúde da frota de equipamentos em questão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos com a implementação da integração sistêmica entre o software de gestão de manutenção e a plataforma de análise tribológica.

### 4.1. Aumento das intervenções preditivas realizadas

A integração total dos sistemas proporcionou a abertura automática de Ordens de Serviço (OSs) preditivas no sistema de acordo com a necessidade das tratativas expressas pelo resultado da amostra e de cada componente analisado. Tais OSs, eram abertas manualmente antes da integração, o que impactava diretamente o processo, visto que o tempo para iniciar as tratativas era maior e isso compromete o componente conforme o estado de sua contaminação.

Figura 10 – Tela de abertura de Ordens de Serviço.

The screenshot displays the 'Tela de abertura de Ordens de Serviço' (Order Service Opening Screen) in a software application. The interface is organized into several sections:

- Header:** Includes a menu bar with options like 'Arquivo', 'Tabelas', 'Cadastros', 'Processos', 'Personalizado', 'Janelas', and 'Ajuda'. Below it is a toolbar with various icons for file operations and navigation.
- Form Fields:**
  - Filial:** 01006 - DIVINOPOLIS
  - Reduzido:** -1 \* O.S.
  - Situação:** Simulada
  - Data Programada:** 14/12/2025 21:11:27
  - O.S. de Origem:** 9052336
  - Status de Programação:** Aguardando Nivelamento de Recursos
- Request Details (Highlighted with a red box):**
  - Solicitante/Funcionário:** 010208 - GUSTAVO LUCAS PEREIRA LOPES
  - Responsável:** 010208 - GUSTAVO LUCAS PEREIRA LOPES
  - Solicitação:** TESTE - MANUTENÇÃO PREDITIVA TCC
  - DESCRIPTION:** DESCRICAO ORIENTACOES TRATATIVAS
  - RESULTADO ANÁLISE DE OLEO ALS**
- Other Fields:**
  - \* Setor Executante:** 016 - PREDITIVA
  - \* Plano:** (empty)
  - \* Tipo de Manutenção:** 007 - MOVEIS - PREDITIVA
  - Prioridade:** 3 - Média
  - \* Aplicação:** CBA-333 - CAMINHAO BASCULA ALTA VOLVO VM 330 6X4R
  - Centro de Custo:** 0101001 - MANUTENCAO
  - \* Conta Contábil:** 210701 - MANUTENCAO CORRETIVA MECANICA/OUTROS
  - \* Cliente:** 04 - GERDAU AÇOS LONGOS
  - \* Fornecedor:** 00197101 - TREVISIO BETIM
  - \* Localização:** (empty)
  - Prazo Entrega (Data e Hora):** (empty)
  - Parar Aplicação (Data e Hora):** (empty)
  - Funcionar Aplic. (Data e Hora):** (empty)
  - \* Horas Exec./ Dia:** (empty)
  - \* Execução Prevista (HS):** (empty)
  - \* Homem Hora Prevista (HS):** (empty)
  - \* Interferência Prevista (HS):** (empty)
  - \* % Interferência Prevista:** (empty)
  - \* Custo RH Previsto:** (empty)
  - Moeda:** RS - REAL

Fonte: Dados internos da empresa, 2026.

Conforme figura 10, anteriormente à integração, o controlador de manutenção realizava a seguinte rotina após recebimento do resultado da amostra, um novo registro era aberto na tela de Ordens de Serviço e os principais pontos a serem preenchidos eram:

- 1. Solicitante/Responsável pela abertura da OS:** Identificando o solicitante pelo serviço a ser realizado que interpreta o relatório de análise que irá descrever as tratativas necessárias para a manutenção e o responsável por realizar a manutenção efetivamente.
- 2. Solicitação:** Resumo do resultado da análise, interpretação das possíveis causas e descrição completa com as tratativas e ações a serem tomadas para correção dos possíveis problemas que causaram a contaminação e/ou desgaste prematuro do componente.
- 3. Setor Executante:** 016 - PREDITIVA é o código de manutenção referente a intervenções realizadas nos componentes após um resultado de análise de amostra.
- 4. Aplicação:** A aplicação se refere ao equipamento que será feita a manutenção preditiva.

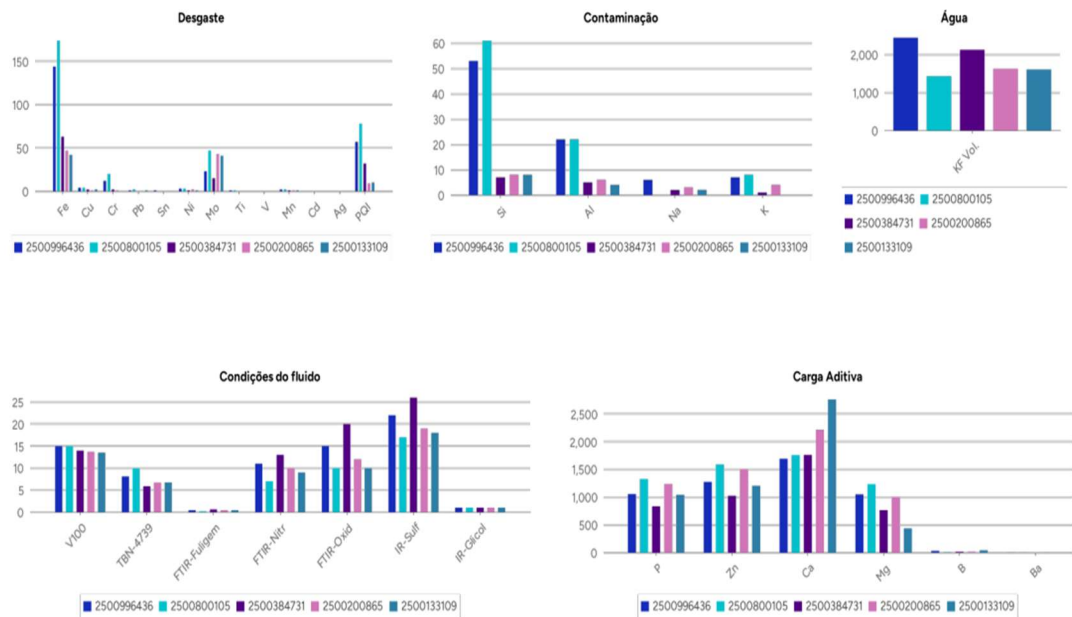
Nesse modelo, havia alguns pontos negativos além do tempo despendido, destacando-se a despadronização das ações a serem realizadas. Ademais, por se tratar de um processo essencialmente manual, o fator humano exerce influência direta na ocorrência de falhas, contribuindo para erros como interpretações incorretas das informações, registros inconsistentes e descrições imprecisas das tratativas adotadas. A ausência de padronização e o elevado grau de intervenção manual aumentam a variabilidade do processo e a probabilidade de falhas operacionais, impactando negativamente a eficiência e confiabilidade das atividades de manutenção (Slack; Brandon; Johnston, 2015). A figura 11 e 12 abaixo evidencia um relatório de análise:

Figura 11 – Relatório de Análise.



Fonte: S360 ALS, 2025.

Figura 12 – Relatório de Análise ALS.



Fonte: S360 ALS, 2025.

Em todos os resultados dos relatórios, as orientações e ações de inspeção de cada amostra eram enfatizados no documento feito pela ALS, juntamente aos resultados anteriores do componente para se fazer uma comparação. Além disso, gráficos e informações dos principais indicadores de desgaste, materiais contaminantes, condições do fluido e carga ativa também estão presentes no relatório. Toda essa gama de informação precisava ser analisada e transcrita para a abertura manual da OS preditiva.

Após a integração, o fluxo de geração de OS foi completamente alterado, trazendo uma melhora extremamente eficaz, de maneira que, assim que o resultado da amostra se concluía, automaticamente uma OS preditiva era aberta no sistema, com todas as orientações, informações úteis e tratativas a serem realizadas conforme Figura 13 abaixo.

Figura 13 – Ordem de Serviço Automática proveniente do resultado de uma amostra.



The screenshot displays a web-based form for creating a service order (OS). The interface includes a header with the company name '01002 - VAZANTE' and a search bar. Below the header, there are fields for 'Reduzido' (1892848), 'O.S.' (9052973), and 'Situação' (Real). The 'Data Programada' is set to 17/12/2025 08:54:15. The form is organized into several sections: 'Cadastro', 'Observações', 'Encerramento', 'Registro de Serviços', 'Coleta de Óleo', 'O.S.'s Vinculadas', 'Anexos', and 'Assinaturas Digitais (Mo)'. The 'Cadastro' section contains fields for 'Solicitante/Funcionário' (012721 - BRENO THIAGO MORORO AFONSO), 'Responsável' (011021 - MARCOS MESSIAS DA SILVA), 'Solicitação' (Status da Amostra: ANORMAL, Compartimento: 2.01 - RADIADOR, O.S. da Amostra de Origem: 9048830, Responsável pela Avaliação: Pedro Neri - ALS, Avaliação: Encontrado Impurezas), '\* Setor Executante' (016 - PREDITIVA), '\* Plano', '\* Tipo de Manutenção' (007 - MOVEIS - PREDITIVA), 'Prioridade' (<Não Informada>), '\* Aplicação' (CEP-326 - CAMINHAO EXTRA PESADO VOLVO FMX 460 6X4R), 'Centro de Custo' (0101001 - MANUTENCAO), '\* Conta Contábil' (210202 - MATERIAIS DE PREDITIVA), '\* Cliente', '\* Fornecedor', and '\* Localização'. The 'Encerramento' section includes 'Prazo Entrega (Data e Hora)' (17/12/2025 08:54:15), 'Parar Aplicação (Data e Hora)', and 'Funcionar Aplic. (Data e Hora)'. The 'Registro de Serviços' section contains '\* Horas Exec./ Dia' (0,00), '\* Execução Prevista (HS)' (00:00:00), '\* Homem Hora Prevista (HS)', '\* Interferência Prevista (HS)', and '\* % Interferência Prevista' (0). The 'Coleta de Óleo' section contains '\* Custo RH Previsto' and 'Moeda' (RS - REAL). The 'O.S.'s Vinculadas' section contains 'Nº Comunicado Incidente RM' (1). The 'Anexos' section contains '2'. The 'Assinaturas Digitais (Mo)' section contains '3' and '4'.

Fonte: Dados internos da empresa, 2025.

Na figura 13 acima, evidencia-se uma OS proveniente da abertura automática, todos os itens de preenchimento manual já constam como preenchidos, sendo necessário inserir apenas o Solicitante e Responsável pela manutenção conforme item 1 na imagem. Se tratando do processo sistêmico, os ganhos como praticidade e rapidez são nítidos. Foram realizadas simulações do processo anterior à integração com a abertura da OS e inserção das tratativas manualmente, o controlador de manutenção gastava em média 9 minutos a partir da avaliação do resultado para abrir a OS. Após a integração, o processo se faz automaticamente por completo, a simulação durou menos de 1 minuto, houve um ganho de 8 minutos por Ordem de Serviço preditiva realizada.

Além do ganho de tempo, houve um ganho de performance após a integração decorrente da padronização das tratativas para envio da OS para o manutentor que irá realizar a atividade conforme figura 14 abaixo.

Figura 14 – Ordem de Serviço destinado ao mecânico para tratativas.

	Ordem de Serviço	Data Programada	Status	Aplicação			
	9053137	17/12/2025	F	CEP-326 CAMINHAO EXTRA PESADO VOLVO FMX 460 6X4R			
<b>Tipo de Manutenção: 007 - MOVEIS - PREDITIVA</b>							
<b>Filial:</b> 01002 - VAZANTE <b>Solicitante/Funcionário:</b> 012721 - BRENO THIAGO MORORO AFONSO <b>Responsável:</b> 011021 - MARCOS MESSIAS DA SILVA <b>Setor Executante:</b> 016 - PREDITIVA <b>Centro de Custo:</b> 0101001 - MANUTENCAO							
<b>Serviço Solicitado:</b> Status da Amostra: ANORMAL Compartimento: 5.01 - TRANSMISSÃO O.S. da Amostra de Origem: 9048830 Responsável pela Avaliação: Francisco Ferreira Nantes - ALS Avaliação: Encontrado moderada concentração de Silício. Ocorreu uma variação dos valores de aditivação do óleo.  Ações de inspeção: Durante a próxima parada programada do equipamento, recomendamos verificar possíveis danos nas vedações, evidências de vazamentos e as condições de operação. Enviar nova amostra no intervalo recomendado.							
<b>Observações:</b>							
<b>Solução:</b>							
							
OK	NA	NOK	Descrição	Material	Qtde.	Uni	Serviço
✓			VERIFICAR POSSÍVEIS DANOS NAS VEDAÇÕES	-	0,0		VERIFICAR
✓			VERIFICAR EVIDÊNCIAS DE VAZAMENTOS	-	0,0		VERIFICAR
✓			VERIFICAR AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	-	0,0		VERIFICAR
✓			FOI VERIFICADO AS VEDAÇÕES, EVIDÊNCIAS DE VAZAMENTOS E AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO, TUDO NORMAL	-	0,0		VERIFICAR
<b>Executante</b>				<b>Início do Serviço</b>		<b>Fim do Serviço</b>	
010496 - WILLIAM MOREIRA DA SILVA				27/12/2025 15:00		27/12/2025 15:30	
<b>Observações:</b>							

Fonte: Dados internos da empresa, 2025.

Todas as ações necessárias já se encontram previamente descritas nos campos de registro de serviços em destaque, cabendo ao mecânico executar as atividades conforme as instruções estabelecidas. As ações que são descritas na OS automática foram padronizadas por meio da personalização realizada pelo setor de manutenção corporativo da companhia para cada família de equipamento de acordo com os respectivos planos de manutenção.

Em síntese, o controlador de manutenção limita-se a direcionar o documento, emitido de forma automática, ao responsável pela execução, o qual deve seguir rigorosamente as orientações definidas durante o preenchimento automático do sistema. A padronização de instruções de trabalho aliada à automação de processos contribui para a redução da variabilidade operacional, minimização de erros humanos e aumento da eficiência e rastreabilidade das atividades de manutenção (ISO 9001; 2015).

Juntamente a melhoria da eficiência das manutenções, o número real de OSs preditivas aumentou significativamente, visto que em todos os resultados ANORMAIS, ATENÇÃO e CRÍTICOS, haviam ações a serem feitas para preservar a saúde dos componentes. Além do número de OS subir, o coeficiente de criticidade que envolve todos os resultados negativos diminuiu significativamente. Isso delimita uma melhora na qualidade das tratativas e assume um papel de melhoria contínua para a companhia, pois após a geração de mais ações de prevenção, os indicadores de preventiva de todas as unidades que são auditados semanalmente pelo setor de manutenção corporativo apresentaram ganhos de performance, conforme figuras 15 e 16 abaixo.

Figura 15 - Painel Semanal completo 09/12/2018 à 15/12/2018.

PAINEL DE CONTROLE DE MANUTENÇÃO (ANÁLISE S-1)																		
PERÍODO → 09/12/18 à 15/12/18 SEMANA → 47																		
PILAR	ITENS DE CONTROLE	PERÍODO	PREV X REAL	META	PHS	BARRA MANSÁ	BEIJA-VISTA DE MINAS	CARIACICA	DIVINÓPOLIS	JECEABA	JUIZ DE FORA	MARABÁ	MORRO AGUDO	RESENDE	SAPUCAIA DO SUL	TIMÓTEO	TRES MARIAS	VAZANTE
ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO	MANUTENÇÃO PREVENTIVA	S-1	REAL	85% ↑	82%	94%	90%	90%	72%	17%	100%	100%	100%	87%	85%	100%	100%	50%
	MANUTENÇÃO PREDITIVA	S-1	REAL	85% ↑	71%	-	100%	-	67%	0%	100%	100%	21%	92%	54%	100%	80%	-
	LAVAGEM	S-1	REAL	85% ↑	58%	-	100%	100%	-	-	100%	46%	0%	100%	38%	29%	100%	0%
	LUBRIFICAÇÃO	S-1	REAL	85% ↑	72%	100%	100%	100%	89%	0%	100%	57%	67%	100%	93%	100%	100%	0%
	ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO SEMANAL - GERAL	S-1	REAL	85% ↑	70%	97%	98%	97%	76%	6%	100%	76%	47%	95%	68%	82%	95%	17%
GESTÃO	ATRASSO MÉDIO APONTAMENTO HORÍMETRO (DIAS)	-	REAL	<=3 ↓	3	1	6	2	2	7	1	3	2	4	1	2	1	4
	PREVENTIVAS ATRASADAS > 50H	-	TOTAL	0 ↓	22	0	0	0	3	5	0	5	0	6	1	0	0	2
OS	CUSTO MANUTENÇÃO	MÊS 10	TOTAL	100% ↓	123%	145%	96%	140%	130%	212%	174%	118%	82%	123%	98%	121%	78%	86%
	ORDENS DE SERVIÇO (2018)	S-1	ABERTAS	-	1571	85	121	80	84	14	110	108	86	154	207	169	133	135
ALS	AMOSTRAS DE ÓLEO SEMANAL CRÍTICAS	S-1	FECHADAS	-	1467	159	161	56	0	1	98	118	75	218	170	203	107	63
		S-1	BACKLOG	<=0% ↓	7%	-87%	-33%	30%	100%	93%	11%	-9%	13%	-42%	18%	-20%	20%	53%
		TOTAL	ABERTAS	↓	8583	157	1129	159	739	301	224	553	1023	1146	301	630	120	1607
AMOSTRAS CRÍTICAS EM ABERTO	S-1	CRÍTICAS	0 ↓	26	8	2	0	4	0	0	0	4	0	0	2	2	4	4
	S-1	REAL	<=10 ↓	15	16,4	8,8	-	12,3	10,0	31,0	25,0	19,4	19,0	10,1	11,0	9,4	11,9	
TOTAL	TOTAL	0 ↓	187	14	26	1	27	9	4	15	54	3	8	0	2	2	24	

Fonte: Dados internos da empresa, 2018.

Figura 16 - Painel Semanal completo 09/02/2020 à 15/02/2020.

PAINEL DE CONTROLE DE MANUTENÇÃO (ANÁLISE S-1)																		
PERÍODO → à 15/02/20 SEMANA→7																		
PILAR	ITENS DE CONTROLE	PERÍODO	PREV X REAL	META	PHS	BARRA MANSA	BELA VISTA DE MINAS	CARIACICA	DIVINOPOLIS	JECEABA	JUIZ DE FORA	MARABA	MORRO AGUDO	RESENDE	SAPUCAIA DO SUL	TIMOTEO	TRES MARIAS	VAZANTE
ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO	MANUTENÇÃO PREVENTIVA	S-1	REAL	85% ↑	82%	-	100%	100%	72%	71%	87%	99%	49%	99%	98%	99%	96%	96%
	MANUTENÇÃO PREDITIVA	S-1	REAL	85% ↑	71%	100%	100%	-	100%	0%	-	-	0%	100%	100%	-	-	-
	LAVAGEM	S-1	REAL	85% ↑	82%	100%	100%	94%	83%	67%	80%	100%	88%	-	65%	100%	96%	100%
	LUBRIFICAÇÃO	S-1	REAL	85% ↑	85%	100%	100%	86%	100%	100%	56%	100%	85%	98%	70%	100%	100%	100%
	ADERÊNCIA À PROGRAMAÇÃO SEMANAL - GERAL	S-1	REAL	85% ↑	82%	100%	100%	93%	89%	60%	74%	100%	55%	99%	83%	100%	97%	99%
GESTÃO	ATRASO MÉDIO APONTAMENTO HORIMETRO (DIAS)	-	REAL	<=3 ↓	2,5	2,6	2,6	3,7	2,2	1,6	2,6	1,4	2,1	2,9	2,6	2,7	2,5	1,8
	PREVENTIVAS ATRASADAS > 50H	-	TOTAL	0 ↓	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	CUSTO MANUTENÇÃO	COMPET.	TOTAL	100% ↓	59%	18%	100%	84%	39%	67%	86%	24%	93%	62%	50%	50%	42%	61%
OS S	ORDENS DE SERVIÇO - BACKLOG	S-1	REAL	<=0% ↓	-95%	-271%	-19%	4%	-67%	-5%	-152%	-36%	-35%	-38%	-210%	-211%	-224%	-159%
	TEMPO MÉD. FECHAMENTO (DIAS)	S-1	REAL	<=3 ↓	8	5	9	3	10	9	7	10	12	16	1	22	1	2
	ORDENS DE SERVIÇO - ABERTAS (INFERIOR SEM. ATUAL)	TOTAL	ABERTAS	↓	3801	2	557	299	417	221	89	322	320	248	91	321	9	422
PREDITIVAS	Δ RESULTADO (DATA RESULT. - DATA COLETA)	S-1	REAL	<=10 ↓	8	9	5	8	5	7	8	11	7	9	-	5	8	7
	Δ AÇÃO - RESULT AMOSTRAS CRÍTICAS	S-1	REAL	5 ↓	3,5	3,8	5,2	2,0	4,8	6,0	-	0,6	5,7	3,7	-	1,2	-	1,9
	Δ AÇÃO - RESULT AMOSTRA ANORMAIS/ATENÇÃO	S-1	REAL	15 ↓	9,6	6,9	-	11,0	10,0	4,9	8,0	4,9	10,7	10,9	9,2	3,2	6,9	2,2
	AMOSTRAS CRÍTICAS EM ABERTO (+5 DIAS)	ATUAL	TOTAL	0 ↓	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados internos da empresa, 2020.

As imagens acima expressam uma grande melhora principalmente no quesito de manutenções preditivas, além do desenvolvimento de 2 KPIs que passaram a integrar o painel que estão ligados ao tempo para se iniciar as tratativas a partir do resultado.

Com a integração, as amostras CRÍTICAS passaram a ser tratadas em 5 dias ou menos e amostras ANORMAIS/ATENÇÃO passaram a ser tratadas em 15 dias ou menos. O desenvolvimento do KPI em questão evidencia um fator que estava implícito para todas as unidades da empresa e a partir da integração, esse valor de “MÉDIA INTERVENÇÃO AÇÃO” passou a ser controlado como KPI gerencial.

Em suma, a integração do projeto trouxe ganhos significativos para as unidades operacionais, observou-se um aumento expressivo na abertura de ordens de serviço preditivas, acompanhado por uma melhoria consistente nos indicadores de qualidade da manutenção, refletindo maior confiabilidade e eficiência dos ativos conforme evidenciado nas figuras 17 e 18 abaixo.

Figura 17 – Números anterior à integração Filial VAZANTE e TIMÓTEO.

P0013 - Relatório de Serviços em Manutenções Preditivas (Sintético)								Pág: 1/1
<small>Filial: '01002','01016'            Data Geração: 01/01/2016 até 01/01/2019            Status Amostras: 'CRITICO','ATENCAO','ANORMAL'</small>								
FILIAIS	RESULTADO - INÍCIO INTERVENÇÕES						MÉDIA AÇÕES FILIAL	
	CRÍTICO		ATENÇÃO		ANORMAL			
	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)		
01002 - VAZANTE	7,00	11,55	6,00	23,53	36,00	30,05	26,61	
01016 - TIMÓTEO	6,00	16,30	2,00	23,25	17,00	24,53	22,45	
	<b>Total O.S's: 13</b>	<b>Média Geral: 13,9</b>	<b>Total O.S's: 8</b>	<b>Média Geral: 23,4</b>	<b>Total O.S's: 53</b>	<b>Média Geral: 27,3</b>	<b>24,5</b>	
FILIAIS	RESULTADO - FINAL INTERVENÇÕES						MÉDIA AÇÕES FILIAL	
	CRÍTICO		ATENÇÃO		ANORMAL			
	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)		
01002 - VAZANTE	7,00	12,75	6,00	23,56	36,00	30,08	26,80	
01016 - TIMÓTEO	6,00	16,38	2,00	23,29	17,00	24,56	22,49	
	<b>Total O.S's: 13</b>	<b>Média Geral: 14,6</b>	<b>Total O.S's: 8</b>	<b>Média Geral: 23,4</b>	<b>Total O.S's: 53</b>	<b>Média Geral: 27,3</b>	<b>24,6</b>	

Fonte: Dados internos da empresa, 2025.

Figura 18 – Números após a integração Filial VAZANTE e TIMÓTEO.

P0013 - Relatório de Serviços em Manutenções Preditivas (Sintético)								Pág: 1/1
<small>Filial: '01002','01016'            Data Geração: 01/01/2020 até 01/01/2023            Status Amostras: 'CRITICO','ATENCAO','ANORMAL'</small>								
FILIAIS	RESULTADO - INÍCIO INTERVENÇÕES						MÉDIA AÇÕES FILIAL	
	CRÍTICO		ATENÇÃO		ANORMAL			
	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Ini Mo - dat. Ger OS)		
01002 - VAZANTE	413,00	3,80	305,00	7,52	1.441,00	6,79	6,33	
01016 - TIMÓTEO	250,00	3,84	203,00	7,30	964,00	7,48	6,81	
	<b>Total O.S's: 663</b>	<b>Média Geral: 3,8</b>	<b>Total O.S's: 508</b>	<b>Média Geral: 7,4</b>	<b>Total O.S's: 2405</b>	<b>Média Geral: 7,1</b>	<b>6,6</b>	
FILIAIS	RESULTADO - FINAL INTERVENÇÕES						MÉDIA AÇÕES FILIAL	
	CRÍTICO		ATENÇÃO		ANORMAL			
	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)	Nº O.S's Encerradas	Média Intervenção Ação (dat. Fim Mo - dat. Ger OS)		
01002 - VAZANTE	413,00	3,86	305,00	7,54	1.441,00	6,82	6,36	
01016 - TIMÓTEO	250,00	3,87	203,00	7,32	964,00	7,50	6,83	
	<b>Total O.S's: 663</b>	<b>Média Geral: 3,9</b>	<b>Total O.S's: 508</b>	<b>Média Geral: 7,4</b>	<b>Total O.S's: 2405</b>	<b>Média Geral: 7,2</b>	<b>6,6</b>	

Fonte: Dados internos da empresa, 2025.

A comparação entre os períodos anterior e após à integração (margem de 3 anos) evidencia uma redução significativa no tempo médio de intervenção das ações, especialmente nos resultados de maior severidade. Essa melhoria indica maior agilidade na tomada de decisão, melhor priorização das demandas e aumento da eficiência operacional no tratamento das anomalias identificadas.

- Resultados Críticos: redução de 13,9 para 3,8 dias (72,7% de melhoria).
- Resultados em Atenção: redução de 23,4 para 7,4 dias (68,4% de melhoria).
- Resultados Anormais: redução de 27,3 para 7,1 dias (74,0% de melhoria).

Além disso, todos os resultados negativos (CRÍTICO, ATENÇÃO e ANORMAL) tiveram quedas percentuais no âmbito quantitativo, enquanto os bons resultados (NORMAIS) tiveram apenas aumento conforme Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Análise Amostrar de Óleo (2 anos de margem)

<b>Análise Amostras de Óleo GERAL</b>		
2016 a 2018	NORMAL	43,40%
	ANORMAL	32,30%
	ATENÇÃO	7,10%
	CRÍTICO	17,20%
2019	PERÍODO ADAPTATIVO	
2020 a 2023	NORMAL	53,90%
	ANORMAL	28,40%
	ATENÇÃO	3,90%
	CRÍTICO	13,80%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

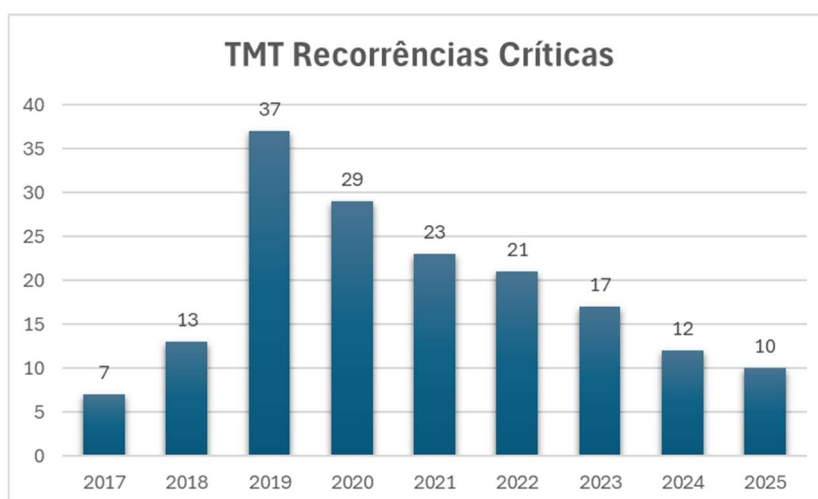
#### **4.2. Diminuição da reincidência de falhas críticas**

Um dos pontos principais referente ao recebimento dos resultados amostrais é a recorrência de criticidade, indicador que apresentou variação significativa ao longo do período analisado. A reincidência crítica é contabilizada a partir do terceiro resultado de criticidade consecutivo para um mesmo componente. Eventualmente, caso alguma intervenção seja realizada após a identificação de um resultado crítico e o componente passe a apresentar qualquer status diferente de crítico, a sequência é interrompida e a condição deixa de ser considerada uma reincidência crítica. Dessa forma, o status crítico com recorrência indica a presença de falhas crônicas no processo de manutenção, comprometendo a confiabilidade e a saúde dos ativos, bem como a efetividade das ações de manutenção preditiva (ISO 17359; 2018).

Nos anos iniciais da série histórica, especialmente em 2017 e 2018, o número de reincidências críticas registradas ainda se apresentava relativamente baixo

conforme Figuras 19 e 20. Esse comportamento pode ser explicado pelo estágio operacional de parte dos equipamentos, que ainda se encontravam em fases iniciais de utilização, com menor nível de desgaste acumulado e menor incidência de falhas recorrentes. Além disso, antes da implementação do projeto, havia precariedade tanto no volume das manutenções preditivas quanto na qualidade das avaliações e tratativas realizadas. Assim, embora processos de desgaste e contaminação estivessem evoluindo nos componentes, muitos desses problemas não eram devidamente identificados ou registrados de forma sistemática.

Figura 19 – Gráfico de recorrências críticas unidade Timóteo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 20 – Gráfico de recorrências críticas unidade Vazante.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com a inserção do projeto de integração das ordens de serviço preditivas em 2019, observou-se inicialmente um aumento considerável nas reincidências críticas durante o período adaptativo. Esse comportamento não indica necessariamente uma deterioração das condições operacionais, mas sim uma melhoria na capacidade de detecção, registro e acompanhamento das falhas. A partir do momento em que os resultados passaram a ser avaliados com maior rigor técnico e as intervenções começaram a ser registradas de forma estruturada, tornou-se possível identificar problemas que anteriormente permaneciam ocultos no processo de manutenção.

Apesar do cenário inicialmente adverso ao qual os equipamentos estavam submetidos, observa-se que, após o período adaptativo, o setor de manutenção foi capaz de corrigir falhas recorrentes por meio do desenvolvimento e amadurecimento do projeto. As atividades de manutenção passaram a ser executadas de forma mais estruturada e com maior frequência, o que contribuiu para o aumento da confiabilidade dos ativos. Após o pico de reincidências registrado no ano de 2019, foi possível observar uma redução linear e consistente, ano após ano, no número de reincidências críticas em ambas as unidades analisadas, evidenciando a eficácia de um processo sistemático de melhoria contínua aplicado à gestão da manutenção (Deming, 1986). Nesse contexto, os valores observados nos anos mais recentes, próximos aos registrados no início da série histórica, não representam uma regressão do processo, mas sim a estabilização do sistema de manutenção em um patamar mais controlado e tecnicamente consistente, mesmo considerando o envelhecimento natural dos equipamentos ao longo do tempo.

### **4.3. Impacto nos KPIs Operacionais**

#### **4.3.1. MTTR (Mean Time to Repair – Tempo Médio para Reparo)**

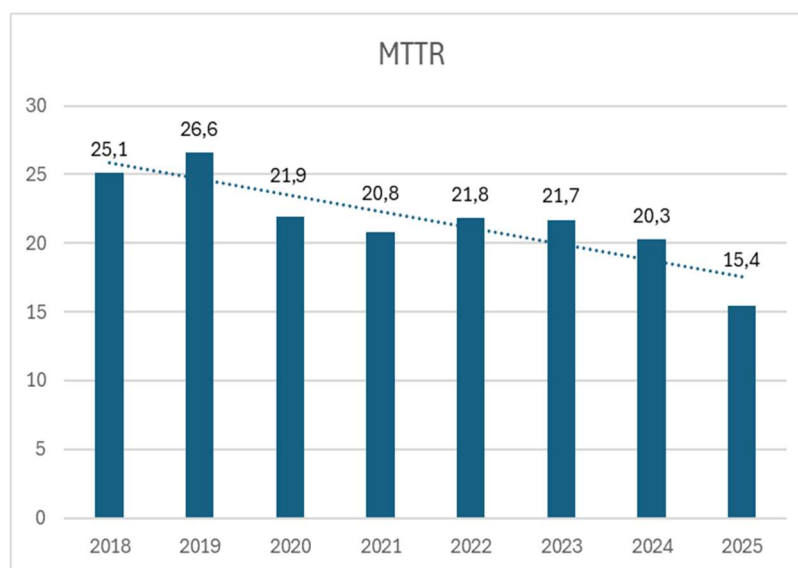
A análise do MTTR evidencia na figura 21 uma melhora no período de 2018 a 2020, quando o indicador reduziu de 25,1 horas para 21,9 horas, representando uma diminuição aproximada de 13% no tempo médio de reparo. Esse avanço está diretamente associado à evolução das estratégias de manutenção preditiva, bem como à estabilização dos processos após a integração automática dos sistemas de manutenção, que proporcionaram

diagnósticos mais rápidos, maior assertividade nas intervenções e melhor planejamento dos recursos necessários para as correções.

Embora o MTTR seja influenciado por múltiplos fatores — como logística de peças, capacitação técnica e complexidade das falhas — observa-se que a consolidação da manutenção preditiva contribuiu significativamente para a redução do tempo improdutivo, principalmente ao permitir a antecipação das falhas e a preparação prévia das equipes. A partir de 2020, o indicador apresenta comportamento linear e controlado, demonstrando a padronização e maturidade dos processos, culminando no menor valor da série histórica em 2025 (15,4 horas).

Segundo Wireman (2004), a redução sustentável do MTTR está diretamente ligada à eficiência dos processos de manutenção, ao uso de dados confiáveis e à integração entre operação e manutenção, reforçando a importância da automação e do monitoramento contínuo.

Figura 21 – MTTR 2018 a 2025.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

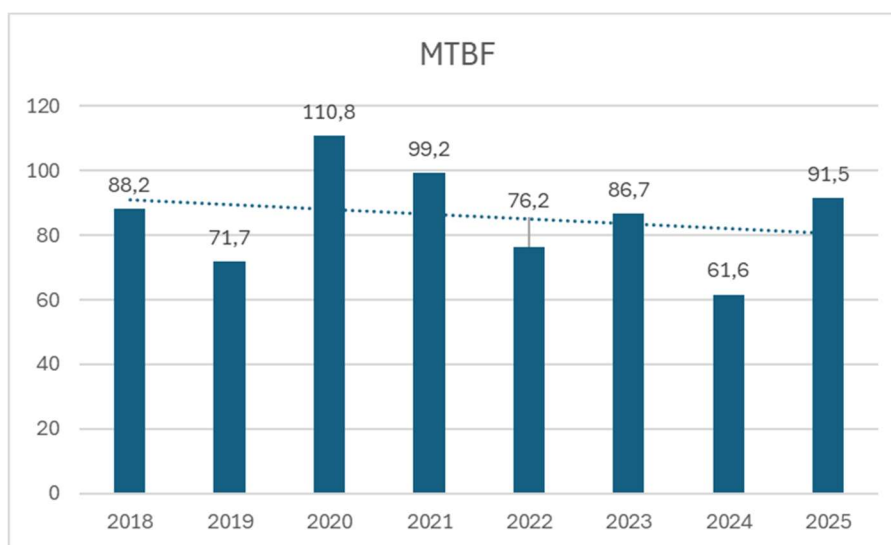
#### **4.3.2. MTBF (Mean Time Between Failures – Tempo Médio Entre Falhas)**

O indicador MTBF, que representa o tempo médio entre falhas, também apresenta evolução positiva na figura 22 entre 2018 e 2020, passando de 88,2 horas para 110,8 horas, o que evidencia um aumento da confiabilidade dos equipamentos nesse período. Esse comportamento indica que as falhas passaram a ocorrer com menor frequência, resultado esperado da ampliação do uso de técnicas preditivas, do monitoramento contínuo das condições dos componentes e da eliminação de falhas recorrentes.

Após o pico registrado em 2020, o MTBF passa a apresentar uma tendência geral de redução ao longo dos anos subsequentes, ainda que com oscilações pontuais. Essa queda gradual indica um aumento relativo na frequência de falhas quando comparado ao melhor desempenho da série, o que pode ser associado a fatores como o envelhecimento progressivo da frota, maior severidade operacional e possíveis limitações na sustentação das ações de confiabilidade ao longo do tempo. Embora ocorram recuperações temporárias, como em 2021 e 2023, o comportamento global do indicador é compatível com a linha de tendência descendente observada no gráfico, evidenciando desafios na manutenção dos níveis máximos de confiabilidade atingidos anteriormente.

Em 2025, observa-se uma recuperação parcial do MTBF, alcançando 91,5 horas, valor superior ao registrado em 2024, porém ainda abaixo do patamar máximo obtido em 2020. Esse resultado sugere uma retomada pontual da eficácia das ações de manutenção e confiabilidade, mas reforça a necessidade de estratégias adicionais para reverter a tendência de longo prazo, especialmente no que se refere à gestão do ciclo de vida dos ativos e à mitigação de falhas associadas ao desgaste estrutural dos equipamentos.

Figura 22 – MTBF 2018 a 2025.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

#### 4.3.3. Disponibilidade Física (DF)

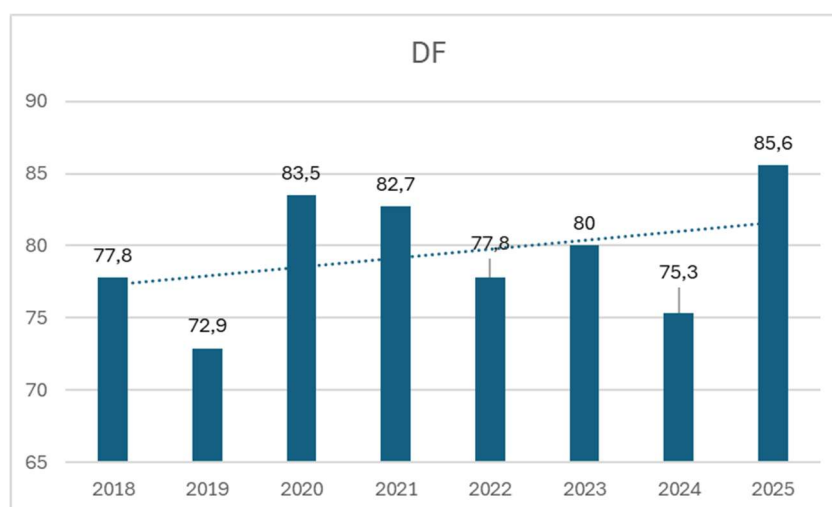
A Disponibilidade Física (DF) reflete na figura 23 de forma integrada os efeitos combinados da confiabilidade (MTBF) e da manutenibilidade (MTTR) sobre a capacidade operacional da frota. Observa-se que, entre 2018 e 2020, a DF apresentou um crescimento expressivo, passando de 77,8% para 83,5%, evidenciando avanços relevantes na eficiência dos processos de manutenção. Esse período coincide com a consolidação de práticas mais estruturadas de monitoramento e planejamento das intervenções, contribuindo para a redução de indisponibilidades e maior previsibilidade operacional.

Nos anos seguintes, embora ocorram oscilações pontuais nos valores anuais, a linha de tendência do indicador permanece consistentemente crescente, indicando uma evolução estrutural da disponibilidade ao longo do tempo. Esse comportamento demonstra que, mesmo diante de variações operacionais, envelhecimento da frota e mudanças no regime de uso dos equipamentos, a organização conseguiu sustentar e ampliar os níveis globais de disponibilidade, refletindo a maturidade dos processos de manutenção e a atuação integrada entre manutenção preditiva, planejamento e operação.

Em 2025, a DF atinge 85,6%, o maior valor de toda a série histórica, reforçando a efetividade das ações implementadas e confirmando que os ganhos obtidos não foram pontuais, mas sim progressivos e cumulativos, conforme evidenciado pela tendência ascendente do gráfico. Esse resultado indica que os esforços voltados à gestão por indicadores e à integração dos sistemas de manutenção contribuíram diretamente para a melhoria contínua da capacidade operacional da frota.

Segundo Kardec e Nascif (2016), a disponibilidade física é fortemente influenciada pela confiabilidade e pela manutenibilidade dos ativos, sendo fundamental a análise conjunta de MTTR e MTBF para a obtenção de resultados consistentes. Nesse contexto, a evolução positiva da DF observada ao longo da série reforça a importância de estratégias integradas de manutenção orientadas por dados e indicadores de desempenho.

Figura 23 – Disponibilidade Física 2018 a 2025.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Cabe destacar, por fim, que a disponibilidade operacional real da frota é, na prática, superior aos valores de Disponibilidade Física (DF) apresentados, uma vez que a operação conta com equipamentos reserva, os quais são contratualmente disponibilizados e custeados pelo cliente. Esses equipamentos absorvem parte das indisponibilidades dos ativos principais, contribuindo para a continuidade da operação. Do ponto de vista dos indicadores, tais equipamentos impactam diretamente os valores de MTBF e MTTR, uma vez que influenciam o comportamento das falhas e dos tempos de intervenção do sistema como um

todo, porém não são considerados no cálculo da DF, que se restringe aos ativos monitorados no escopo do projeto.

Dessa forma, o valor de DF apresentado neste estudo representa uma abordagem conservadora e metodologicamente controlada, adotada intencionalmente para manter a coerência com os objetivos do projeto e permitir uma análise comparativa consistente ao longo da série histórica. O eventual aumento da disponibilidade global proporcionado pelos equipamentos reserva foi, portanto, deliberadamente desconsiderado, assegurando que os resultados obtidos reflitam exclusivamente os ganhos decorrentes da evolução dos processos de manutenção e da integração dos sistemas analisados.

#### **4.4. Aplicação da melhoria contínua na rotina dos colaboradores**

A implementação do projeto não promoveu apenas melhorias técnicas nos processos de manutenção, mas também contribuiu significativamente para uma evolução cultural entre os colaboradores envolvidos nas atividades operacionais e de manutenção. À medida que os resultados passaram a demonstrar uma tendência consistente de melhoria, com redução das reincidências críticas e maior controle sobre as condições dos componentes, observou-se um aumento no comprometimento das equipes com a correta execução das manutenções e com o cumprimento dos procedimentos estabelecidos. Esse comportamento está alinhado ao conceito de confiabilidade organizacional, no qual o desempenho dos ativos está diretamente relacionado ao engajamento, à disciplina operacional e à participação ativa das pessoas envolvidas no processo de manutenção (Mobley, 2002).

Esse processo de amadurecimento cultural pode ser associado à lógica da melhoria contínua representada pelo ciclo PDCA apresentado na Figura 29. Inicialmente, na etapa de planejamento (Plan), são estabelecidas as diretrizes e estratégias para melhoria do processo de manutenção, como ocorreu com a implementação do projeto de integração das ordens de serviço preditivas. Na fase de execução (Do), essas práticas passam a ser incorporadas às rotinas operacionais, permitindo que os colaboradores apliquem os novos métodos de análise, acompanhamento e intervenção nos equipamentos. Em seguida, na

etapa de verificação (Check), os resultados obtidos são avaliados por meio de indicadores de desempenho, como os índices de recorrências críticas analisados neste estudo, permitindo identificar se as ações implementadas estão produzindo os efeitos esperados. Por fim, na etapa de ação (Act), as práticas que demonstram maior eficácia são padronizadas e incorporadas definitivamente aos processos organizacionais, consolidando melhorias e promovendo novos ciclos de aperfeiçoamento (Deming, 1986).

Figura 24 – Ciclo de melhoria contínua.



Fonte: Nonato, Livia (2024).

Nesse contexto, quando os colaboradores conseguem visualizar, por meio dos resultados obtidos e dos indicadores monitorados, que a execução adequada das intervenções e o correto tratamento das anomalias geram impactos diretos na confiabilidade dos equipamentos, cria-se um senso maior de responsabilidade e pertencimento em relação ao processo de manutenção. Assim, a melhoria contínua deixa de ser apenas uma diretriz institucional e passa a fazer parte do comportamento cotidiano das equipes, fortalecendo uma cultura organizacional orientada à confiabilidade dos ativos, à disciplina operacional e à sustentabilidade dos resultados alcançados ao longo do tempo.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou, de forma aplicada, os impactos da integração automática das avaliações tribológicas aos sistemas de gestão da manutenção, com foco nos ganhos operacionais, organizacionais e econômicos gerados pelo projeto. A solução mostrou-se eficaz ao eliminar etapas manuais, aumentar o número de Ordens de serviço e intervenções realizadas, aumentar a agilidade no fluxo de informações, diminuir as reincidências críticas, contribuir com o desenvolvimento de KPIs operacionais, e, principalmente, contribuir com o impacto cultural positivo dos colaboradores, juntamente ao desenvolvimento de processos de melhoria contínua.

A integração também promoveu avanços significativos na padronização e na qualidade das informações técnicas, reduzindo inconsistências nos registros, melhorando a rastreabilidade das falhas e diminuindo a subjetividade nas intervenções. Como resultado, as ordens de serviço passaram a ser abertas com critérios técnicos mais consistentes, fortalecendo a integração entre manutenção preditiva, planejamento e operação, além de elevar a confiabilidade dos dados utilizados na gestão dos ativos.

Do ponto de vista econômico, embora a quantificação direta da economia gerada apresente elevada complexidade devido à influência de fatores como regime operacional, manutenção preventiva e envelhecimento da frota, a análise das reformas de componentes de maior valor agregado e relevância estratégica para a empresa, nas unidades de Timóteo e Vazante — como motores, transmissões e diferenciais — indica que, a prevenção da falha de um único componente crítico é suficiente para amortizar integralmente o investimento, mesmo sem a mensuração precisa desse valor, tal fato expressa ao final de cada ano bons resultados econômicos.

Os indicadores de desempenho analisados ao longo da série histórica apresentam evolução positiva, com destaque para a melhoria da Disponibilidade Física e a redução dos tempos de intervenção, evidenciando ganhos de eficiência operacional e maior previsibilidade das manutenções. Esses resultados reforçam que as ações implementadas contribuíram de forma

consistente para a melhoria do desempenho global da frota ao longo do período avaliado, corroborando o entendimento de que a utilização sistemática de informações de condição e a integração dos dados aos processos de manutenção são fundamentais para a redução de falhas, otimização de recursos e aumento da confiabilidade dos ativos, conforme destacado por Mobley (2002).

Além dos ganhos técnicos e operacionais, destaca-se também a evolução cultural observada entre os colaboradores envolvidos nas atividades de manutenção e operação. A maior disponibilidade de informações, associada à melhoria dos indicadores e à maior visibilidade dos resultados obtidos, contribuiu para fortalecer o comprometimento das equipes com a execução adequada das manutenções e com o cumprimento dos procedimentos estabelecidos. Nesse contexto, a utilização sistemática de dados técnicos e indicadores de desempenho passou a orientar de forma mais consistente as tomadas de decisão, promovendo maior senso de responsabilidade, disciplina operacional e engajamento dos profissionais no processo de melhoria contínua da manutenção. Essa transformação cultural consolida um ambiente organizacional mais orientado à confiabilidade dos ativos e à sustentabilidade dos resultados alcançados ao longo do tempo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Mário Flores. **A Importância e Aplicabilidade da Manutenção Preditiva Dentro do Ambiente Industrial**. Gestão Industrial, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3895/S1808-04482008000200001>. Acesso em: 28 fev. 2025.

AIKO DIGITAL. **O que é manutenção preditiva?** 2026. Disponível em: <https://aiko.digital/o-que-e-manutencao-preditiva/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ALS. **O caminho das amostras ALS**. Mundo ALS. 2026. Disponível em: <https://mundoals.com/o-caminho-das-amostras-als/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

APERAM abre 67 vagas de estágio em Minas Gerais. Timóteo: APERAM, 2011. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/aperam-abre-67-vagas-de-estagio-em-minas-gerais/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118403259>. Acesso em: 28 fev. 2025.

COUTINHO, Paulo. **Gestão estratégica da manutenção: conceitos, metodologias e aplicações**. São Paulo: Atlas, 2020.

DEBSHAW, B. **Enhancing equipment performance: The role of oil analysis and particle counting**. 2024. Disponível em: <https://machinerylubricationindia.com/magazine/2024/jan-feb/enhancing-equipment-performance-the-role-of-oil-analysis-and-particle-counting/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

DEMING, W. Edwards. **Out of the Crisis**. Cambridge: MIT Press, 1986.

DHILLON, B. S. **Engineering Maintenance: A Modern Approach**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

DIFFUSION OF TRANSVERSE CORRELATIONS AND SHEAR VISCOSITY IN HEAVY ION COLLISIONS. Qun Wang (王群) Univ of Sci & Tech of China (中国科技大学) With L.G.Pang, X.N.Wang, R.Xu. Disponível em: <https://slideplayer.com/slide/7362125/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

DUARTE, Matheus Rufato. **Análise de falhas em mancais de rolamento de um redutor de velocidade industrial**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/13036/1/matheusrufatoduarte.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ENGEMAN® - SOFTWARE DE MANUTENÇÃO - CMMS. Engeman. 2018. Disponível em: <https://engeman.com.br/pt-br/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

FERREIRA, L. A. **A importância da Tribologia para a manutenibilidade no projeto de novos equipamentos**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2005. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/71674>. Acesso em: 28 fev. 2025.

GULATI, Ramesh. **Maintenance and Reliability Best Practices**. 2. ed. Nova York: Industrial Press, 2012. Disponível em: [https://books.google.com/books/about/Maintenance\\_and\\_Reliability\\_Best\\_Practices.html?id=igFCp-nz1n8C](https://books.google.com/books/about/Maintenance_and_Reliability_Best_Practices.html?id=igFCp-nz1n8C). Acesso em: 28 fev. 2025.

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**. 2. ed. New York: CRC Press, 2004.

HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Philip. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2025**. Brasília: IBRAM, 2026. Disponível em: <https://ibram.org.br>. Acesso em: 28 fev. 2025.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório anual 2025**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025. Disponível em: <https://acobrasil.org.br>. Acesso em: 28 fev. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines**. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9001:2015 – Quality management systems — Requirements**. Geneva: ISO, 2015.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2016.

KOCH, T. **Lubrication and Lubricant Analysis**. 2. ed. CRC Press, 2009.

KOTHAMASU, R.; HUANG, S. H.; VERDUIN, W. H. **System health monitoring and prognostics: a review of current paradigms and practices**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 28, n. 9, p. 1012-1024, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2131-6>. Acesso em: 28 fev. 2025.

LUCIANO-ABECOM, Bruno. **O que é tribologia? Qual a sua importância na lubrificação mecânica?** 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/tribologia/>. Acesso em: 9 mar. 2026.

MIRANDA, W. **A Curva P-F e a Manutenção Preditiva**. 2021. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/curva-p-f-e-manutenc%C3%A7%C3%A3o-preditiva-wederley-m-miranda/>.

MOBLEY, R. K. **Maintenance Engineering Handbook**. 6. ed. McGraw-Hill, 2002.

MONTEIRO, Laercio. **Ferrografia**. 2016. Disponível em: <https://www.mmtec.com.br/ferrografia/>. Acesso em: 9 mar. 2026

MOUBRAY, John. **Reliability-centered maintenance**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.

NEALE, M. J.; COWGILL, G. **Condition monitoring and diagnostics of machines**. London: Chapman & Hall, 1997.

NOMUS. **Manutenção preditiva: o que é, vantagens e como aplicar na indústria**. Nomus Blog, 2024. Disponível em: <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/manutencao-preditiva/>. Acesso em: 7 mar. 2026.

NONATO, Livia. **Ciclo de melhoria contínua: o que é, 4 pilares e benefícios**. Gestão da Inovação e Estratégia - Blog AEVOAEVO, 11 jul. 2024.

PARIDA, Aditya; KUMAR, Uday. **Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 12, n. 3, p. 239–251, 2006.

PREDPONTA MANUTENÇÃO PREDITIVA. **Predponta manutenção preditiva**. 2025. Disponível em: <https://www.predponta.com.br/site/pages/confiabilidade>. Acesso em: 9 mar. 2026

S360 - Log in ALS. **S360**. 2025. Disponível em: <https://s360web.com/>. Acesso em: 9 mar. 2026

SILVA, J. R.; PEREIRA, L. A. **Integração de sistemas e automação de dados na gestão da manutenção industrial**. Revista Brasileira de Engenharia de Produção, v. 9, n. 2, p. 45-58, 2023.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2015.

SMITH, Anthony M.; HINCHCLIFFE, Glenn R. **RCM: gateway to world class maintenance**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

SMITH, Ricky; HAWKINS, Bruce. **Lean Maintenance: Reduce Costs, Improve Quality, and Increase Market Share**. Burlington: Butterworth-Heinemann / Elsevier, 2004.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering tribology**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

TÜV RHEINLAND. **Industrial services for steel and metal industry**. Cologne: TÜV Rheinland, 2024. Disponível em: <https://www.tuv.com/world/en/steel-and-metal-industry.html>. Acesso em: 9 mar. 2026

WESTCOTT, V. C. **Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication**. 2. ed. New York: CRC Press, 2004.

WIREMAN, Terry. **Benchmarking Best Practices in Maintenance Management**. New York: Industrial Press, 2004.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World steel in figures 2021**. Brussels: World Steel Association, 2021. Disponível em: <https://worldsteel.org/publications/bookshop/world-steel-in-figures-2021/>. Acesso em: 9 mar. 2026

XENOS, Harilaus Georgius D'Philippos. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. 2. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014.