



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

JORDAN KAUÃ DE OLIVEIRA SIQUEIRA

**ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DE INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA EM
UMA INDÚSTRIA MINERADORA**

TUCURUÍ-PA

2025

JORDAN KAUÃ DE OLIVEIRA SIQUEIRA

**ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DE INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA EM
UMA INDÚSTRIA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do campus universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Dr. Fernando Nunes da Silva

TUCURUÍ-PA

2025

JORDAN KAUÃ DE OLIVEIRA SIQUEIRA

**ESTUDO DE CASO DA APLICAÇÃO DE INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA EM
UMA INDÚSTRIA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do campus universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva

Data de aprovação: 14/03/2025.

Conceito: Excelente.

Banca examinadora:

Orientador (a): Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Examinador (a) interno: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Examinador (a) externo: Prof. Dr. Nicolás Matheus da Fonseca Tinoco de Souza Araújo
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

TUCURUÍ-PA

2025

Dedico a conclusão deste trabalho aos meus pais, irmãos, familiares e amigos, bem como a todos que me apoiaram e acreditaram em mim ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

O percurso até a conclusão deste curso e a elaboração deste trabalho foram marcados pela colaboração de muitas pessoas, às quais expresso aqui minha mais profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Jerry Dennys e Suzany Regina, pelo apoio incondicional ao longo desta jornada e pelo incentivo ao caminho da educação, que me proporcionaram desde a infância.

Aos meus irmãos, Jarley Deylon e Joshua Kaê, sou imensamente grato pelo suporte e encorajamento para alcançar meus objetivos.

Minha avó, Gladys Soares, merece um agradecimento especial por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio inestimável em cada etapa dessa trajetória.

Ao meu tio, Glacio Windridge, pelos conselhos e pelo apoio prestado em inúmeras ocasiões enquanto eu estava longe de casa.

Sou também profundamente grato às amizades que construí ao longo do curso e a todos que compartilharam essa caminhada comigo, pela parceria, pelo apoio e pelas palavras de incentivo.

Aos colegas de trabalho do meu estágio, que foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto que originou este trabalho.

Aos demais familiares e amigos, ainda que não mencionados individualmente, expresso meu sincero reconhecimento por suas contribuições diretas e indiretas para esta conquista.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Nunes da Silva, pela dedicação exemplar e pelo acompanhamento atento durante meses, oferecendo todo o suporte necessário para a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, que, por meio de seus ensinamentos e dedicação, possibilitaram que eu chegasse até aqui, concluindo esta importante etapa da minha formação.

Por fim, minha gratidão à Universidade Federal do Pará – Campus Tucuruí pela excelente formação acadêmica proporcionada aos seus alunos, e à cidade de Tucuruí-PA, que me acolheu ao longo desses anos e pela qual guardarei um carinho imenso.

RESUMO

O funcionamento eficiente das máquinas é essencial para as indústrias, exigindo técnicas de manutenção para monitoramento e reparo. Este estudo analisou os impactos da implementação de inspeções sensitivas mecânicas no departamento de manutenção corretiva, em uma indústria de mineração. Utilizando a pesquisa-ação, foram realizados acompanhamentos e ajustes das inspeções. Também foram tratados e analisados dados das árvores de falhas a partir da implementação das inspeções. Os resultados destacam a redução da subjetividade nas atividades, diminuição de 67% nas falhas mecânicas e 79% no tempo de parada em equipamentos críticos, como bombas centrífugas. A análise da curva PF (*Potential Failure Curve*) demonstrou que a detecção precoce de anomalias evita aumentos exponenciais nos custos de manutenção. Conclui-se que inspeções sensitivas são essenciais para a confiabilidade operacional, recomendando-se sua ampliação e integração com tecnologias preditivas.

Palavras-chave: inspeção de equipamentos; manutenção industrial; confiabilidade de equipamentos; manutenção preditiva.

ABSTRACT

The efficient operation of machinery is essential for industries, requiring maintenance techniques for monitoring and repair. This study analyzed the impacts of implementing sensitive mechanical inspections in the corrective maintenance department of a mining industry. Using action research, the inspections were monitored and adjusted. Fault tree data from the implementation of the inspections was also processed and analyzed. The results show a reduction in subjectivity in activities, a 67% reduction in mechanical failures and a 79% reduction in downtime in critical equipment such as centrifugal pumps. Analysis of the PF curve (Potential Failure Curve) showed that early detection of anomalies avoids exponential increases in maintenance costs. The conclusion is that sensitive inspections are essential for operational reliability, and it is recommended that they be expanded and integrated with predictive technologies.

Keywords: equipment inspection; industrial maintenance; equipment reliability; predictive maintenance.

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS	9
METODOLOGIA	11
PLANOS DE INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA (PADRONIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO).....	12
METODOLOGIA 5W2H.....	13
ESTRUTURA DO DOCUMENTO	15
MATRIZ DE CRITICIDADE	17
ANÁLISE DAS ÁRVORES DE FALHAS	19
ANÁLISE DA DETECÇÃO DE ANOMALIA	19
RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
ANÁLISE TÉRMICA.....	21
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	22
ANÁLISE DE DADOS (ÁRVORE DE FALHAS).....	23
CORREIAS TRANSPORTADORAS.....	23
BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	24
ANÁLISE DE IMPACTOS ECONÔMICOS E OPERACIONAIS	26
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
REFERÊNCIAS.....	29

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A mineração é um processo industrial que consiste na pesquisa, exploração, extração e beneficiamento de recursos minerais da terra. Esses recursos são a base para a maioria das indústrias fabricarem os produtos e infraestruturas que sustentam a economia global e a vida cotidiana das pessoas, tornando-se uma prática indispensável para o desenvolvimento socioeconômico do mundo (Agência Nacional de Mineração, 2024).

Especialmente dentro da mineração, tem-se

um cenário competitivo onde a mecanização e a automatização das indústrias tornaram-se um fator de sobrevivência, as máquinas transformaram-se em um dos recursos produtivos principais para o sucesso de uma organização, onde é essencial o bom funcionamento de todo sistema produtivo. Para que isso ocorra, é necessário que todas as partes que integram o sistema (máquinas, equipamentos, ferramentas dentre outros) executem de maneira eficiente e da forma esperada a função que lhes é designada. (Rezende; Gomes, 2016, p. 1).

Porém, as máquinas que compõe os sistemas das indústrias possuem um processo de degradação inevitável com o funcionamento ao longo do tempo, sendo necessário intervenções para manutenção (Wang; Wang; Qi, 2014). Segundo Ramos (2015), a manutenção consiste na adoção de medidas cabíveis para a conservação e preservação das funcionalidades de determinado equipamento, garantindo assim a disponibilidade do mesmo para produção.

O processo de deterioração das máquinas é comum e ocorre de várias causas como, fadiga, choques inesperados, desalinhamentos, excesso de temperatura, altos níveis de vibrações, entre outros. Dessa forma, podendo impactar diretamente na produtividade da máquina e qualidade dos processos, desencadeando maiores custos de manutenção (Toazza; Sellitto, 2015; Wang; Wang; Qi, 2014). Portanto, as indústrias devem possuir um sistema de manutenção robusto para garantir a confiabilidade e bom funcionamento dos equipamentos, obtendo, dessa forma, sucesso na produção.

Dentro desse cenário e das diversas técnicas de manutenção, tem-se a inspeção sensitiva que se destaca como uma técnica fundamental para um sistema de manutenção industrial, na qual se utiliza dos sentidos humanos para detecção de falhas em equipamentos de uma maneira precoce. Embora a inspeção sensitiva seja uma excelente técnica de manutenção, pode possuir limitações e desvantagens, como exemplo a subjetividade das avaliações, pois os sentidos humanos de cada inspetor podem variar. Além disso, há uma certa dependência de experiência por parte dos inspetores para identificação de possíveis anomalias nos equipamentos, pois

inspetores que já conhecem o funcionamento de determinado equipamento, conseguem diagnosticar qualquer adversidade com mais facilidade.

Diante disso, podemos criar medidas para mitigar essas limitações, como através da criação de planos de inspeções, padronizando e estruturando dessa forma as atividades de inspeções, de modo que os inspetores tenham um único procedimento padrão, servindo como um guia para aprendizado e melhoria contínua, aumentando assim a qualidade das avaliações (Ramos, 2015). Além dos planos, pode-se utilizar para redução da subjetividade, instrumentos de medições práticos para realizar rápidos monitoramentos, potencializando assim a eficácia na detecção das falhas.

No estudo de caso, com o contínuo aprimoramento da manutenção na planta industrial de uma mineradora no estado do Pará, a análise dos indicadores de manutenção revelou uma redução significativa das atividades corretivas. Como resultado, observou-se momentos ociosos da equipe de manutenção corretiva. Isso gerou oportunidades para realocar essa equipe durante os períodos de inatividades.

Para otimizar os momentos ociosos, a gerência de engenharia e manutenção implementou rotas de inspeções sensíveis mecânicas operacionais periódicas para as equipes de manutenção corretiva realizarem durante os momentos oportunos (ausência de emergências), visando auxiliar a manutenção na planta, aumentando sua robustez. No entanto, as primeiras inspeções eram realizadas sem um procedimento padrão de rota e mostraram-se bastante subjetivas.

Com isso, foi necessário aprimorar essas inspeções nas áreas do beneficiamento e descarga do minério. No trabalho, é argumentado sobre a importância e os efeitos da criação de rotas e planos de inspeções sensíveis mecânicas, especialmente para as indústrias de mineração, como forma de aumentar a previsibilidade das falhas, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. Esse estudo tem como objetivo analisar os benefícios da criação e implementação das inspeções, explorando toda a metodologia utilizada para a criação, incluindo a padronização das atividades através do procedimento de rota (*check list*) e definição de parâmetros de avaliação, como análise térmica e vibração.

Os tópicos que norteiam esse estudo são: Quais são os principais componentes de um plano de inspeção sensível eficiente? Como a padronização e parametrização das inspeções podem impactar na detecção precoce de falhas? Quais são os impactos econômicos e operacionais da adoção de rotas de inspeção sensíveis para essas indústrias? As respostas para

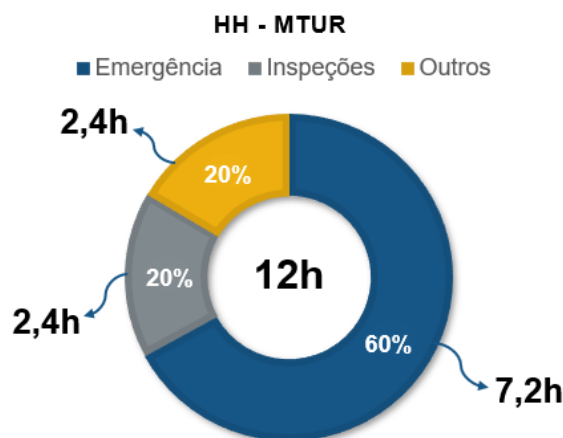
essas perguntas fornecerão informações valiosas para a melhoria das práticas de manutenção na indústria de mineração, promovendo operações mais seguras e eficientes.

METODOLOGIA

O procedimento de pesquisa foi a pesquisa-ação, esse tipo de pesquisa baseia-se em trabalhos e processos já existentes, visando buscar melhorias, aplicando e testando propostas de pesquisas, empregando métodos apropriados e realizando uma análise do conhecimento já disponível (French, 2009). Nesse método de pesquisa, o conhecimento é gerado ao se resolver um problema prático durante uma atividade de campo, envolvendo objetivos e obstáculos reais (Tripp, 2005).

No presente artigo, foi realizado um estudo de caso da implementação e aperfeiçoamento de inspeções sensitivas mecânicas no departamento de manutenção corretiva. O departamento de manutenção corretiva (MTUR - Manutenção de turno) é composto por equipes de mecânicos industriais e eletricitas que estão disponíveis 24 horas por dia para atender emergências, sendo 12 horas de trabalho por turno. Dentro do fluxo de trabalho há momentos de “*stand by*”, nos quais ficam no aguardo de chamados emergenciais. Com a estratégia de implementação das rotas de inspeções sensitivas, a gerência de engenharia de manutenção destinou 20% (duas horas) dentro do HH (Indicador de Homem-hora) (Figura 1) das equipes de manutenção corretiva para realizarem as inspeções sensitivas.

Figura 1 - HH departamento de manutenção corretiva



Fonte: Autoria própria.

PLANOS DE INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA (PADRONIZAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO)

Para a criação desse projeto, foi mobilizado todo o time do departamento, incluindo mecânicos, supervisor, coordenadores, estagiário e superintendente da área, para acompanhamento e ajustes necessários.

Na elaboração dos seguintes planos, juntamente com o departamento de manutenção preditiva, foi realizado um levantamento de todos os planos de inspeções sensitivas existentes na empresa, especificamente na área de beneficiamento e descarga do minério, a fim de utilizá-los como base. Dessa forma, buscou-se aproveitar o conhecimento já existente sobre o assunto para desenvolver um novo procedimento, buscando melhorias e atualizações que sejam aplicáveis à realidade da equipe de manutenção corretiva.

Realizou-se, juntamente com a equipe de inspeção da manutenção preditiva, a execução de todas as rotas dos planos já existentes, a fim de compreender o procedimento utilizado por eles, as áreas envolvidas e as instalações dos equipamentos. A partir disso, com o auxílio de especialistas, foi possível realizar um levantamento in loco dos ativos de cada rota e identificar quais equipamentos e seus componentes são mais críticos para a produção. Além disso, foi conduzido um estudo normativo e prático para determinar os parâmetros ideais de funcionamento e inspeção dos principais equipamentos que compõem as rotas, entre eles: motores, redutores, bombas centrífugas, mancais e rolamentos.

A partir dessas ações, foi possível parametrizar e padronizar as rotas de inspeções sensitivas mecânicas para a equipe de manutenção corretiva, com a criação de um documento padrão, de modo que o mantenedor, ao realizar a verificação completa do equipamento, disponha das informações necessárias para avaliar seu estado com maior eficiência e assertividade. Além disso, as rotas estarão descritas para que todas as equipes (turnos) possam aplicá-las da mesma forma, evitando verificações distintas ou qualquer esquecimento.

Após a finalização, esses planos de rota foram repassados para os coordenadores, para, posteriormente, treinarem os mecânicos responsáveis pela execução das inspeções.

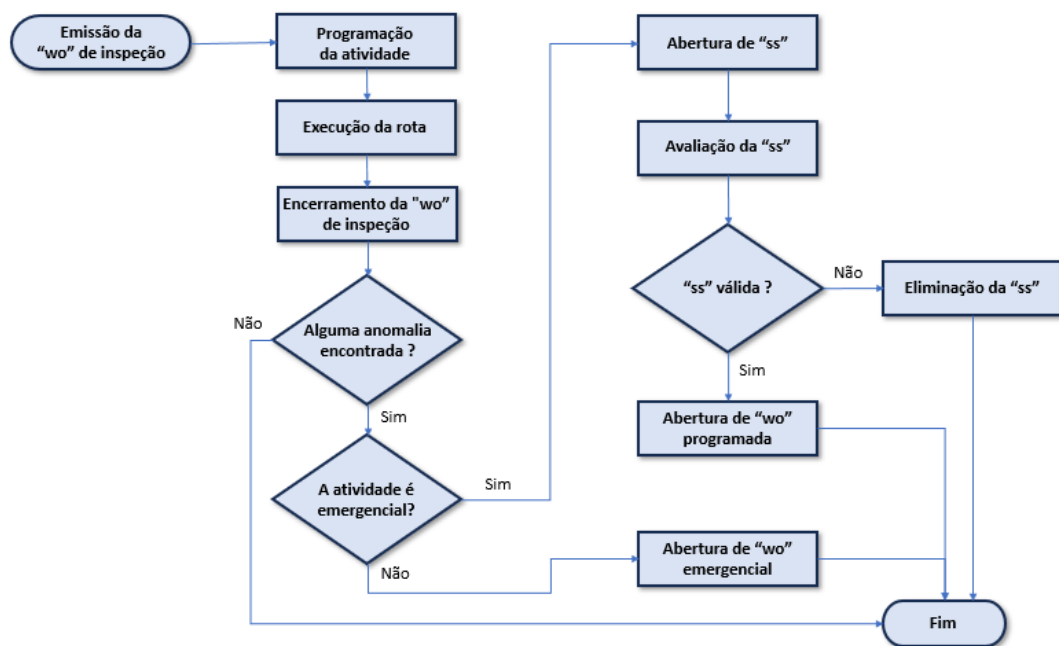
As rotas de inspeções sensitivas são programadas no sistema da empresa para serem aplicadas com a periodicidade de 7 dias, portanto, uma vez por semana, as WO's (*Work's Orders* - ordens de serviços) de inspeções sensitivas no beneficiamento e descarga do minério são geradas para as equipes de manutenção corretiva aplicarem. Com os procedimentos de inspeções criados, a proposta é que esses documentos sejam inseridos no sistema e anexados juntos às suas devidas ordens de serviços de inspeções, para que no momento da emissão dessas

atividades, esses procedimentos de inspeções sejam gerados como *workpack* (pacote de trabalho) e sejam disponibilizados para serem utilizados nas rotas.

Diante disso, os mantenedores irão realizar as rotas de inspeções para as áreas designadas, e em casos de detecção de alguma anomalia ou não conformidade, deveram abrir uma SS (solicitação de serviço) para situações não graves que possam passar por uma programação de manutenção, ou abrir uma WO, para situações mais graves onde devem intervir de forma imediata, executando a atividade. Ao executar a WO de inspeção, o inspetor pode anexar o *checklist* na WO antes do seu fechamento, para registro da atividade no sistema.

Portanto, as ordens de serviços de inspeções sensitivas e suas aplicações devem obedecer ao seguinte fluxograma de processos, ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do processo das inspeções sensitivas



Fonte: Autoria própria.

METODOLOGIA 5W2H

Os planos de inspeção foram estruturados com a elaboração de *checklists* destinados a servir como procedimentos padrão para a realização das inspeções em cada área específica a ser avaliada. Para a construção desses *checklists*, foi empregada a metodologia 5W2H, visando garantir maior detalhamento e padronização dos processos envolvidos.

Segundo o IMBS (2018), a metodologia 5W2H é uma ferramenta de planejamento eficiente, organizada e de fácil aplicação, composta por etapas claramente definidas. Seu nome

ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Para esses documentos de inspeção, foi realizado uma reformulação do modelo padrão utilizado pelo departamento de preditiva da empresa, com intuito de compactar o documento e facilitar seu manuseio. Esse modelo foi desenvolvido pelo estagiário do departamento de manutenção corretiva, utilizando o software Excel, em forma de planilha. É composto por instruções e procedimentos de segurança internos da empresa para a realização das atividades de inspeções, folha de inspeção (*checklist*) e parâmetros de avaliação. Todas as folhas contam com cabeçalhos (Quadro 1) que trazem dados de criação do documento, título da rota, frequência de aplicação, campos de assinatura de data e responsáveis pelas aplicações das rotas para controle e instruções de uso desses documentos.

Quadro 1 – Cabeçalho do checklist

	ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO PLANOS DE MANUTENÇÃO	ELABORADO POR: JORDAN K. DE O. SIQUEIRA	DATA DE EXECUÇÃO:
		DATA DO DOCUMENTO: 20/02/2024	REV. 00
7D INSPEÇÃO SENSITIVA MECANICA SEMANAL NA USINA (631B)		TIPO: INSPEÇÃO SENSITIVA MECÂNICA	FREQUÊNCIA: 7D
		CONDIÇÃO: PARADO ()	OPERANDO (X)
Nº DA ATIVIDADE: (ATIVIDADE DO SISTEMA)			
<u>ORIENTAÇÕES:</u> CONDIÇÃO: NÍVEL CRÍTICO: OK-CONFORME A – BAIXA CRITICIDADE N/OK-NÃO CONFORME B - MÉDIACRITICIDADE N/A - NÃO SE APLICA C - ALTA CRITICIDADE		<u>ACÕES:</u> OUTRAS OPORTUNIDADES VISTAS DURANTE A INSPEÇÃO, DEVERÃO SER RELATADAS E ENCAMINHADAS AO PLANEJADOR DO CENTRO OPERACIONAL, COM SUAS DEVIDAS ORDENS DE SERVIÇO DE ACOMPANHAMENTO.	ASSINATURA DO EXECUTANTE 1: _____ ASSINATURA DO EXECUTANTE 2: _____

Fonte: Autoria própria.

A página dos procedimentos das rotas (*checklist*) é onde o mantenedor irá dispor das orientações sobre qual equipamento, o que e como deverá ser inspecionado, reunindo as informações necessárias para todos os equipamentos da rota de inspeção a ser realizada. Em alguns casos, imagens, ilustrações ou desenhos técnicos dos equipamentos estão inseridos junto às respectivas instruções de inspeção, facilitando sua identificação.

Os checklists possuem campos específicos para preenchimento, incluindo o campo de “Condição”, que apresenta as seguintes opções: “OK” (condição normal), “N/OK” (condição anormal) e “N/A” (não aplicável), de acordo com a análise da condição do equipamento ou de

seu componente. Na coluna seguinte, há o campo “Críticidade”, que deve ser preenchido caso seja identificada alguma anormalidade no equipamento ou componente, permitindo a definição do risco que essa anomalia pode representar para seu funcionamento. Esse campo pode ser classificado como: “A” (baixa críticidade), “B” (média críticidade) e “C” (alta críticidade).

Por fim, a última coluna contém o campo “Observações”, destinado a cada equipamento avaliado. Esse espaço deve ser utilizado para registrar informações ou relatos sobre anormalidades identificadas durante as inspeções, garantindo o detalhamento da anomalia e evitando o esquecimento de informações relevantes.

A Figura 5 ilustra um exemplo de parte do modelo de checklist desenvolvido para correias transportadoras.

Figura 5 – Modelo do checklist

DESCRIÇÃO DA TAREFA							
ÁREA DE CARREGAMENTO	CONDIÇÃO			CRITICIDADE			OBSERVAÇÕES
	OK	N/OK	N/A	A	B	C	
							
VERIFICAR VISUALMENTE NA FIXAÇÃO DAS GUIAS LATERAIS SE NÃO HÁ FALTA DE PARAFUSOS OU DE SUPORTES DA GUIA;							
VERIFICAR VISUALMENTE SE NÃO HÁ DESGASTES EXCESSIVOS NAS GUIAS LATERAIS;							
VERIFICAR VISUALMENTE SE NÃO HÁ FUGA DE MATERIAL PELAS GUIAS LATERAIS;							
VERIFICAR VISUALMENTE CONDIÇÃO DA MESA DE IMPACTO (SE NÃO HÁ FALTA DE PARAFUSOS, TORQUEAMENTO DOS PARAFUSOS E FIXAÇÃO DAS CHAPAS);							
VERIFICAR VISUALMENTE SE NÃO HÁ VAZAMENTO NOS CHUTES;							
VERIFICAR VISUALMENTE SE OS CHUTES ESTÃO BEM FIXADOS (SEM FALTA DE PARAFUSOS E TORQUEAMENTO).							

Fonte: Autoria própria.

Para complementar o *checklist*, foram adicionadas ao documento páginas contendo parâmetros destinados a serem utilizados durante as inspeções. Esses parâmetros têm como objetivo fornecer suporte com informações de análise nas inspeções e à tomada de decisões. Com a inclusão desses critérios, espera-se alcançar a padronização das avaliações, minimizar a ocorrência de erros e oferecer apoio a inspetores com menor experiência, permitindo que consultem no próprio documento as informações essenciais para os processos de avaliação.

MATRIZ DE CRITICIDADE

A matriz de criticidade, de forma lógica, mostra quais são os equipamentos mais críticos para a operação, e conseqüentemente suas prioridades no processo em que o desenvolvimento do trabalho de planejamento e controle da manutenção será realizado de forma mais assertiva, consciente e rápida (Moura, 2018, p.33).

Ainda na visão de Moura (2018), uma empresa é constituída por uma cadeia de ativos, sendo cada um responsável por contribuir para a geração de retorno financeiro. Nesse contexto, os ativos englobam uma ampla variedade de equipamentos, cada qual desempenhando um papel específico e possuindo sua importância relativa em relação aos níveis de criticidade.

No entanto, em relação aos níveis de criticidade, não há uma norma ou regra universalmente estabelecida para a construção da matriz de criticidade dos equipamentos. Em vez disso, utiliza-se um processo de avaliação de riscos, que tem início com a identificação dos eventos de risco. Esses eventos são analisados considerando duas dimensões principais: a consequência associada ao evento e sua probabilidade de ocorrência (Dutra, 2019).

Porém, segundo Leal, Pedraça e Santana (2020) a criticidade abrange diversas variáveis e setores distintos, tornando essencial não apenas a intuição sobre a ocorrência de falhas, mas também uma verificação técnica. Esse processo garante uma tomada de decisão mais precisa e embasada. Dinamox (2019) apresenta alguns métodos estruturados que podem contribuir para o mecanismo de ação, utilizando um sistema de classificação de máquinas com base na gravidade das falhas ocorridas, a saber:

1. Segurança: Equipamentos de alto risco, como prensas e guilhotinas, podem representar sérios perigos à integridade física dos operadores caso apresentem falhas.

2. Qualidade do produto: Máquinas responsáveis por processos de alta precisão são sensíveis a desalinhamentos mínimos, os quais podem comprometer a qualidade final dos produtos fabricados.

3. Impacto na produção: A ocorrência de falhas em equipamentos considerados gargalos no processo produtivo pode afetar significativamente a produtividade da empresa. Em casos mais graves, essas falhas podem resultar na interrupção completa das operações, tornando esse critério fundamental na análise de criticidade.

4. Confiabilidade da máquina (MTBF): Esse critério se baseia no indicador *Mean Time Between Failures* (MTBF), que mede o tempo médio entre falhas consecutivas de um equipamento, permitindo avaliar sua confiabilidade operacional.

5. Tempo de reparo (MTTR): Utiliza-se o indicador *Mean Time to Recovery* (MTTR), que representa o tempo médio necessário para substituir ou reparar um componente defeituoso, além do período requerido para que a máquina retome suas operações normais.

6. Custos de manutenção: Refere-se aos gastos associados à recuperação de uma máquina em caso de falha. Esses custos variam conforme a gravidade do problema e a necessidade de reposição de peças. Além disso, equipamentos importados podem gerar despesas ainda mais elevadas devido à complexidade logística e ao alto custo das peças de reposição.

Portanto, a matriz se trata da proporção entre a probabilidade de alguma falha acontecer e nível de criticidade do equipamento. Foi criada a seguinte matriz (Figura 6) para auxiliar na tomada de decisões dos inspetores ao avaliarem os equipamentos durante as rotas, podendo determinar se situações são emergenciais ou não. Além de avaliações gerais, a matriz de criticidade também foi utilizada como base para criação e utilização de parâmetros para análises de vibrações e térmicas.

Figura 6 - Matriz de criticidade

MATRIZ DE CRITICIDADE		IMPACTO PARA OPERAÇÃO				
		INSIGNIFICANTE	BAIXO	MÉDIO	ALTO	CRÍTICO
PROBABILIDADE	QUASE CERTA	ACEITÁVEL	TOLERÁVEL	INTOLERÁVEL	INTOLERÁVEL	INTOLERÁVEL
	ALTA	ACEITÁVEL	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	INTOLERÁVEL	INTOLERÁVEL
	MÉDIA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	TOLERÁVEL	INTOLERÁVEL	INTOLERÁVEL
	BAIXA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	TOLERÁVEL	TOLERÁVEL	INTOLERÁVEL
	RARA	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	ACEITÁVEL	TOLERÁVEL

Fonte: Alterada de Ministério dos transportes (2021).

ANÁLISE DAS ÁRVORES DE FALHAS

Para analisar o comportamento das falhas mecânicas e o tempo de paralisação decorrente dessas falhas em equipamentos da indústria em questão, após a implementação das inspeções sensitivas mecânicas nas atividades da equipe de manutenção corretiva, foram utilizados históricos de árvores de falhas de anos anteriores, considerando o período a partir da adoção das inspeções.

As inspeções sensitivas mecânicas foram implementadas no departamento de manutenção corretiva em 2021, e a criação dos planos de manutenção teve início em 2023. Dessa forma, foram analisadas as árvores de falhas referentes ao período de janeiro de 2021 a dezembro de 2024. A partir desses registros, foram extraídos dados sobre o número total de falhas mecânicas e o tempo total de paralisação associado a essas falhas, organizados anualmente dentro do período estudado.

Para uma análise mais detalhada, foi realizada uma investigação específica do número de falhas mecânicas e das horas paradas em sistemas e equipamentos que integram as rotas de inspeções sensitivas da equipe de manutenção corretiva, como, por exemplo, correias transportadoras e bombas centrífugas.

No entanto, é importante destacar que, além das correias transportadoras e bombas centrífugas, diversos outros sistemas e equipamentos fazem parte das rotas de inspeção da equipe, sendo eles: Britadores, peneiras vibratórias, lavadores giratórios, empilhadeiras, retomadora de minério e entre outros.

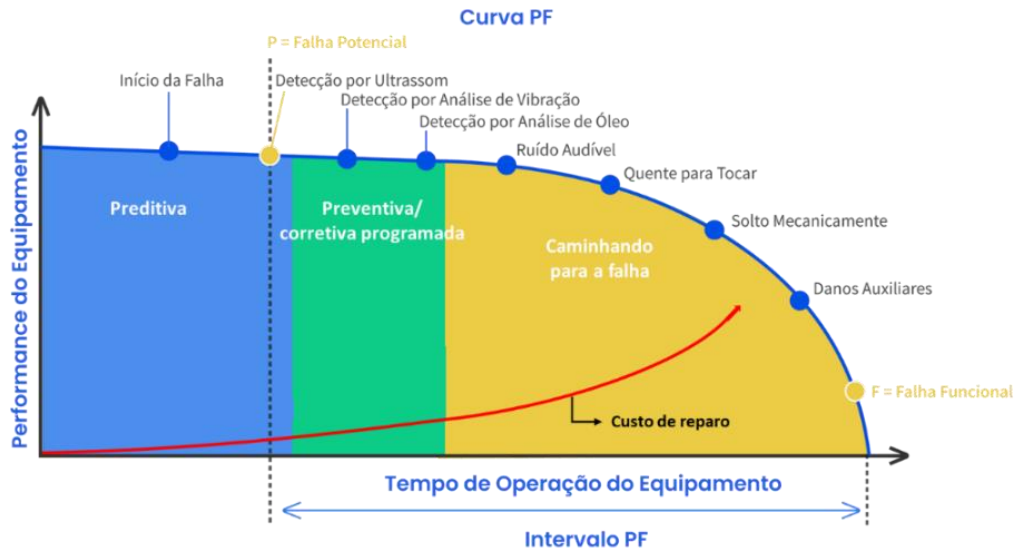
ANÁLISE DA DETECÇÃO DE ANOMALIA

Como forma de estudar os possíveis impactos econômicos e operacionais da adoção das rotas de inspeções sensitivas, foi utilizado um registro real de detecção de anomalia durante o acompanhamento das inspeções da equipe. Posteriormente, para realização desse estudo, foram aplicados os conceitos da curva PF (*Potential Failure Curve*), executando uma análise das causas que poderiam ocorrer a partir dessa anomalia (falha potencial) e avaliando os impactos que o avanço dessas falhas podem causar para a manutenção e operação da indústria.

Segundo Cyrino (2025) a curva PF (Figura 7), é um gráfico utilizado como ferramenta essencial em estratégias de manutenção centradas na confiabilidade. Esse permite visualizar a progressão das falhas em máquinas, equipamentos e componentes, além de auxiliar na identificação de medidas preventivas para evitar falhas completas.

Ainda na visão de Cyrino (2025) o conceito de PF refere-se a dois pontos críticos: o ponto P, que representa o início de uma falha potencial, e o ponto F, que marca o início da falha funcional. Entre esses estágios, as falhas tornam-se detectáveis, proporcionando uma janela de oportunidade para intervenções que evitem a deterioração completa do sistema.

Figura 7 – Curva PF



Alterado de TRACTIAN (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre os principais benefícios do desenvolvimento de planos para inspeções sensíveis mecânicas, temos o aumento da produtividade da mão de obra, pois momentos ociosos foram preenchidos com atividades de inspeções. Além disso, assim como nos resultados do trabalho de Rezende e Gomes (2016), também se destacam a redução da subjetividade nas atividades de inspeção. A elaboração desses planos permitiu a padronização e a parametrização das atividades de inspeção, estabelecendo um procedimento uniforme para todos os turnos. Isso não apenas minimiza o risco de esquecimentos durante as rotas, mas também proporciona um registro formal das atividades realizadas, que pode ser utilizado como ferramenta de controle gerencial.

Além de tudo, os modelos de *checklists* foram revisados e otimizados, tornando sua aplicação mais prática e eficiente. Um exemplo disso é o documento padrão para inspeção de empilhadeiras de minério realizada pela equipe de preditiva. O *checklist* original, que tinha 15 páginas, foi reformulado para atender às necessidades da equipe de corretiva, resultando em um

documento mais compacto, com apenas seis páginas, incluindo duas dedicadas a parâmetros de avaliação anexados.

Esses parâmetros incluem instruções específicas para análises de vibração e temperatura, possibilitando ao inspetor uma consulta rápida em caso de dúvidas. Essa abordagem não apenas auxilia no diagnóstico preciso das condições do equipamento, mas também reduz a margem para erros, beneficiando tanto inspetores menos experientes quanto os mais experientes. Portanto, os *checklists* e os parâmetros associados configuram-se como ferramentas essenciais para a melhoria contínua dos processos de inspeção sensitiva.

Como parâmetros, foram utilizadas as seguintes técnicas: Análise térmica e análise de vibração.

ANÁLISE TÉRMICA

Para análise térmica, foi desenvolvida a tabela de condições por faixa de temperatura (Figura 8), para os principais equipamentos que compõe as rotas, baseando-se em algumas normas (SKF, 2012) de equipamentos em questão e parâmetros já utilizados nas avaliações pelo departamento de preditiva da empresa.

A instrumentação empregada pela equipe nas coletas consiste em um termômetro digital infravermelho (pirômetro), que possibilita a obtenção rápida e eficiente de leituras de temperatura em equipamentos. Esse dispositivo apresenta a vantagem de medir a temperatura de componentes de difícil acesso, uma vez que utiliza tecnologia de laser, permitindo medições à distância do ponto focal sem a necessidade de contato direto.

Figura 8 - Parâmetros da condição de operação por temperaturas

Equipamento	Componente	Classe de isolamento	Temperatura de operação (C°)		
			Normal	Alerta	Intolerável
Motor elétrico	Enrolamento (Bobina)	Classe A	< 80	≥ 80	105
		Classe E	< 95	≥ 95	120
		Classe B	< 105	≥ 105	130
		Classe F	< 130	≥ 130	155
		Classe H	< 155	≥ 155	180
	Carcaça (Centro)	Todas	< 45	45 - 50	> 50
	Mancal	Todas	≤ 70	70 - 95	> 95
Retutor (Óleo mineral)	Carcaça (Inferior)	Todas	≤ 75	75 - 85	≥ 90
	Mancal	Todas	≤ 70	70 - 95	≥ 95
Bombas	Mancal	Todas	≤ 70	70 - 80	≥ 90
Caixa de mancal (Graxa)	Rolamento (Esferas)	Todas	≤ 70	70 - 95	≥ 95
	Rolamento (Rolos)	Todas	≤ 75	75 - 100	≥ 100

Obs: Para motores, um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento, pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade.

Obs2: Para mancais, em aplicações onde a pista interna do rolamento gira, a caixa de mancal é tipicamente 5 °c (9 °f) mais fria que a pista externa do rolamento e 10 °c (18 °f) mais fria que a pista interna.

Fonte: Autoria própria.

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Como parâmetro para as análises de vibração, foram inseridas tabelas normativas que apresentam as condições operacionais dos equipamentos com base nos níveis de vibração. Considerando as medições para a unidade de velocidade (RMS), foi utilizada a tabela representada pela Figura 9. Essa tabela segue as diretrizes da norma ISO 10816-3.

Figura 9 - Parâmetros de vibração para velocidade em RMS

INTOLERÁVEL								10 - 1000 Hz > 600 rpm		VELOCIDADE
								2 - 1000 Hz > 120 rpm		
TOLERÁVEL								11	0,44	
								7,1	0,28	
SATISFATÓRIO								4,5	0,18	
								3,5	0,11	
BOM								2,8	0,07	
								2,3	0,04	
BOM								1,4	0,03	
								0,71	0,02	
								mm/s RMS	in/s RMS	
Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível	FUNDAÇÃO		
EX: BOMBAS > 15 KW H - V - A				MÁQUINAS MÉDIAS 15 KW < P < 300 KW		GRANDES MÁQUINAS 300 KW < H < 50 MW		TIPO DE MÁQUINA		
ACIONAMENTO INTEGRADO		ACIONAMENTO EXTERNO		EX: MOTORES 160 MM < H < 315mm		EX: MOTORES 315mm < H				
CLASSE IV		CLASSE III		CLASSE II		CLASSE I		CLASSE DA MÁQUINA		

■	INTOLERÁVEL
■	TOLERÁVEL
■	SATISFATÓRIO
■	BOM

Fonte: Alterada da ISO 10816-3 (2022).

Para as medições realizadas na unidade de envelope de aceleração (GE), foi utilizada a tabela representada pela Figura 10. Essa tabela segue os parâmetros da SKF.

Figura 10 - Parâmetros de vibração para envelope de aceleração (GE)

ACELERAÇÃO ENVELOPE (GE)				
Range recomendado		Diâmetro do eixo entre 200 e 500mm	Diâmetro do eixo entre 50 e 300mm	Diâmetro do eixo entre 20 e 150mm
500Hz	1000Hz	Rotação < 500 RPM	Rotação entre 500 e 1800 RPM	Rotação entre 1800 e 3600 RPM
0,75	1	NORMAL	NORMAL	NORMAL
1,5	2	TOLERÁVEL		
3,5	4	INTOLERÁVEL	TOLERÁVEL	
7,5	10		INTOLERÁVEL	TOLERÁVEL
> 7,5	> 10			INTOLERÁVEL

Fonte: Alterado de SKF (2009).

Nas coletas e análises dessas técnicas de vibração a equipe utiliza um modelo de coletor global de vibração, que possui funções para a medição da velocidade de vibração em RMS e do envelopamento de aceleração em G (GE). Esse equipamento proporciona uma leitura rápida e de fácil utilização, permitindo, assim, uma aplicação eficiente na inspeção sensível.

ANÁLISE DE DADOS (ÁRVORE DE FALHAS)

A implementação das inspeções sensíveis para a equipe de manutenção corretiva desempenhou um papel fundamental na melhoria contínua da manutenção na planta industrial. A aplicação dessa estratégia permitiu o amparo em resultados significativos, como a redução do número total de falhas mecânicas e diminuição das horas de parada, nos ativos. Como consequência, espera-se uma melhoria na produtividade da indústria e uma redução dos custos de manutenção.

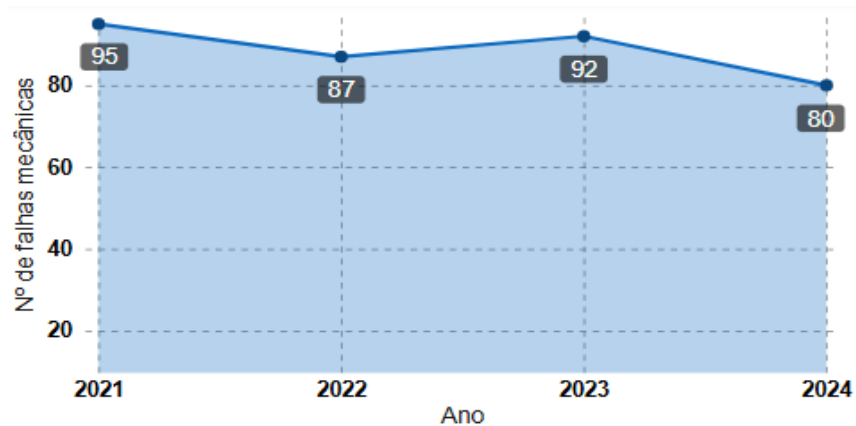
Esses resultados são demonstrados pela gestão de controle de ativos da engenharia e manutenção, que, através de indicadores baseados na árvore de falhas, possibilita a visualização e o acompanhamento dos dados. Entre esses indicadores, destacam-se gráficos que mostram a evolução do número total de falhas e total de horas paradas associadas a essas falhas ao longo dos anos, proporcionando uma análise precisa do desempenho da manutenção na planta.

A partir do tratamento desses dados, foi possível elaborar gráficos e conduzir análises por equipamentos específicos (correias transportadoras e bombas centrífugas), obtendo-se os seguintes resultados:

CORREIAS TRANSPORTADORAS

O estudo do Gráfico 1, relativo ao número total de falhas mecânicas em correias transportadoras demonstrou uma redução ao longo dos anos. Verificou-se uma diminuição de 95 falhas em 2021 para 80 falhas em 2024, representando uma redução de aproximadamente 16% no período.

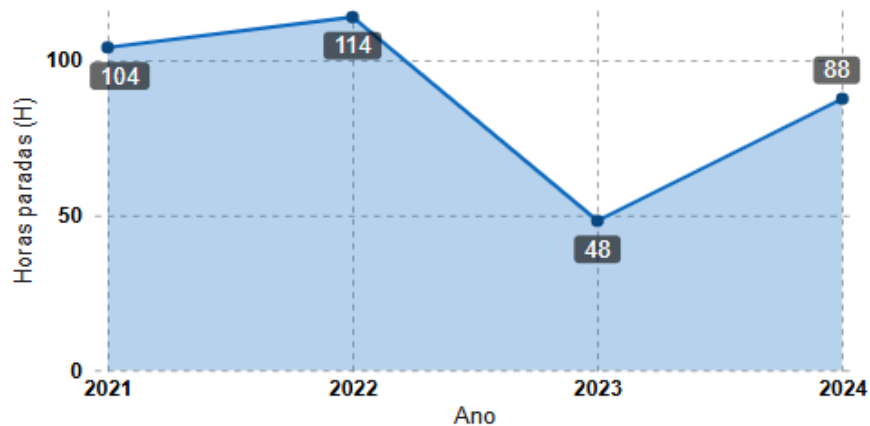
Gráfico 1 - Análise de falhas mecânicas em correias transportadoras



Fonte: Autoria própria.

Para o Gráfico 2, que se refere às horas paradas devido a falhas mecânicas em correias transportadoras, também foi verificado uma redução ao longo dos anos. Observou-se a diminuição de 104 horas em 2021 para 88 horas em 2024, o que representa uma redução de aproximadamente 15% no período.

Gráfico 2 - Análise de horas paradas por falhas mecânicas em correias transportadoras

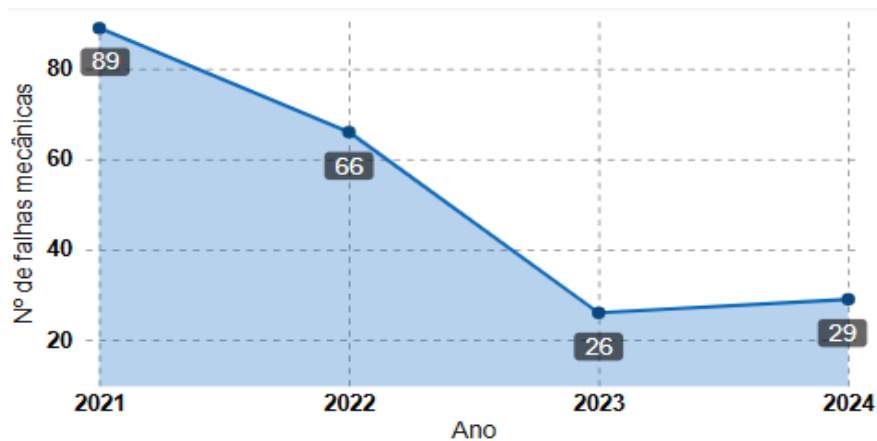


Fonte: Autoria própria.

BOMBAS CENTRÍFUGAS

Na observação do Gráfico 3, que apresenta o número de falhas mecânicas em bombas centrífugas, percebe-se uma redução significativa ao longo dos anos. Portanto, observou-se uma diminuição de 89 falhas em 2021 para 29 falhas em 2024, representando uma redução de aproximadamente 67% no período.

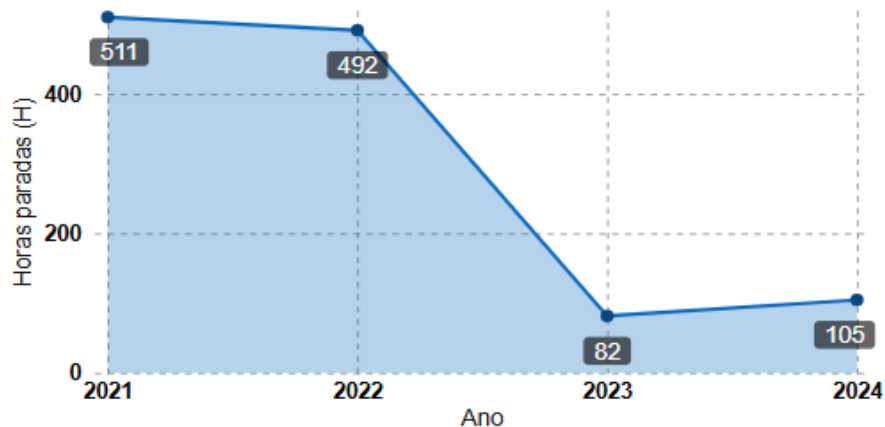
Gráfico 3 - Análise de falhas mecânicas em bombas centrífugas



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 4 é referente ao total de horas paradas devido a falhas mecânicas em bombas centrífugas e também demonstrou uma redução significativa ao longo dos anos. Sendo possível observar uma diminuição de 511 horas em 2021 para 105 horas em 2024, representando uma redução de aproximadamente 79% no período.

Gráfico 4 - Análise de horas paradas por falhas mecânicas em bombas centrífugas



Fonte: Autoria própria.

Diante da análise dos gráficos de horas de paralisação dos equipamentos específicos incluídos nas rotas de inspeções sensíveis da equipe de manutenção corretiva, observa-se um resultado semelhante ao estudo de Rezende e Gomes (2016), no qual também foram registradas

reduções significativas nas horas de parada na indústria após a implementação de inspeções sensitivas.

ANÁLISE DE IMPACTOS ECONÔMICOS E OPERACIONAIS

Como resultados da pesquisa dos impactos econômicos e operacionais da aplicação das rotas de inspeções sensitivas, a partir do acompanhamento da execução de rotas de inspeções, foi possível utilizar como exemplo para análise o registro de uma identificação de acúmulo de material (minério) no rolete de carga em um transportador de correia (Figura 11), na área de empilhamento do minério.

Figura 11 - Acúmulo de minério no rolete de carga em um transportador de correia

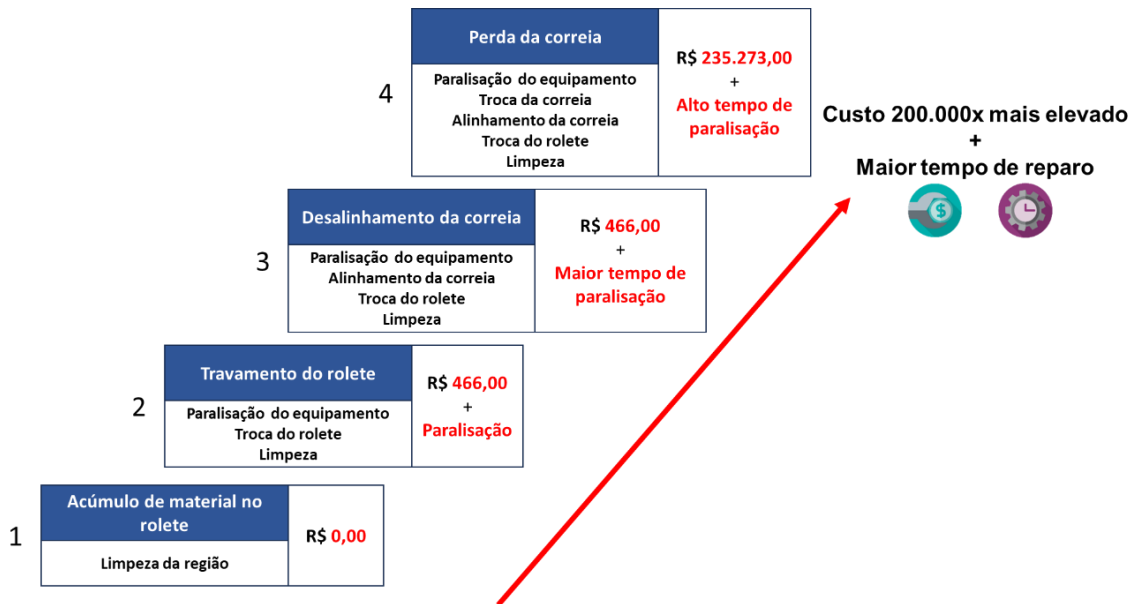


Fonte: Autoria própria.

Com base nisso, realizou-se um estudo idealizando possíveis progressões de falhas a partir da anomalia encontrada no transportador de correia, na qual foi o acúmulo de material no rolete de carga.

Na Figura 12, é apresentado um intervalo PF a partir da situação inicial identificada nas inspeções, ilustrando a possível evolução das falhas potenciais em um transportador de correia até o momento da falha funcional (perda da correia). Também evidencia como o avanço das falhas potenciais são proporcionais aos aumentos de custos de manutenção, e em alguns casos, proporcionais ao aumento do tempo de reparo do equipamento.

Figura 12 - Análise PF idealizada a partir da anomalia encontrada



Fonte: Adaptado de TRACTIAN.

Para esse estudo, foram considerados, de forma quantitativa, apenas os custos dos componentes (rolete de carga e correia) desse equipamento em questão para a empresa. Porém o tempo de paralisação também pode gerar custos para empresa, como exemplo os custos de diminuição de produção. Além do tempo de paralisação, existem os custos relacionados ao tempo de utilização de mão de obra.

Portanto, analisando o estudo dessa progressão de falha, verifica-se que, devido à identificação e correção dessa anomalia em estágios iniciais pela equipe, pode-se ter evitado um aumento de aproximadamente até 200.000 vezes nos custos de manutenção, além de evitar maiores tempos de paralisação para esse caso em específico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo de caso teve como objetivo principal analisar os efeitos da criação, implementação e aprimoramento de inspeções sensitivas mecânicas para a equipe de manutenção corretiva como forma de auxiliar a manutenção em uma planta industrial de mineração. Dentre os principais resultados, destaca-se:

A criação e aprimoramento dos planos de inspeção sensitiva mecânica, que demonstraram ser uma estratégia fundamental para a melhoria da execução dessas atividades. A padronização e parametrização das inspeções reduziram a subjetividade do processo, garantindo maior confiabilidade e eficiência na identificação de anomalias. Além disso, a

otimização dos *checklists* contribuiu para uma abordagem mais prática e sistemática, facilitando a condução das inspeções e a tomada de decisões baseadas em dados concretos.

Os resultados obtidos a partir da análise dos indicadores em um período de quatro anos, desde a implementação das inspeções sensitivas para o time de manutenção corretiva, evidenciaram impactos positivos para a manutenção na planta. Observou-se reduções de 16% no número total de falhas mecânicas e 15% em horas de paralisações por falhas mecânicas em correias transportadoras. Já para bombas centrífugas, notou-se reduções de 67% no número total de falhas mecânicas e 79% em horas de paralisações devido a falhas mecânicas. Essa tendência reforça a importância das inspeções sensitivas na mitigação de falhas e na preservação da integridade dos ativos.

Utilizando uma identificação de anomalia pela equipe e aplicando os conceitos da curva PF, permitiu uma avaliação dos impactos econômicos e operacionais das inspeções sensitivas. O estudo de caso envolvendo a identificação de acúmulo de material no rolete de carga de um transportador de correia demonstrou que a detecção precoce de falhas potenciais pode resultar em economias significativas. A correção dessa anomalia pode ter evitado um aumento exponencial nos custos de manutenção, além de prevenir paradas não planejadas que poderiam comprometer a produtividade da indústria.

Dessa forma, conclui-se que as inspeções sensitivas mecânicas, desempenham um papel essencial auxiliando na melhoria da manutenção industrial, proporcionando mais confiabilidade e segurança para a operação dos equipamentos. A continuidade do aprimoramento dessas inspeções, aliada ao uso de ferramentas preditivas para monitoramento de falhas potenciais, contribuirá para a evolução dos processos da indústria e para a redução dos custos operacionais a longo prazo. Recomenda-se, portanto, a ampliação dessas práticas na indústria, bem como a integração com novas tecnologias de monitoramento preditivo, garantindo uma abordagem cada vez mais eficiente e inovadora na manutenção.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Exploração mineral**. Gov.br. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/exploracao-mineral>. Acesso em: 11 de junho de 2024.
- DUTRA, Jhonata Teles. **Planejamento e controle de manutenção descomplicado**: Uma metodologia passo a passo para a implantação do PCM. Brasília-DF: ENGETELES, 2019.
- INTEGRATED MANAGEMENT BUSINESS SOLUTIONS – IMBS. **Metodologia dos 5W2H**. imbs.pt, Lisboa, fev. de 2018. Disponível em: <http://imbs.pt/wpcontent/uploads/2018/02/Metodologia-5W2H.pdf>. Acesso em: 18/11/2023.
- INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 10816-3**: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. 1º edição. Switzerland: ISO, 2022.
- CYRINO, Luis. **Curva PF**: como usar na manutenção?. TRACTIAN.com, São Paulo, 27, jan. de 2025. Disponível em: <https://tractian.com/blog/curva-pf>. Acesso em: 13/02/2025.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Matriz de criticidade**. Gov.br, 19 dez. de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/governanca-estrategia-e-riscos/eixos-da-governanca/gestao-de-riscos/metodologia-de-avaliacao-de-riscos/matriz-de-criticidade>. Acesso em: 20/12/24.
- MOURA, Gilberto Junior. **Aplicação do planejamento e controle da manutenção em uma fábrica de cimento**. Begé: Universidade Federal do Pampa, 2018.
- RAMOS, Fabio Lima. **Planejamento e controle da manutenção aplicado à indústria Farmacêutica**: um estudo de caso da implantação de sistema de inspeção de rota. Fortaleza/CE: Universidade Federal do Ceará, 2015.
- REZENDE, E.; GOMES, D. **Análise de resultados obtidos com aplicação de princípios da gestão de ativos no processo de inspeção de equipamentos em uma pelotização**. Recife/PE: Universidade federal de Campina Grande, 2016.
- SKF, Reliability Systems. **SKF Machine Condition Advisor CMAS100-SL**. San Diego: SKF group, 2009.
- SKF. **Manual de manutenção de rolamentos da SKF**. SKF.com, fev. de 2012. Disponível em: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d1968083afa2/pdf_preview_medium/0901d1968083afa2_pdf_preview_medium.pdf. Acesso em: 02/12/2024.
- FRENCH, Steven. **Action research for practising managers**. Coffs Harbour: Journal of Management Development, 2009.
- TOAZZA, Guilherme F; SELLITTO, Miguel A. **Estratégia de manutenção preditiva no departamento gráfico de uma empresa do ramo fumageiro**. São Leopoldo/RS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2015.

TRIPP, David. **Pesquisa-ação**: uma introdução metodológica. v. 31, n. 3. São Paulo: Educação e Pesquisa, 2005.

WANG, Xiao; Et al. **Reinforcement learning based predictive maintenance for a machine with multiple deteriorating yield levels**. Nanyang: Nanyang Technological University, 2014.

LEAL, L.; PEDRAÇA, A.; SANTANA, K. Análise Crítica de Manutenção em Máquinas: Aspectos Relevantes para Assegurar Condições Operacionais em Empresa do Pólo Industrial de Manaus. Manaus-AM: EUROPEAN ACADEMIC RESEARCH, 2020.

DYNAMAX (2019). Criticidade de equipamentos na Indústria: como definir prioridades na manutenção. Dynamox.net, 19 de agosto de 2020. Disponível em: <https://dynamox.net/blog/criticidade-como-definir-prioridades-na-manutencao> . Acesso em: 02/04/2025.