

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - CAMPUS BETIM

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Paulo Vitor Ribeiro Soares

**AS FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA ANÁLISE DE FALHA DA
MANUTENÇÃO MECÂNICA**

A importância da análise na melhoria da confiabilidade da manutenção de ativos

Betim

2025

PAULO VITOR RIBEIRO SOARES

**AS FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA ANÁLISE DE FALHA DA
MANUTENÇÃO MECÂNICA**

A importância da análise na melhoria da confiabilidade da manutenção de ativos

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. Rogério Eustáquio de Souza

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

S676f Soares, Paulo Vitor Ribeiro

As ferramentas da qualidade na análise de falha da manutenção mecânica / Paulo Vitor Ribeiro Soares. – 2025.

90 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2025.

Orientação: Prof. Me. Rogério Eustáquio Souza

1. Análise de falhas. 2. Manutenção mecânica. 3. Padronização de processos. 4. Confiabilidade. 5. Engenharia Mecânica. I. Soares, Paulo Vitor Ribeiro. II. Título.

CDU: 658.58


Paulo Vitor Ribeiro Soares

AS FERRAMENTAS DA QUALIDADE NA ANÁLISE DE FALHA DA MANUTENÇÃO MECÂNICA


A importância da análise na melhoria da confiabilidade da manutenção de ativos

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.


Aprovado em 12 de agosto de 2025, pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO EUSTAQUIO DE SOUZA**
Data: 18/09/2025 15:55:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Rogério Eustáquio Souza (Orientador) – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO MAGNO DE CARVALHO FONSECA**
Data: 18/09/2025 11:24:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO**
Data: 18/09/2025 12:30:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho – IFMG Campus Betim

*Aos meus pais, meus irmãos, minha
namorada, meus amigos, meus
professores, meus colegas de trabalho...
e a você que me ajudou chegar até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me proporcionou saúde e sabedoria para poder chegar até aqui.

Aos meus pais, por me tornarem quem eu sou hoje e que todos os dias me ensinam e incentivam em sempre buscar ser alguém melhor.

Aos meus irmãos e amigos, por estarem presentes em minha vida e sempre servindo de alicerce nas horas necessárias.

Aos mestres e colegas de trabalho, por terem a vontade e a paciência de passar tudo aquilo que lhes foram ensinados, e estarem sempre à disposição.

Enfim, aos colegas de classe, que compartilharam ao meu lado, desde o início, a dificuldade ao longo da trajetória, mas que hoje comemoramos felizes a chegada ao fim dessa caminhada.

*“Quando tudo vai bem, ninguém lembra que existe.
Quando algo vai mal, dizem que não existe.
Quando é para gastar, acha-se que não é preciso que exista.
Porém, quando realmente não existe, todos concordam que deveria existir.”*

Arnold Sutter

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a importância da análise de falha como ferramenta estratégica para a melhoria da confiabilidade e disponibilidade na manutenção mecânica de equipamentos dinâmicos, com foco na aplicação das ferramentas da qualidade. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica e estudo de caso em uma refinaria de petróleo, abordando os principais conceitos de manutenção corretiva, preventiva e preditiva, e suas implicações na gestão de ativos industriais. A análise de falha foi aplicada em uma bomba centrífuga do sistema de resfriamento de água, evidenciando a recorrência de falhas nos rolamentos do mancal de escora. A investigação utilizou ferramentas como fluxograma de falha, gráfico de Pareto, análise dos 5 porquês, RCFA (*Root Cause Failure Analysis*), além de técnicas preditivas como análise de vibração e termografia. Os resultados apontaram desvios relacionados ao tensionamento excessivo das tubulações, deficiência na lubrificação dos rolamentos e falhas na padronização dos procedimentos de montagem. A partir dos indicadores de desempenho (TMPR, TMEI e disponibilidade operacional), foi possível propor ações corretivas e preventivas, como o revezamento entre bombas, realinhamento das tubulações, retorno ao sistema original de lubrificação e revisão dos prazos de substituição de componentes. O estudo reforça a relevância da padronização de processos e da aplicação das ferramentas da qualidade como suporte à engenharia de confiabilidade, promovendo melhorias contínuas na gestão da manutenção.

Palavras-chave: manutenção; confiabilidade; disponibilidade; qualidade; ferramentas.

ABSTRACT

This project aims to demonstrate the importance of failure analysis as a strategic tool for improving reliability and availability in mechanical maintenance of dynamic equipment, with a focus on the practical application of quality tools. The research was developed through a literature review and a case study in a petroleum refinery, addressing the main concepts of corrective, preventive, and predictive maintenance and their implications in industrial asset management. Failure analysis was applied to a centrifugal pump in the water cooling system, highlighting the recurrence of failures in the thrust bearing. The investigation employed tools such as failure flowchart, Pareto chart, Five Whys analysis, RCFA (Root Cause Failure Analysis), as well as predictive techniques such as vibration and thermographic analysis. The results revealed deviations related to excessive pipe tension, inadequate bearing lubrication, and failures in the standardization of assembly procedures. Based on performance indicators (MTTR, MTBF, and operational availability), corrective and preventive actions were proposed, such as pump rotation, pipe realignment, restoration of the original lubrication system, and revision of component replacement intervals. The study reinforces the relevance of process standardization and the application of quality tools as support for reliability engineering, promoting continuous improvement in maintenance management.

Keywords: *maintenance; reliability; availability; quality; tools.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Resistência a falha em relação ao tempo, curva PF	16
Figura 02 – Comparativo dos tipos de manutenções industriais	16
Figura 03 – A linha do tempo da manutenção industrial (1914 a 2014)	22
Figura 04 – A transversalidade da manutenção corretiva	24
Figura 05 – Os benefícios da manutenção preventiva	27
Figura 06 – Eixos na medição de vibração em equipamentos rotativos.....	31
Figura 07 – Análise termográfica industrial	32
Figura 08 – Amostras de óleo coletadas em campo	32
Figura 09 – Aparelho para análise de óleo.....	33
Figura 10 – Fluxograma de decisão sobre a falha	40
Figura 11 – Fluxo de decisão sobre a falha.	42
Figura 12 – Desenho de montagem dos mancais de escoa e radial.....	67
Figura 13 – Evidências de desgaste na pista interna do rolamento interno	68
Figura 14 – Evidências de desgaste na pista externa do rolamento externo	68
Figura 15 – Evidências de desgaste na pista interna do rolamento externo.	69
Figura 16 – Evidências do rolamento radial	69
Figura 17 – Detalhamento 3D do local de instalação da bomba.....	71
Figura 18 – Recomendações do fabricante sobre modo de lubrificação.....	72
Figura 19 – Evidências da termografia realizada em campo.....	73
Figura 20 – Diagrama Árvore de Falhas (0210-P-0001B).....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Pressão na linha de descarga	62
Gráfico 02 – Pressão de selagem	62
Gráfico 03 – Pressão na linha de descarga X Pressão de selagem.....	62
Gráfico 04 – Histórico de medições do instrumento desde 2017	63
Gráfico 05 – Espectro de vibrações da bomba 0210-P-0001A.....	78
Gráfico 06 – Espectro de vibrações da bomba 0210-P-0001B.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Referência para estruturação de um trabalho	19
Tabela 02 – Comparativo manutenção Tradicional x Confiabilidade.....	39
Tabela 03 – Exemplo aplicação do “5 Why” na AF de Bomba	53
Tabela 04 – Possíveis causas de falhas críticas	55
Tabela 05 – Materiais usados para a construção do trabalho	58
Tabela 06 – Solicitação de análise de falha	60
Tabela 07 – Histórico das intervenções nas bombas (2012 a 2015).....	64
Tabela 08 – Histórico das intervenções nas bombas (2015 a 2022).....	65
Tabela 09 – Comparativo troca de selos mecânicos e rolamentos	65
Tabela 10 – Comparativo substituição de rolamentos.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

NBR - Normas Brasileiras Regulamentadoras

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

TMEI - Tempo médio entre intervenções

TMPR - Tempo médio para reparo

AFF - Análise de falha funcionais

PAS 55 - Procedimento técnico de gestão de ativos

ml - mililitros

PCM - Planejamento e controle de manutenção

PF - Potential failure

MTBF - Mean time between failures

MTTR - Mean time to repair

KPI - Key Performance Indicators

TPM - Total Productive Maintenance

WCM - World Class Manufacturing

RCM - Reliability Centred Maintenance

ISO - International Organization for Standardization

CMB - Condition Based Maintenance

ASTM - American Society for Testing and Materials

TAN - Total Acid Number

FMEA - Failure modes and effects analysis

RCFA - Root Cause: Failure Analysis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Colocação do Problema	17
1.3	Objetivos	20
1.4	Organização do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	A história da manutenção mecânica	20
2.2	A importância da confiabilidade na manutenção	36
2.3	<i>Key Performance Indicators</i> - KPI's	41
2.4	A análise de falha	47
3	CRONOGRAMA	60
4	METODOLOGIA	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Estudo de caso – Análise de falha da bomba centrífuga	62
6	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – Os indicadores da manutenção do refino	86

1 INTRODUÇÃO

A manutenção, pode ser definida como um conjunto de ações técnicas e administrativas que visam conservar ou restabelecer um equipamento em condições de uso. Porém, a manutenção não é uma atividade inalterável ao longo do tempo, é uma função que sofreu diversas mudanças ao longo da história, acompanhando as revoluções que ocorreram nas máquinas e equipamentos, como definem Oliveira; Bonora; Kloss (2020). De acordo com Diógenes (2019), a manutenção deve cumprir sua função, assegurando a confiabilidade e a disponibilidade dos itens físicos ou das instalações, atendendo ao processo com segurança, preservando o meio ambiente e com custos adequados, sendo essa a missão da manutenção.

Assim, a manutenção não atua apenas em máquinas e equipamentos que estão em operação, mas também em projetos de novos equipamentos. Desde os tempos mais remotos da humanidade é possível notar formas básicas de manutenção, como a preservação de pequenos objetos e de ferramentas de trabalho, que eram usadas para a caça. No entanto, eram práticas grosseiras e primitivas (Prass; Nunes, 2019).

A manutenção já era praticada antes da Revolução Industrial, porém é a partir dela que os processos se consolidam e geram a necessidade de que os equipamentos e as ferramentas usados nos projetos de engenharia, sejam objeto de consertos e reparos, enfim realize-se a manutenção em si. A partir desse momento, a engenharia tem um novo campo e um grande desafio, conforme Seleme (2015).

Sanitá e Campos (2020) esclarecem que a manutenção começou a ser definida como atualmente conhecida, a partir do século XIX, com os avanços da indústria, em decorrência das instalações de máquinas e equipamentos que eram utilizadas, e que com o decorrer do tempo passavam a apresentar problemas, que se não resolvidos impactavam no processo de produção da empresa, o que acarretava em diversos problemas, foi aí que se enxergou a necessidade de uma equipe destinada ao reparo dos equipamentos, de modo preservar os ativos, na busca da garantia da produção.

Foi no ano de 1914, Henry Ford criou a produção em série na sua empresa de desenvolvimento automobilístico, onde os reparos eram realizados pelos próprios operadores. O modelo de produção criado, fez com que as indústrias crescessem e criassem programas mínimos de produção, diante da nova realidade, foi necessário criar equipes treinadas e capacitadas, que fossem capazes de efetuar reparos nas

máquinas operatrizes em curto espaço de tempo. A partir desse entendimento, de que seria necessário um grupo especializado em conhecer mais profundamente sobre os equipamentos usados no processo de produção e suas formas de manutenção, e que o operador do equipamento ter que parar sua atividade para intervir ele mesmo na máquina, sem um conhecimento ou estudo prévio, acabava por atrasar ainda mais o processo de reestabelecer o funcionamento do processo. Dessa forma teve início o monitoramento dos equipamentos, por meio de colaboradores treinados, buscando reduzir as paradas que comprometessem a produtividade.

Equivalente ao que seria à manutenção preventiva, através do avanço da mentalidade voltada para a manutenção e os benefícios em sua aplicação, foi então que nos anos de 1940 a 1950, surgiram os primeiros departamentos de manutenção dentro das empresas, impulsionados pelos benefícios acarretados pela prática da manutenção preventiva, como explicam Prass e Nunes (2019).

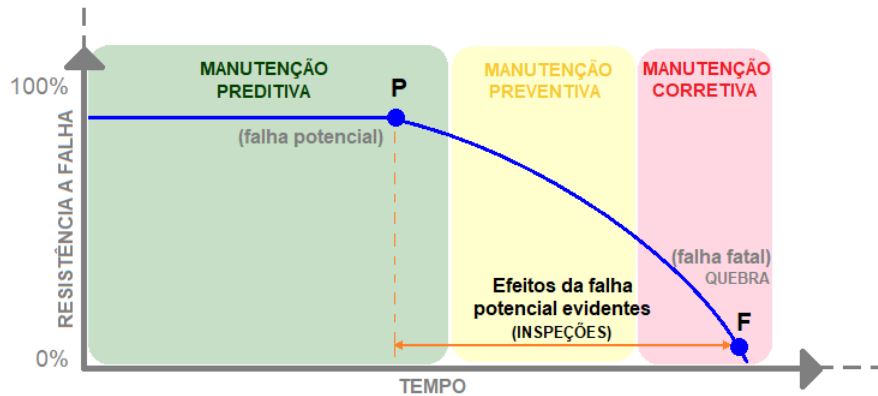
Com o cenário de mercado cada vez mais competitivo é essencial que as empresas aproveitem ao máximo as ferramentas e práticas que já estão disponíveis, na busca da redução de custos. Com isso, Reis (2021) debate que a manutenção tem por objetivo assegurar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos de modo a garantir que o plano de produção proposto, poderá ser atendido ou a prestação dos serviços de modo seguro.

Costa (2017) esclarece que a manutenção pode ser dividida em tipos, modelos, gerações ou filosofias: corretiva, preventiva e preditiva. Sendo que cada uma delas, resultará em resultados distintos para a empresa, mas que isso não determina que exista um tipo de manutenção mais eficiente ou mais lucrativo para a empresa.

Pois o sucesso do setor de manutenção é alcançado de forma mais eficiente, quando são analisadas as variáveis do processo e feito uma mescla entre os tipos de intervenções nas máquinas, avaliando cada possibilidade e definindo o modelo que irá resultar nos melhores resultados, onde cada empresa, ou até mesmo setor, adota um tipo distinto de manutenção, a depender de diferentes fatores.

Aliada da manutenção existe a curva PF (Potencial X Falha), conforme figura 01, usada para auxiliar na análise do tempo entre o início de um problema em um equipamento até a falha total. ajudando a identificar o período para realizar a manutenção antes que o equipamento pare de funcionar e gere maiores transtornos para a produção, e ainda eleve ao máximo a utilização da vida útil de componentes e equipamentos, melhorando índices de confiabilidade e disponibilidade.

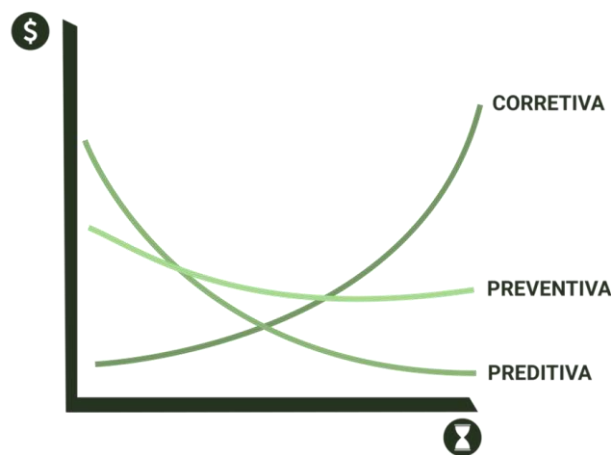
Figura 01 – Resistência a falha em relação ao tempo, curva PF.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A empresa deve procurar uma forma de aumentar a sua capacidade competitiva visando o aumento da geração de lucros, com a competitividade cada vez mais acirrada no mercado, onde a globalização acaba por ampliar significativamente as concorrências entre as instituições, diversas alternativas de atrair o cliente podem ser aplicadas, como: a melhora no prazo para entrega; melhores condições de preço e formas de pagamento; uma assistência pós vendas eficiente; e até mesmo na qualidade percebida do produto. A manutenção exerce um papel de fundamental importância na competitividade de uma companhia, pois controla os custos envolvidos no processo, ainda é responsável pela disponibilidade da produção, além de várias ferramentas utilizadas nos estudos de confiabilidade. A análise de falha, método de grande utilidade para prevenir a reincidência de erros e identificar as oportunidades de melhorias de manutenção, e o objeto de estudo neste trabalho.

Figura 02 – Comparativo dos tipos de manutenções industriais.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

1.1. Justificativa

A escolha do tema relacionado à área de manutenção mecânica de equipamentos dinâmicos de uma Petrolífera, ocorreu devido à experiência do autor deste trabalho, no setor de engenharia de manutenção. Além do tema estar relacionado a uma área que nos últimos anos vem ganhando cada vez mais destaque da engenharia, onde a confiabilidade e disponibilidade dos ativos, são essenciais para a saúde competitiva de uma indústria, e que seja capaz de atender o planejamento de produção solicitado.

Diante deste assunto, e do interesse pessoal em análise de falha e nas ferramentas da qualidade, foi adotado o tema dentro da engenharia de confiabilidade a ser aplicado de forma estratégica, no setor da manutenção mecânica.

1.2. Colocação do Problema

Realizar um estudo de caso, envolvendo os problemas encontrados no setor de equipamentos dinâmicos de uma indústria de Óleo e Gás. Abordar a importância da análise de falha para a manutenção mecânica, e as diversas ferramentas da qualidade disponíveis atualmente, para que cada vez mais a intervenção em máquinas e equipamentos seja feita de modo assertivo e eficaz.

Para isso é necessário entender o surgimento da manutenção em geral; passando pela evolução dos modos de intervir no processo, e como cada um pode ser usado; dos reais desafios da manutenção, relacionado a gestão de ativos, a gestão de pessoas e a gestão do planejamento produtivo.

E ainda estabelecer a correlação entre as apurações realizadas durante a análise de falha, com a padronização dos processos, de modo a não permitir que problemas já analisados, se repitam.

1.3. Objetivos

O propósito do presente trabalho é aplicar ferramentas da qualidade na análise de falha ocorrida no setor de equipamentos dinâmicos na manutenção mecânica de uma refinaria de petróleo, visando identificar as causas e propor soluções eficazes.

Abordando o processo de análise de falhas em máquinas e equipamentos, tal como as principais ferramentas da qualidade, que aplicadas ao setor de manutenção mecânica, ajudam na melhoria do planejamento estratégico do setor, identificando os passos do processo de análise de falha em equipamentos, de modo a agir de maneira cada vez mais eficiente e rápida sobre os problemas encontrados.

Atuando sobre os objetivos específicos de coletar e analisar dados da falha ocorrida; identificar possíveis causas usando ferramentas da qualidade; propor soluções para reduzir ou eliminar o problema, avaliando se as proposições de melhorias são viáveis e eficazes.

1.4. Organização do Trabalho

Para a elaboração da estrutura do trabalho ora apresentado, foi utilizado o padrão disponível pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Betim, que detalha o corpo do trabalho de conclusão de curso, expondo os principais pontos a serem tratados em cada um dos tópicos, de modo a estruturar o trabalho que será avaliado de forma ordenada e coesa.

Em um dos encontros com o professor orientador, foi exposto o planejamento a ser adotado, tal como a estrutura do trabalho, onde será abordada a importância da análise de falha, para o bom desempenho do setor de manutenção mecânica, através dos conhecimentos adquiridos no decorrer do curso, com as experiências vividas no ambiente profissional de trabalho, em uma Refinaria do setor de Óleo e Gás.

Tabela 01 – Referência para estruturação do trabalho.

CAPÍTULO / SEÇÃO	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO
1 INTRODUÇÃO	Contextualização do problema a ser investigado.
1.1 Justificativa	Justificativa da necessidade de realização do trabalho, destacando a relevância do assunto.
1.2 Colocação do Problema	Exposição do problema de forma direta.
1.3 Objetivos	Apresentado objetivo geral.
1.4 Organização do Trabalho	Apresentação da estrutura do trabalho.
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	Abordado os principais métodos e tecnologias disponíveis para resolução do problema.
(Revisão Bibliográfica)	Referências a trabalhos que abordaram temas semelhantes e livros relacionados.
3 METODOLOGIA	Descrição do modelo de trabalho escolhido e como foi desenvolvimento pelo autor. Descrever os procedimentos realizados e locais de consultas usados para metodologia usada.
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	Apresentação dos resultados alcançados. Análise crítica dos resultados, e possíveis razões para os resultados obtidos. Análise de falha da bomba centrífuga, usada no Hidrotratamento de Diesel do Refino
5 CONCLUSÃO	Sintetize do que foi feito e as principais conclusões do trabalho.
REFERÊNCIAS	Lista de referências bibliográficas (ABNT)
APÊNDICE A – Os indicadores de manutenção mecânica de uma Refinaria	Demonstrativo dos principais <i>KPI's</i> de análise e controle de parâmetros internos, do setor de manutenção de uma Petrolífera

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (Modelo IFMG - Campus Betim), 2025

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.A história da manutenção mecânica

De acordo com François Monchy, em “A função da Manutenção” (1989), a palavra “manutenção” vem do âmbito militar, onde significava atuar na preservação, tanto das tropas de combate, quanto do contingente disponível, em condições de aptidão; e ainda manter os equipamentos, em estados de conservação adequados, para estar pronto a eventuais demandas, caso seja for preciso. O conceito moderno de manutenção surgiu com o processo de industrialização no fim do século XIX, como a ideia de adequar algo ao uso, conforme Ohno (1997). Antes disso, eram realizados apenas consertos corretivos, identificados pela própria equipe de produção, ao notar alguma falha ou interrupção do processo.

De acordo com Figueiredo (2019), em meados da Primeira Guerra Mundial, entre os anos de 1914 e 1918, passou-se a perceber as vantagens de se dar autonomia a diferentes equipes, que fossem capacitadas a realizar reparos e consertos com objetivo de diminuir os tempos de paradas, pois não deve existir um ambiente mais imediatista e com a necessidade de soluções dinâmicas e rápidas, do que a vivência de uma guerra, ainda mais quando se trata da primeira grande guerra, que trouxe incontáveis consequências e deixou profundas marcas em povos e religiões, mas que em contra partida, proporcionou diversos avanços principalmente para o setor industrial. As equipes eram subordinadas à produção de materiais bélicos, e esse esquema se manteve até o final da década de 1930.

Já durante a Segunda Guerra Mundial, entre os anos de 1939 a 1945, ocorreu a evolução do conceito antigo para um pouco mais próximo do que é conhecido como Manutenção nos dias atuais, a partir da criação de métodos de prevenção de falhas, baseados nas análises realizadas sobre os problemas encontrados e através do comparativo entre a recorrência de avarias semelhantes, onde foi iniciado um novo olhar sobre o tema, passando a buscar métodos de atingir melhores resultados e diminuir cada vez mais gastos desnecessários. Esses processos provocaram grande aumento dos níveis de produtividade devido à redução de interrupções não planejadas. A partir desse momento a Produção e a Manutenção passaram a atuar de formas independentes dentro da Estrutura Organizacional, mas totalmente ligadas entre si, para um bom desempenho da empresa, alinhando as necessidades produtivas, junto da capacidade de produção no tempo estipulado.

Passado o período das guerras, no passar dos anos, até em meados de 1970, os avanços ligados ao setor aeronáutico estavam cada vez maiores, através do uso de aviões comerciais, houve uma larga expansão de critérios e ferramentas para se abordar a manutenção das aeronaves, segundo Figueiredo (2019). Foi então que surgiu a necessidade de uma manutenção que fosse capaz de 'prever' o que estaria para acontecer, haja visto que no caso da indústria aeronáutica, manutenções corretivas emergências, ou paradas não programadas, não podem ser parte do dia a dia das companhias aéreas. Surge então o conceito de manutenção preventiva, considerado o ponto de virada da manutenção, pois a partir dali diversas tecnologias puderam ser desenvolvidas, possibilitando cada vez melhores índices para o setor, trabalhando cada vez mais na disponibilidade dos equipamentos, através de serviços de qualidade.

Em constante evolução, passado um tempo nasce então a Engenharia de Manutenção, com a ideia de atuar na parte de estudos, pesquisas e desenvolvimentos de padrões e procedimentos, que auxiliem nos processos executados pelo setor. Já em meados da década de 90, os computadores passaram ser utilizados pelos setores industriais, e por meio de planilhas e gráficos, inicia-se então a fase de controle dos processos, e por meio desse controle foi possível gerenciar os processos e definir prazos e custos, dessa forma estabelecendo metas a serem cumpridas, que são conhecidas como indicadores, que estipulam as medidas que serão tomadas, a fim de atingir os objetivos propostos. Conforme ilustrado na linha do tempo da evolução da manutenção mecânica industrial, demonstrada através da figura 03.

Afinal conforme dito pelo professor William Edwards Deming (1990), conhecido como o pai da gestão de qualidade moderna, "Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia".

Figura 03 – A linha do tempo da manutenção industrial (1914 a 2014).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Manutenção Corretiva

Com o passar dos anos e com os avanços tecnológicos no meio industrial, com a produção crescendo cada vez mais, e em contrapartida, sendo cada vez menos aceitas as paradas repentinas, que acabam por atrapalhar o processo produtivo, e que acarretam problemas que conseqüentemente irão diminuir a margem de lucro sobre o produto. Em uma sociedade industrial moldada pela necessidade de lucros cada vez maiores, para a garantia de permanência das empresas no meio competitivo, com concorrências entre companhias cada vez mais acirradas, pensar em maneiras de reduzir as próprias perdas, foi a forma que diversas empresas buscaram para se reinventar e sair na frente em relação as demais.

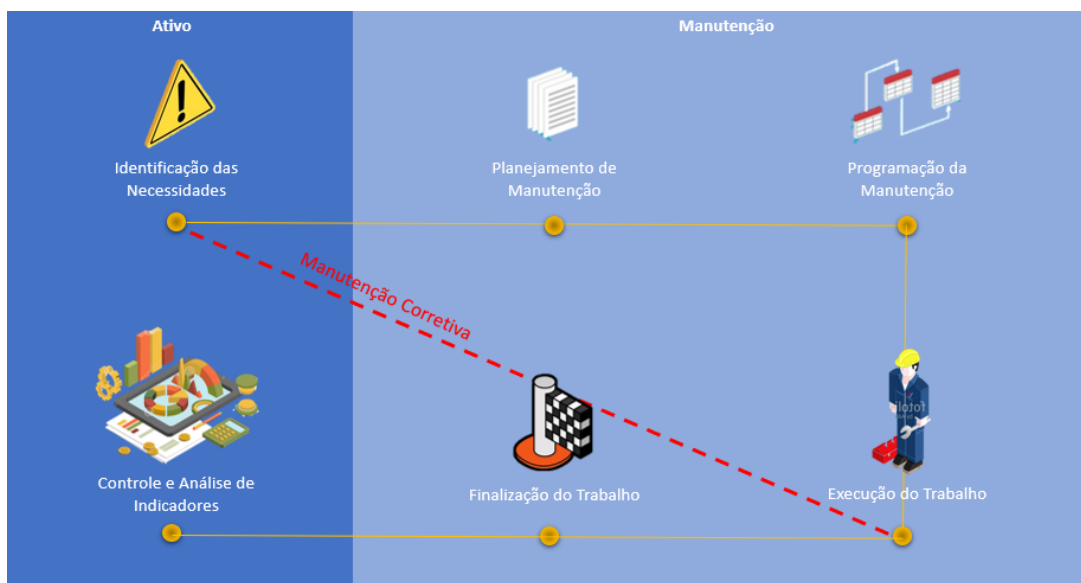
Inicialmente, os tipos de manutenção podem ser divididos entre as manutenções programadas e as não programadas. A manutenção não programada, é aquela que não é planejada previamente pelo setor responsável, muitas das vezes nem mesmo cogitada, onde as tarefas a serem feitas, são determinadas diretamente e relacionadas a condição atual dos ativos da empresa. Ou seja, não existem cronogramas de manutenção, nem maneiras de se controlar o processo visando possíveis falhas futuras, muito menos prever possíveis perdas. O que é feito é a utilização de máquinas e equipamentos, conforme as determinações do fabricante, estipuladas nos *datasheets*, e no momento da falha do equipamento, ou quando alguma anomalia no maquinário se torna perceptível, serão levantadas as ações e materiais necessários para que seja reestabelecido o funcionamento.

A manutenção corretiva, analisando o nome que é dado ao tipo de estratégia, atua sobre o Conserto dos materiais, sendo o mais antigo dos tipos de manutenção Kardec e Nascif (2009). É também o modelo no qual a vida útil dos componentes e equipamentos é usada, por mais tempo, pois são usados até o momento da falha. Isso pode gerar a falsa sensação de ser o tipo de manutenção de menor custo, entretanto é conhecido por ser um dos tipos de manutenção mais perigosos para a saúde financeira de uma empresa, pois os custos das trocas antecipadas são normalmente reduzidos. Considerando um cenário em que haja uma parada de produção não programada, em um momento inoportuno, seja durante um final de semana, ou até mesmo em um período em que o maquinário esteja operando de forma automática, a parada repentina acarretará muitos mais problemas e custos para a empresa, do que se tivesse sido uma tarefa previamente planejada, pois será necessário deslocar

colaboradores até a empresa, fazer a aquisição de materiais de reposição necessários, em caráter prioritário (o que incide diretamente sobre o valor final que será pago), custos da não entrega no prazo do que estava sendo produzido, entre outros diversos problemas que poderão ser encontrados.

A figura 04, exemplifica muito bem o conceito geral de manutenção corretiva na indústria atualmente, atuando como uma alternativa a ser tomada, ela acaba por pular as etapas do planejamento e da programação das tarefas, que consistem no processo de definição das ações que serão tomadas pelos colaboradores, bem como os materiais ferramentas e apoio de áreas correlacionadas que serão necessários; e no agendamento de cada uma das linhas de serviço, otimizando ao máximo a execução e reduzindo a ociosidade dos trabalhadores, respectivamente.

Figura 04 – A transversalidade da manutenção corretiva.



Fonte: Engeteles, 2017.

Atuando de forma imediata sobre a falha ocorrida, que alguns casos pode ser a melhor alternativa, devido a resposta rápida ao problema identificado. Mas acarreta maiores custos e perdas, devido ao não planejamento prévio da intervenção e da parada repentina do equipamento, que cessará sua produção, e ainda correndo-se o risco, da quebra interferir na qualidade do processo produtivo que estava em execução, ocasionando cada vez mais em maiores prejuízos. Além de tudo isso, é de extrema importância para uma companhia, considerar que paradas de produção repentinas são prejudiciais também, se tratando de Saúde, Segurança e Meio

Ambiente no trabalho. De acordo com o processo que está em execução, uma quebra de equipamento, pode ocasionar tamanhas perdas, que vão muito além do financeiro, como acidentes de trabalho e até mesmo acidentes ambientais. Como exemplo pode-se citar os vazamentos de petróleo em alto mar por petrolíferas, e até mesmo os rompimentos de barragens de rejeito, nas mineradoras.

A manutenção corretiva pode ser uma opção inteligente e econômica quando utilizada em itens com criticidade baixa no processo, pois a substituição antecipada de componentes de baixo custo, além da necessidade de parada para intervir, muitas das vezes pela facilidade de aquisição e pelo baixo custo, é viável a compra repentina.

Para casos dessa natureza, existem duas maneiras distintas de utilizar essa técnica: emergencial ou deferida. Conforme Romão (2018), a manutenção corretiva emergencial é aquela que tem alta prioridade para ser executada o mais rápido possível quando a falha for detectada pela operação. O objetivo é colocar o item em condições de desempenhar sua função rapidamente para evitar perda de receita. Geralmente esse tipo de manutenção tem prioridade sobre as programadas e deve ser realizada com inteligência para não prejudicar todo o cronograma definido.

Já a outra possibilidade é a manutenção corretiva deferida, que muitas vezes é chamada erroneamente de programada. Esse tipo de atividade não pode ser considerado como programado porque foi originado por uma falha ocorrida, porém apesar de não ser programado, ele pode ser planejado para ser realizado.

Manutenção Preventiva

Seguindo uma estratégia de manutenção oposta à anterior, o modelo de manutenção preventiva é agir sobre os possíveis problemas de modo preventivo, como o próprio nome da metodologia indica. Um modelo de manutenção atrelado diretamente as especificações e recomendações dadas pelo fabricante, onde o descrito no manual da máquina é primordial para o funcionamento do setor.

De acordo a Norma ABNT NBR 5462 (1994), a termo Manutenção Preventiva é definido como:

"Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item. Ou seja, todas as atividades destinadas a prevenção de falhas, panes e quebras são encaradas como Manutenção Preventiva. Com o objetivo principal de elevar e garantir os índices de disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos".

Já para Kardec e Nascif (2009), a preventiva é:

"Inversamente proporcional à política de manutenção corretiva, a manutenção preventiva procura obstinadamente evitar a ocorrência de falhas, ou seja, procura prevenir. Em determinados setores, como na aviação, a adoção da manutenção preventiva é imperativa para determinados componentes, pois o fator segurança se sobrepõe aos demais."

Com o objetivo de evitar ou minimizar as falhas ou o desgaste funcional de um item, realizando intervenções programadas em períodos fixos. A manutenção preventiva não depende do estado do ativo, mas sim de um cronograma pré-estabelecido. Com essa estratégia, busca-se reduzir as ocorrências de manutenção corretiva, através de ações que preservem a qualidade de um equipamento, Moubray (2000). Que realmente são consideravelmente inferiores, por não se deparara com quebras ou paradas repentinas.

De acordo com Otani e Machado (2008), entretanto é necessário avaliar a viabilidade do uso do modelo de manutenção, principalmente considerando o quesito, da saúde financeira do setor de manutenção. Pois os fabricantes de máquinas, equipamentos e componentes, seja qual ele for, no momento que vão estipular a vida útil de um novo produto, é considerado um fator de segurança, no qual resguarda a empresa de que até aquela data previamente determinada, o material irá atender todas as necessidades solicitadas. Mas que após essa data, a fabricante não será

mais responsável pela condição que o material apresentará, e em muitos casos, quando chega a data estipulada pela empresa, o equipamento ou componente, fisicamente aparenta estar em ótimo estado de conservação ainda, mas que por se tratar de uma manutenção de caráter preventivo as condições atuais e a disponibilidade do equipamento não são levadas em consideração.

Para aplicação desse modelo, o plano de manutenção preventiva é fundamental para o acompanhamento e controle do setor, sendo responsável por alavancar ou reduzir os índices de confiabilidade e disponibilidade de máquinas e equipamentos. O plano preventivo de um setor, consiste em uma compilação de documentos, de referências e de controle das tarefas, apurando as informações necessárias para a execução das atividades programadas previamente.

A programação deve ser elaborada por um profissional dedicado a função, que fará o intermédio entre as partes interessadas, de modo a garantir a execução da atividade, dentro do prazo estipulado, seguindo conforme um cronograma, que será disponibilizado entre os responsáveis, agindo de maneira coordenada e padronizada na intervenção, garantindo os melhores índices possíveis em qualidade e segurança.

Figura 05 – Os benefícios da manutenção preventiva.



Fonte: Engeteles, 2017.

Além de nortear a intervenção de manutenção que será realizada, servindo como um roteiro de ações a serem tomadas durante e a preventiva, o plano preventivo de manutenção atua também, na redução de perdas relacionadas aos desperdícios, seja ele de mão de obra, materiais ou até mesmo de tempo. De acordo com o estudo da Engeteles, a maior escola brasileira de gestão da manutenção, aproximadamente 65% do tempo empregado em uma manutenção industrial, podem estar sendo desperdiçados com: o tempo gasto para passar instruções; o tempo para separar as ferramentas necessárias; o tempo de deslocamento até o local da intervenção; o tempo ocioso dos colaboradores, devido a interferências entre tarefas; e o tempo das interrupções não planejadas.

Para a elaboração de um bom plano de manutenção preventivo, é importante definir a forma na qual ele será pautado, baseada por Inspeções de campo, feitas pelos fiscais e operadores do equipamento, atreladas as recomendações de fábrica, Viana (2002). Com a inspeção por Tempo, respeitando as características e prazos estabelecidos pelo fabricante; ou por Condição, onde de acordo com as inspeções periódicas, com o monitoramento de falhas, através da progressão de defeitos.

Algumas informações são imprescindíveis, como: os serviços que serão prestados; quando serão executados; nome, cargo e função de cada um dos responsáveis; os recursos necessários para a realização da tarefa; o tempo que será empregado na atividade; qual será o custo total; quais materiais serão aplicados e/ou afetados; e quais máquinas, ferramentas ou locais, serão usados. Em posse de tais informações é possível elaborar o documento, através de *softwares* disponíveis no mercado.

Manutenção Preditiva

Novamente baseando na Norma Regulamentadora de número 5462, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, publicadas em 1994 (ABNT NBR-5462/1994), a termo Manutenção Preditiva é definido como:

"Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva".

Em alguns locais também conhecida como manutenção controlada, é uma estratégia adotada que atua com a mescla dos dois tipos de manutenção anteriores, abordando um conjunto de ações de inspeção e ferramentas de monitoramento sensitivo ou até mesmo instrumentado, seja ele através monitoramento automático ou remoto. Atuando no controle de variáveis do processo, baseadas nos parâmetros pré-definidos de perfeito funcionamento, dessa forma avaliando os indicadores de funcionamento em comparação com os históricos, é possível analisar parâmetros divergentes que já ocorreram no passado, e realizando o acompanhamento das falhas, é possível prever as possíveis consequências e mitigá-las.

Quando se trata de investimentos em empregados no setor de manutenção preditiva, ocorre uma dualidade de conceitos da própria estratégia, pois a viabilidade de uso da metodologia, está diretamente ligada a criticidade das máquinas e equipamentos do processo, e a perda causada pela parada repentina das máquinas. Para adoção do modelo, é preciso uma avaliação minuciosa das especialidades do setor produtivo, e uma relação de quais são os equipamentos mais importantes. Para Almeida (2018) o modelo preditivo, estende a vida útil de componentes, quando se comparado ao preventivo, por ir além do prazo de uso recomendado pelo fabricante, baseando-se diretamente na condição dele para que a troca seja efetuada.

É necessário entender que para o acompanhamento da condição, baseado na metodologia CMB (*Condition Based Maintenance*), inspeções periódicas precisam ser realizadas por um colaborador dedicado a tarefa, ou através da instrumentação automática por sensor, que acompanhará as variações automaticamente. A partir daí mensurar a disponibilidade do componente a ser substituído, pois não existe economia quando se estende a vida útil do equipamento, mas esse tempo, ou mais é perdido na busca de um novo componente no mercado, para ser reposição.

Conhecida como um dos tipos de manutenção de maior investimento, pois com a necessidade de avaliações e análises cada vez mais sofisticadas, capacitar uma equipe própria com treinamentos e ainda atuar na aquisição dos dispositivos de aferição e controle acaba sendo uma alternativa muito distante das perspectivas de muitas empresas, quando se trata de manutenção. Ainda existe muito a ideia errônea de que os custos de manutenção são gastos e não investimentos, e que devem ser reduzidos ao máximo, Baldissarelli e Fabro (2019). Também existe a alternativa, de buscar por empresas já estabelecidas no mercado que ofertem o serviço, mas manter os contratos com os prestadores de serviços também é uma tarefa complicada, quando são levados em consideração os valores.

Uma imensa porção das mais diversas aferições e análises preditivas podem ser feitas quando for notada alguma alteração do processo, além do padrão, de modo a avaliar as condições da máquina, variando entre suas aplicações e a especialidade de cada uma delas. Algumas das mais frequentes no setor de manutenção mecânica industrial atualmente são:

- Alterações no nível de vibração de equipamentos rotativos;
- Alterações nos níveis de temperatura de equipamentos elétricos e mecânicos;
- Alterações nas propriedades de óleos lubrificante e hidráulicos, devido a contaminação;
- Alterações nos estados de superfícies
- Alterações nos níveis de pressão.

Essas medições são usadas para determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção numa peça ou componente específico de uma máquina ou equipamento; eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção; aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos; reduzir as perdas por intervenções de corretiva; impedir o aumento dos danos, por quebras repentinas; aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento e ainda aumentar o grau de confiabilidade das máquinas e equipamentos.

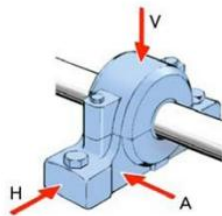
Estão entre os modelos de manutenção preditiva mais comumente encontrados nos setores de manutenção mecânica industrial a análise de vibração, a análise termográfica e a análise de óleo.

Análise de vibração

É uma das mais usadas, por proporcionar uma análise mais completa na detecção de avarias mecânicas, tornando quase obrigatória quando se trata de manutenção em equipamentos dinâmicos (rotativos), pois além de apontar anomalias existentes nas máquinas e equipamentos, também ajuda na busca da causa raiz dos problemas, de modo a ajudar a corrigir outros erros, que possam atrapalhar o processo.

A inspeção é realizada sem que seja interrompida a produção, por meio da aferição dos níveis de vibração em determinados pontos acessíveis das máquinas, que já possuem valores de trabalho que são aceitáveis, mas que qualquer medição diferente, pode indicar desalinhamento ou empeno dos eixos; desbalanceamento; desgaste nos rolamentos; desgaste nas engrenagens; problemas estruturais; folgas e até mesmo lubrificação ineficiente.

Figura 06 – Eixos na medição de vibração em equipamentos rotativos.



H - Horizontal: Análise de desequilíbrios no plano de rotação da máquina.
V - Vertical: Análise de fraqueza estrutural no plano de rotação da máquina.
A - Axial: Análise de defeito ao longo do veio e falhas de alinhamento.

Fonte: Apostila segurança da manutenção - Departamento de Engenharia UFRJ, 2015.

Análise termográfica

Possibilita ao colaborador identificar, monitorar e registrar alterações nos níveis de temperatura, através de imagens em tempo real. Sendo necessário a capacitação de um profissional para tarefa, ou a contratação do serviço por uma empresa especializada.

Porém o que torna um modelo de manutenção de investimento mais alto, é o aparelho de aferição em si, que utiliza uma câmera especial capaz de captar radiação

infravermelha irradiada pelos componentes e a transformando em imagem colorida de acordo com os índices de temperatura em cada uma das regiões da fotografia, e partir do manual do equipamento, avalia e mensura o desvio em relação ao padrão.

Figura 07 – Análise termográfica industrial (Termografia *Butterfly Valves*).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2022.

Análise de óleo

A análise na maioria das vezes na indústria, é realizada através da coleta da amostra de fluido em campo, e enviado até o laboratório, mas também pode ser realizada com recursos próprios da empresa, caso existam. Onde serão avaliadas as características físico-químicas do fluido e a partir daí ações serão tomadas. Podem ser subdivididas em três grupos, a análise das propriedades do lubrificante (verifica o estado do óleo base e seus aditivos); a análise dos contaminantes (água, sílicas, partículas ferrosas); e a análise e monitoramento dos desgastes das máquinas.

Baseado nos resultados obtidos, pode se encontrar: contaminações; oxidação; desgaste de componentes mecânicos; desalinhamento e a depreciação de aditivos.

Figura 08 – Amostras de óleo coletadas em campo, para análise.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2022.

Figura 09 – Aparelho para análise de óleo - *OILVIEW (Model 5100 Oil Analyzer)*.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2022.

Se bem executada, uma análise de óleo pode resultar em ganhos significativos para o setor de manutenção, pois auxilia na diminuição do número de trocas de fluido e na redução de demais análises e verificações preditivas. A redução na frequência das trocas é dada pelo conceito principal da manutenção preditiva, pois conforme é realizado com os ativos, a utilização da vida útil do lubrificante é maximizada, pois a troca imediata após o período de utilização é substituída por verificações periódicas, que farão um acompanhamento da qualidade do óleo hidráulico.

É possível traçar um comparativo entre a análise de óleo, com um exame de sangue feito por um ser humano, por mais abstrata que pareça a comparação. Assim como o exame sanguíneo, um relatório de análise de lubrificante é responsável por apresentar diversas informações, sobre a integridade do equipamento avaliado, através deles são obtidos parâmetros como eventuais desgastes de componentes internos e peças em geral; a presença de micro particulados, fuligem, ou contaminantes externos na composição do fluido. E por se tratar de um processo muito minucioso, até mesmo para as coletas das amostras que serão submetidas a análise, precisa ser feita por meio de um procedimento padrão, extremamente importante para a garantia da confiabilidade dos resultados, fundamentais para a tomada de decisão do corpo técnico do setor.

Comumente são retirados aproximadamente 200 ml do óleo, como amostra, que deve ser armazenado em um recipiente limpo e vedado, que deverá ser identificado com algumas informações essenciais, como: qual o tipo de fluido utilizado; qual o equipamento em que está sendo usado; qual a marca e modelo do óleo; qual a data da última substituição e quanto tempo em uso; qual a função do equipamento

e fluídos presentes no processo; e em quais elementos de máquinas o lubrificante é aplicado.

Após retirada a amostra conforme procedimento, e realizado o levantamento das informações necessárias, é iniciado o processo de análise, que consiste em diversas etapas, a depender das necessidades. Uma das etapas mais comuns, é o teste de aparência, feito de forma visual, são observadas as condições do óleo a olho nu, verificando a homogeneização, a coloração e a presenças de partículas suspensas, caso o fluido possua mais de uma fase aparente, pode ser um grande indício de contaminação do mesmo com água, mas caso sejam mais de duas fases bem expostas, bem provavelmente as características do óleo lubrificante adotado, não são as ideais para o processo.

O ensaio de cor, é usado para a determinação da viabilidade e tempo de uso do lubrificante, baseando na tonalidade dele, onde para óleos de origem mineral é comum uma coloração mais escura, com a verificação sendo feito através da observação contra a luz. E para óleos mais claros ou transparentes é aplicado um aditivo, chamado Colorímetro, para facilitar na detecção da cor, que será comparada com a escala internacional, regida pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Um outro método de análise é a aferição do teor de água, também chamado de Crepitação, pode ser qualitativo, que consiste em derramar uma quantidade do fluido sobre uma superfície aquecida, e caso o óleo entre em estado de calefação (ebulição instantânea) é devido a presença de água. Ou quantitativo, feito por meio da destilação fracionado ou através do método de Karl Fischer, que consiste na aplicação de um reagente, que atuará na identificação da quantidade de partículas de água. Existe também um ensaio capaz de determinar o percentual necessário de base, que será necessário para a neutralização dos componentes ácidos presentes no óleo, medindo a acidez dele, processo esse chamado de *Total Acid Number* (TAN).

Outro teste amplamente utilizado no processo, para determinar o lubrificante ideal, é o ensaio de viscosidade, capaz de aferir a resistência ao escoamento do produto. Através do Viscosímetro, é medida a viscosidade cinemática dos fluídos, no período em que eles percorrem um determinado trajeto, onde cada tipo de óleo possui sua faixa de viscosidade específica, ao ser alterado, ficara mais fluido ou mais viscoso.

Existe ainda a avaliação de metais, que determina a presença ou não, de dois tipos de partículas metálicas no fluido, podendo ser caracterizados em metais de

aditivação ou metais de desgaste. Os de aditivação, são aqueles introduzidos nas propriedades do óleo de maneira intencional e controlada, na tentativa de otimizar a performance do produto. Já os provenientes de desgastes, são aqueles de origem distinta da composição original do óleo, surgem através da degradação química ou física de componentes do equipamento.

E por fim, mas não menos importante, é realizado também o ensaio de infravermelho, responsável por determinar a oxidação, a nitratação, a sulfatação e o nível de fuligem dos compostos, apresentando curvas, ao comparadas com o padrão internacional, avalia os parâmetros, de acordo com os limites estabelecidos.

2.2.A importância da confiabilidade na manutenção

Para assegurar que os produtos cumprirão os requisitos de um projeto estabelecidos para um tipo de processo produtivo, é preciso realizar uma atividade chamada controle de qualidade. Onde é avaliado se um produto está de acordo com os limites de especificação, ele deve funcionar corretamente depois de ser fabricado, porém o controle de qualidade não basta para garantir a qualidade durante o tempo, ou seja, a confiabilidade do produto, vai muito além da análise de viabilidades de uso, e por meio de parâmetros é possível determinar o grau de qualidade do material, e a partir daí, mensurar a Confiabilidade empregada nele.

A confiabilidade é uma característica de qualidade que mostra a probabilidade de um produto cumprir uma função específica, sob condições definidas e por um intervalo de tempo determinado. Logo, a confiabilidade é um dos fatores mais relevantes da qualidade de um equipamento, sendo "a qualidade que se mantém no tempo", de acordo com ReliaSoft Brasil, referência no ramo de consultoria em tecnologia da informação, com soluções para análise de dados e melhorias contínua.

A avaliação da performance da vida de um equipamento também gera vantagens financeiras para as empresas, pois o aumento da disponibilidade dos equipamentos resulta em uma otimização da manutenção, diminuindo a ocorrência das falhas e, por isso, reduzindo os custos de manutenção dos equipamentos e reduzindo as paradas de produção, que acarretam prejuízos, aumentando assim sua produtividade, conforme Reliasoft Brasil (2005).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5462, 1994), a confiabilidade é definida como "A capacidade de um item realizar uma função especificada, sob condições e intervalo de tempo predeterminado". E segundo Pallerosi (2007), a disponibilidade é "A capacidade de um equipamento estar apto a executar sua função com uma duração real de funcionamento, sendo reparado após uma falha, com condições operacionais e ambientais especificadas, com custos de reparos compatíveis e tempos de recolocação menores possíveis.

Promovendo um comparativo entre o valor empregado para os materiais e serviços necessários para a recuperação, se comparado a aquisição de uma nova unidade, e definida a estratégia mais viável, seja a de aquisição ou de restauração. Mas anteriormente ao início das tratativas de compra ou recuperação do material, um ponto primordial na confiabilidade de equipamentos, e a necessidade de atuar antes

de tudo, sobre a investigação da origem do problema, buscando formas de eliminar ou mitigar as probabilidades de novas falhas, dessa forma reduzindo as consequências inevitáveis. De acordo com Slack Et Al (2002) é necessário antes de tudo compreender quais são as possíveis falhas e seus modos, e buscar os motivos pelos quais elas estão ocorrendo.

Sustentada pelo paradigma de "Preservar a função do sistema", em meados da década de 1960, surge em meio a indústria Aeronáutica Americana (MSG1/2/3) a política da *Reliability Centered Maintenance*, ou apenas RCM, que se traduzido seria algo como Manutenção Centrada na Confiabilidade. Que inicialmente foi usada pelos setores da indústria bélica dos Estados Unidos, mas que atualmente é usada desde a extração de Óleo e Gás em *offshores*, como também no Refino de Petróleo, até em setores da indústria nuclear.

A implementação da metodologia do RCM, é realizada por meio da aplicação de 05 tarefas principais, que são necessárias para o perfeito funcionamento da ferramenta, que instrui o setor, auxiliando no processo:

01 - Seleção dos sistemas envolvidos

É feito um levantamento geral de todas as máquinas, equipamentos e componentes presentes nos sistemas envolvidos, ou em sistemas de fronteira (que pertencem mesmo que parcialmente ao processo), contemplando suas interações.

02 - Identificação de possíveis falhas

Através do levantamento dos sistemas envolvidos inicial, é realizada uma análise sobre as funções de cada um dos sistemas analisados, e levantadas as possibilidades de desvios, incidentes, defeitos ou falhas que podem ocorrer nos ativos da companhia, em meio ao processo.

03 - *Failure modes and effects analysis (FMEA)*

Nessa etapa é feita uma Análise de Modos e Efeitos de Falhas funcionais, onde é imprescindível que sejam levados em consideração os níveis de segurança, de cuidados com a saúde e o meio ambiente, tais como os efeitos que podem ser gerados no ambiente de produção, realizando um mapeamento geral das funções exercidas e os riscos envolvidos nas possíveis falhas que poderão ocorrer.

04 - Seleção de tarefas

Baseado no padrão seguido pela empresa, ou pelo procedimento interno estabelecido, realizado um levantamento das tarefas a serem realizadas, de modo a atender os requisitos necessários para intervenção no equipamento, através de um planejamento prévio, definindo a melhor estratégia técnica e econômica, que atenda às necessidades e garanta o perfeito funcionamento após a manutenção.

05 - Implementação do plano elaborado

Após a estruturação do passo a passo para a aplicação do RCM, a quinta e última tarefa consiste na aplicação do plano de manutenção elaborado, através da implementação na rotina do setor de manutenção, avaliando sobre as estratégias adotadas, trabalhando em conjunto aos demais colaboradores do setor e de outros setores, em avaliações programadas, a fim de discutir, padronizar e ampliar boas ações, atuando sempre em prol da melhoria contínua.

De acordo com Santos Junior (2015), é preciso identificar quais são os sistemas dentro do processo da empresa, que seria possível a implementação do RCM, onde é preciso que a unidade avaliada atenda a alguns requisitos, que irão definir a viabilidade ou não da aplicação. O primeiro parâmetro de avaliação é o número de manutenções corretivas no histórico recente, caso seja elevado é um indicativo que o planejamento das intervenções preventivas pode estar inadequado, ou até mesmo a execução pode estar diferente do esperado. Já o segundo, é quando se tem elevados custos para a realização da manutenção preventiva, também é um indicativo, onde muito provavelmente a periodicidade dos planos de manutenção não estão corretas, e podem ocorrer trocas desnecessárias.

Também quando o sistema seja responsável por parcela significativa da disponibilidade da instalação, denominados como os equipamentos críticos, são aqueles que necessitam de uma maior atenção, por estarem associados diretamente a produção, e conseqüentemente ligado a saúde financeira da companhia. E por fim, quando existem implicações relacionadas ao meio ambiente, saúde ou segurança, que podem ocasionar em sérias conseqüências.

Além desses parâmetros, é necessário que alguns pontos de atenção sejam identificados também de maneira prévia, um exemplo seria o Diagrama Funcional de Blocos, sua criação é feita a partir do detalhamento de tarefas, a partir da identificação das interações de entrada e saída e da análise de possíveis falhas.

Por meio de uma relação completa de ativos e ferramentas, contemplando os setores de manutenção mecânica, elétrica, instrumentação, caldeiraria, operação, saúde e segurança do trabalho, meio ambiente, e mais algum setor que caso participe do compartilhamento de responsabilidades, é feita a Análise de Falhas Funcionais (AFF), que dará origem a implementação do FMEA que irá classificar a gravidade dos efeitos em:

- Seguras, sem impacto para o sistema, as pessoas e o ambiente;
- Marginais, prejudicam o sistema sem gerar maiores prejuízos;
- Críticas, uma intervenção que pode causar danos significativos ao sistema, as pessoas e ao meio ambiente;
- Catastróficas, causam estragos severos ao sistema, as pessoas e ao meio ambiente.

Alguns fatores também são considerados, relacionados as intensidades dos efeitos, como a possibilidade de paralisação da planta; os problemas relacionados a segurança dos trabalhadores e da comunidade do entorno e ao meio ambiente; a frequência de acontecimentos daquele determinado evento; o elevado custo para a manutenção. A decisão final cabe aos integrantes da equipe de implementação, que usam os meios necessários para avaliar os fatores envolvidos.

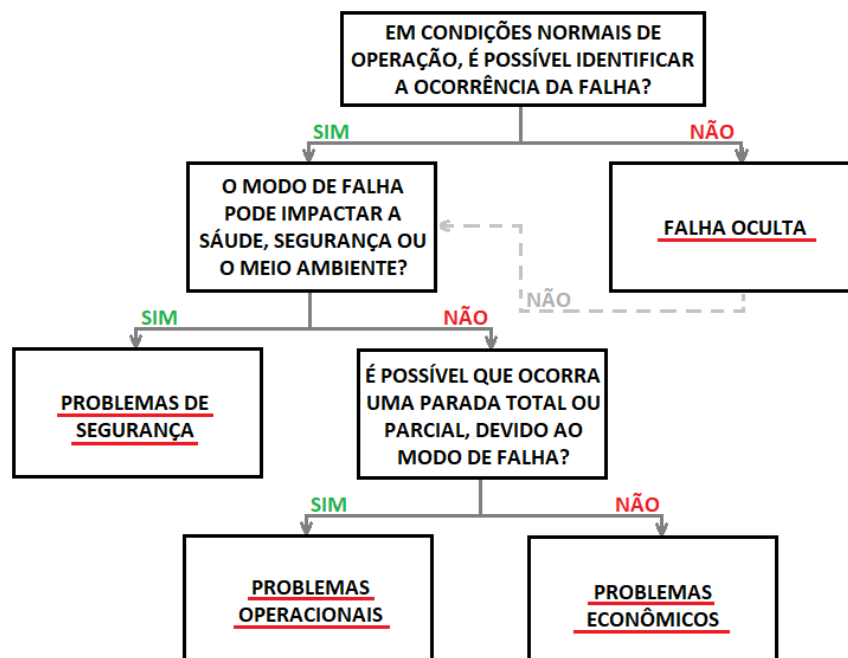
Tabela 02 – Comparativo entre manutenção Tradicional x Centrada na Confiabilidade.

DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS DE MANUTENÇÃO	
MANUTENÇÃO TRADICIONAL	MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE
Focada no ativo (máquinas, equipamentos, ferramentas)	Focada no sistema como um todo
Trabalha para garantir a preservação do maquinário	Atua na busca da perfeita funcionalidade do sistema
Tarefas realizadas na tentativa de reestabelecer o funcionamento, são consideradas como primárias	Tarefas são baseadas nas prioridades e nas criticidades de cada ativo
Não são realizados levantamentos de históricos e análises de tendências, por uma coleta de dados	As análises baseadas nos bancos de dados gerados pelas coletas em campo, são primordiais para a tomada de decisão

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2022.

Conforme o professor Joacyr (2012), é preciso definir as prioridades dentro de um sistema produtivo, a partir de discussões do grupo multidisciplinar, e através de ferramentas objetivas é possível tomar decisões cada vez mais assertivas, diante dos diversos fatores e variáveis envolvidas. E por meio do Diagrama de Decisão, é possível categorizar os inúmeros modos de falha e suas futuras consequências, como impactos operacionais e econômicos; falha na manutenção da garantia e confiabilidade do equipamento; falhas evidentes ou ocultas; também definindo os meios de ação, elencando a priorização de tarefas, de acordo com as necessidades apresentadas.

Figura 10 – Fluxograma de decisão sobre a falha.



Fonte: PALADY, Paul, 1997.

Sendo uma metodologia que otimiza a manutenção de equipamentos ou sistemas, levando em conta o contexto de uso, as possíveis causas e consequências das suas falhas e as estratégias para preveni-las ou mitigá-las, um instrumento que auxilia na escolha das melhores práticas de manutenção. E segundo Moubray (2000), o RCM pode trazer diversos benefícios, tais como: a preservação da segurança das pessoas e do ambiente; a melhoria da qualidade e confiabilidade operacional; redução dos custos e desperdícios com manutenção; a ampliação da vida útil dos ativos; a maior satisfação e engajamento dos colaboradores envolvidos, criando a cooperação e a responsabilidade compartilhada entre os trabalhadores.

2.3. Key Performance Indicators - KPI's

Para gerenciar o sistema de manutenção de forma eficiente, é preciso coletar e analisar os dados de cada processo envolvido, a fim de verificar seu desempenho e suas tendências. Os indicadores de manutenção são instrumentos que auxiliam no monitoramento e no planejamento das atividades, permitindo identificar a situação real da planta e estabelecer novas metas e estratégias para alcançá-las.

Segundo Viana (2002), há alguns indicadores considerados 'Índices de Classe Mundial', pois são adotados pelas empresas que buscam a excelência operacional a níveis globais. No entanto, de acordo com Gomes, Andrade e Costa (2018), cada organização deve escolher os indicadores mais adequados para sua gestão da manutenção, levando em conta os que agregam valor ao seu negócio, e são capazes de otimizar os processos internos, fazendo com que a empresa maximize seus lucros.

Já Zen (2011) sugere que sejam utilizados apenas os indicadores essenciais, conforme a estrutura definida pela organização, para facilitar a interpretação dos resultados. E ainda caracteriza os indicadores de manutenção como parâmetros que refletem não apenas os desafios da manutenção, mas as dificuldades de rotina também do seu cotidiano, Viana (2006).

Afirmado ainda que eles devem mostrar aspectos relevantes no processo da planta, e o planejamento deve definir a melhor forma de monitorar o processo, focando naquilo que traz valor. São medidas, através de números ou percentuais que representam os processos que queremos gerenciar, possibilitando o acompanhamento e a quantificação deles, sendo fundamentais para a decisão.

Para garantia da eficiência e da segurança da planta, é essencial que a manutenção seja monitorada de forma contínua, em todas as etapas do seu processo. O monitoramento das atividades de manutenção envolve a gestão dos resultados alcançados com as ações previstas e executadas.

De acordo com Teles Dutra (2017), o monitoramento da manutenção se baseia na elaboração e na análise de indicadores, que orientam as decisões e as estratégias a serem adotadas. Sem os indicadores da manutenção, não há como avaliar se as decisões são acertadas ou equivocadas, assim como em qualquer outro campo de atuação. Existem diversos indicadores definidos para um monitoramento eficiente das atividades da manutenção. Porém, é preferível ter menos indicadores, mas que esses sejam bem acompanhados.

Antes de definir quais indicadores serão acompanhados, é preciso estabelecer um método para coletar e analisar os dados. Comumente os indicadores mais relevantes são os que estão relacionados aos custos, pois eles não só refletem o valor real do ativo, mas também permitem tomar decisões mais estratégicas. A manutenção é um setor que enfrenta desafios constantes, e os gestores precisam manter a competitividade da empresa, otimizando os custos da manutenção e investindo de forma inteligente, para que os resultados sejam rápidos e sustentáveis.

Figura 11 – Atuação da equipe, após ocorrência da falha.



Fonte: DUTRA, Teles, 2017.

O termo KPI é uma sigla em inglês para *Key Performance Indicators*, que se traduzido seria os Indicadores Chave de Performance, que são capazes de determinar diferentes modos de trabalho, contemplando desde todo o processo produtivo, até o tempo empregado na execução de um serviço, como no tempo de máquina parada.

De acordo com Teles Dutra (2017), o momento de definição dos KPI's, deve seguir as estratégias traçadas no plano de manutenção que será adotado, e partir daí definir as formas de atuação e análise dos indicadores. Um método amplamente utilizado, é conhecido como SMART, uma sigla também, para as iniciais das considerações essenciais, para a definição, são elas:

- *Specific* (seja específico): Escolha indicadores simples e específicas para evitar equívocos posteriores;
- *Measurable* (mensurável): Os parâmetros devem ser comparáveis e quantificáveis com objetivos específicos. De preferência expresso em números;
- *Attainable* (atingível): A meta deve refletir a capacidade da organização, podendo ser agressiva, mas não deve ser impossível;
- *Realistic* (realista): O objetivo deve ser realista, com as condições atuais e não com as condições desejáveis;

- *Timely* (no tempo): Deve ser definido um tempo para que as metas possam ser atingidas, de acordo com o planejado.

Para que os colaboradores possam entender facilmente os parâmetros estabelecidos como KPI's, é importante que sejam claros e preferencialmente valores tangíveis, que possam ser expressos em números. A seguir estão alguns indicadores de desempenho, que são mais usados em um setor de manutenção mecânica e funcionam como pontos chave de oportunidades de melhorias em meio ao processo produtivo. Esses indicadores devem ser usados como um ponto de partida que irá desencadear uma série de ações e tarefas a serem planejadas e executadas.

O planejamento das aplicações de manutenção depende dos tipos de manutenções que estão sendo realizados, sendo divididos em corretivas, preventivas e preditivas. Nos países mais desenvolvidos, recomenda-se que as manutenções corretivas não planejadas, representem no máximo 20% do total de intervenções, enquanto as manutenções preditivas, as inspeções e a engenharia de manutenção tenham maior participação.

No cenário nacional, porém, ainda é difícil alcançar esse padrão, e as manutenções preventivas costumam variar entre 30 e 40% na média, em relação ao total de intervenções de uma empresa, Teles Dutra (2017). Esse valor pode mudar de acordo com o tipo de instalação ou equipamento, a depender do processo e a sua criticidade.

Mean Time Between Failures (MTBF)

Segundo Pimentel Et Al. (2012), o MTBF, que é a sigla em inglês para Tempo Médio Entre Falhas, é definido como o intervalo de tempo que vai do fim de uma falha funcional até o começo de outra". Tendo como objetivo principal, elevar esse tempo cada vez mais, indicando que o equipamento está disponível por mais tempo, e consequentemente, reduzindo a frequência de manutenções necessárias.

$$MTBF = \frac{\text{Somatório das horas de trabalho em bom funcionamento}}{\text{Número de paradas para manutenção corretiva}}$$

Sobre o "somatório das horas de trabalho em bom funcionamento", é importante frisar que as manutenções preventivas não são contempladas, pois o cálculo é relativo as horas funcionamento das máquinas e equipamento. No cálculo é feito a soma de todas os períodos de produção do maquinário em um determinado

tempo, dividido pelo número de intervenções no período. O resultado indicará o tempo médio de funcionamento do equipamento sem que ocorra falhas. Sendo fundamental para a determinação do intervalo entre as manutenções, para realizar alguma análise ou troca, baseado no histórico de ocorrências.

Mean Time To Repair (MTTR)

Segundo Viana (2002), o MTTR, que no Brasil é conhecido como Tempo Médio Para Reparo (TMPR), é um indicador que mostra a qualidade dos reparos realizados. Usado principalmente para avaliar a eficiência das equipes de manutenção corretiva, com ele é possível medir de forma prática quanto tempo as equipes gastam para resolver problemas comuns e recorrentes, buscando identificar as causas raiz das avarias e definir uma estratégia de modo a solucioná-las. Porém diferentemente do MTBF, esse indicador pode ser aplicado de forma global (por setor ou área) e em períodos de curto prazo para auxiliar em análises.

$$MTTR = \frac{\text{Somatório dos Tempos de Reparo}}{\text{Número de intervenções realizadas}}$$

A equação acima mostra as atividades realmente efetivas, que são necessárias para fazer o reparo, sem considerar o tempo de identificação da falha, onde o valor obtido indica a facilidade de manutenção do equipamento, levando em conta a qualificação técnica dos mantenedores, a qualidade do planejamento e programação da manutenção, conforme Hansen (2006).

Disponibilidade Operacional

Segundo a norma ABNT (NBR 5462-1994), o indicador verifica o “desempenho da disponibilidade”, indicando o resultado geral da área de manutenção. Ele informa o tempo em que a máquina ou equipamento esteve disponível, em suas condições normais, para a operação realizar as suas atividades. Esse indicador demonstra diretamente a performance ou desempenho do equipamento em sua vida útil. De acordo com Kardec e Nascif (2009), a disponibilidade inerente, pode ser determinada conforme a equação abaixo, onde o termo ‘inerente’ “implica o fato de somente se levar em conta o tempo de reparo”, assim, descarta o tempo de logística, deslocamento e espera de sobressalentes.

$$\% \text{ Disponibilidade} = \frac{MTBF}{MTBF \times MTTR} \times 100 (\%)$$

Para alcançar a excelência operacional, os equipamentos e instalações devem ter uma Disponibilidade Global de pelo menos 90%, conforme os critérios da “Classe Mundial”. No entanto, Teles Dutra (2017) afirma que valores superiores a 80% já são satisfatórios, embora ainda possam ser otimizados. A alta disponibilidade é a meta da manutenção, pois significa que uma máquina ou equipamento pode funcionar adequadamente, atendendo aos requisitos de tempo e qualidade da empresa, em qualquer momento e sob determinadas condições.

Índice De Retrabalho

De acordo com Freitas (2016), o Retrabalho ou Resserviço, pode ser definido como a proporção de horas gastas além do inicial, em ordens de manutenção que foram encerradas e depois reabertas por algum motivo. Medindo a qualidade dos serviços de manutenção em um sistema técnico, avaliando se as intervenções são eficazes, ou se são temporárias e geram novas falhas no equipamento, a fim de evitar qualquer interferência que possa prejudicar o processo. Portanto, o ideal seria que seu valor fosse o mais próximo possível de zero.

$$\text{Retrabalho} = \frac{\text{Total de Trabalhos Repetidos}}{\text{Total de Serviços Realizados}} \times 100 (\%)$$

Por meio da análise dos retrabalhos, é possível identificar suas origens e solucioná-las. Onde a principal causa dos retrabalhos está ligada a questões de mão de obra, o que evidencia a importância de se apostar no treinamento e qualificação.

Confiabilidade dos Ativos

A manutenção é essencial para o sucesso de qualquer operação, pois dela depende a capacidade e a qualidade dos produtos gerados pelas máquinas e equipamentos. A Confiabilidade, por sua vez, é a disciplina que busca assegurar que os níveis de disponibilidade operacional sejam atingidos, por meio de um planejamento estratégico que envolve todo o ciclo de vida do projeto.

Para Teles (2017), a Confiabilidade visa otimizar a combinação de ações preventivas, preditivas e corretivas, para garantir que os equipamentos funcionem de forma eficiente e confiável.

$$\textit{Falhas Repetidas} = \frac{\textit{Número de Falhas Repetidas}}{\textit{Total de Falhas em Equipamentos}} \times 100 (\%)$$

Para evitar que os equipamentos críticos da companhia sofram falhas repetidas que possam comprometer o desempenho, a qualidade, o meio ambiente e até mesmo integridade dos colaboradores, é necessário realizar um acompanhamento de falhas repetidas (equipamentos crônicos) que identifique as causas e as soluções para os problemas. Esse acompanhamento pode ser feito inicialmente nos equipamentos mais importantes e sensíveis, e depois ampliado para as demais máquinas, garantindo assim uma maior confiabilidade e eficiência dos processos.

Para monitorar os ativos que comprometem a confiabilidade dos processos, podemos utilizar as estratificações, que nos permitem aplicar o gráfico de Pareto. Assim, é possível identificar os equipamentos que apresentaram falhas, quais os motivos dessas falhas e se há algum padrão de quebras na mesma classe de equipamentos. Com base no diagnóstico dos defeitos, realizar a análise de falha, buscando as causas raiz e eliminando as fontes de falhas existentes.

2.4.A análise de falha

Um equipamento que foi instalado na unidade operacional, passa a apresentar duas situações, que seriam: disponível ou indisponível. Quando um item sofre uma pane, perde temporária ou permanentemente sua capacidade de funcionar, ele está em estado de indisponibilidade. Por outro lado, quando um item cumpre a função que se espera dele, ele está em estado de disponibilidade. No entanto, Pallerosi (2007) afirma que nem todo item disponível está livre de defeitos. Defeito é qualquer desvio de uma propriedade de um item em relação ao que se exige dele, sendo uma anormalidade no desempenho da sua função, que pode aumentar a chance de ele falhar no futuro.

Para Pallerosi (2007), as falhas podem ser classificadas em dois tipos: totais ou parciais. A falha completa ocorre quando as características de um equipamento se desviam tanto dos limites estabelecidos, que ele deixa de funcionar totalmente. Já a falha parcial ocorre quando o equipamento ainda funciona, mas de forma reduzida ou inadequada. As falhas podem ser evitadas, se forem detectados logo nos primeiros sinais de desvio, e se forem tomadas medidas para corrigir a falha e mitigar os riscos. É importante analisar qual a causa mais provável e usar algumas ferramentas para identificá-las, segundo Silva Takayama (2015) são algumas:

"Verificações no processo, durante o processo produtivo, os operadores podem realizar verificações a fim de se encontrar falhas que não causam variações no processo;

Diagnósticos de máquinas, podem ser realizados testes de desempenho nas máquinas fazendo-as passar por uma sequência de atividades comuns à sua função a fim de se identificar algum tipo de desvio em seu funcionamento;

Inspeções gerais, no final de um processo ou ciclo predeterminado, a operação ou manutenção pode fazer uma inspeção para verificar se a função está satisfatória ou descobrir problemas;

Grupos de foco, são grupos de pessoas que, em conjunto, focalizem alguns aspectos do produto ou serviço;

Fichas de reclamações ou questionários: são usados para relatar anormalidades do produto ou serviço."

O processo de análise de falhas começa quando o equipamento falha, e tudo o que acontece depois deve ser registrado para que a análise seja eficaz. A colaboração de todos os que têm alguma relação com o equipamento nesse momento é essencial para o progresso da análise.

Existem algumas fontes e formas diferentes de buscar as informações necessárias para a realização de uma análise, mas de acordo com Vanden Heuvel (2005), esses são os quatro tipos principais:

"Pessoas, informações de pessoas são obtidas de através de entrevistas realizadas entre as pessoas que estão envolvidas com o problema. (testemunhas, participantes, operadores, mantenedores, supervisores);

Física, informações físicas consistem em partes do equipamento, resíduos e amostras químicas;

Posição, informações de posição são as relações entre as pessoas, os dispositivos de controle e segurança e as relações temporais, a fim de definir a sequência dos eventos e ajudar a identificar as relações de causa-efeito (localização das pessoas e evidências físicas);

Papel, informações em papel são documentos em papel ou eletrônicos (procedimentos, memorandos, correspondência, manuais)."

A coleta de dados é considerada a base da análise, mas não se limita ao começo do processo. Ela continua até o fim do problema, pois podem aparecer detalhes que não foram notados no início. E segundo Amaral Afonso (2002):

"A grande variedade de fatores de influenciam na interpretação de um problema real e a importância que o conhecimento e julgamento pessoais têm na correta análise de uma falha (...).

Embora esses métodos e conhecimentos aplicados, venham sendo utilizados com sucesso há bastante tempo."

De acordo com Amaral Afonso (2002), quando um componente ou um equipamento deixa de cumprir a sua função com eficiência e segurança, dizemos que houve uma falha. A análise de falhas tem como propósito principal prevenir que elas não se repitam. Para isso, é preciso investigar as causas fundamentais da falha e usar essa informação para implementar ações corretivas adequadas. A função do componente ou do equipamento é um aspecto importante na análise, pois define o critério de desempenho esperado.

Algumas vezes, os componentes têm uma vida útil determinada pelo projeto, ou seja, um tempo estimado para que possam funcionar sem falhas. Nesses casos, se o defeito ocorrer antes desse tempo, será considerado uma falha, em outras situações, os componentes não têm uma vida útil definida pelo projeto, ou podem falhar por motivos não previstos na concepção, assim qualquer defeito será considerado uma falha. A partir do momento em que um sistema ou componente, não consegue mais desempenhar sua função com segurança, é preciso analisar a falha para entender as razões dessa deterioração.

Uma análise de falha só tem sentido se levar a ações corretivas que melhorem o sistema, caso contrário, é um trabalho inútil. Mas para isso, é necessário identificar as causas físicas da falha, pois sem elas não há como propor soluções. Além de saber por que as máquinas falham, também é importante saber por que algumas máquinas não falham, e estudar os projetos daquelas máquinas que operam por longos períodos sem problemas pode nos ensinar a prevenir quebras de outras similares.

Amaral Afonso (2002) ainda define as principais causas fundamentais das falhas, em:

Falhas de projeto

Quando o projeto do equipamento tem detalhes que podem causar problemas, temos as falhas de projeto. Esses defeitos já estão presentes no desenho do equipamento. Por exemplo, podem ocorrer entalhes mecânicos, mudanças de projeto ou critérios de projeto inadequados que afetam o desempenho do equipamento.

Falhas na seleção de materiais

Nesse caso, o material usado para construir as peças das máquinas não é o mais adequado para o serviço que deve fazer, e isso gera incompatibilidade e deterioração. Esse caso é diferente do caso anterior, pois o defeito não está no desenho do equipamento, mas na escolha do material.

Imperfeições no material

Imperfeições no material podem ser a origem de muitas falhas. Defeitos internos e externos diminuem a resistência mecânica das peças, facilitam a propagação de trincas ou favorecem o início de corrosão localizada. As imperfeições no material estão relacionadas a falhas de processamento durante a produção da matéria-prima para a construção dos componentes. Alguns exemplos de imperfeições ligadas ao processo de fabricação são: Peças fundidas (Inclusões, gotas frias, vazios, porosidade); materiais Forjados (Dobras, emendas, contração); peças Laminados (Dupla laminação, de coesão lamelar).

Deficiências de fabricação

Definidas como defeitos que ocorrem no material durante a produção dos componentes ou dos equipamentos. Esses defeitos podem ser confundidos com falhas do próprio material, mas é importante distingui-los para tomar a medida

corretiva adequada. Alguns exemplos de processos que podem gerar falhas de fabricação são:

- A conformação a frio, que gera tensões residuais elevadas, que podem afetar o desempenho da peça quando submetida a cargas cíclicas;
- A usinagem frequente, que cria pontos de tensão em ranhuras, marcas para identificar as peças por impacto ou por eletroerosão, que podem provocar falhas se feitas em áreas muito tensionadas;
- O Tratamento térmico inadequado, que pode ocorrer de diversas formas, como por superaquecimento, variação de temperatura muito rápida, uso de temperaturas incorretas para têmpera e revenimento;
- E a soldagem, que pode provocar diversos tipos de defeitos, como os já mencionados anteriormente;

Erros de montagem e/ou instalação

São ocorrências comuns, muitas vezes, relacionados a falhas humanas. problema encontrado em qualquer tipo de peças, sendo típicos os exemplos ligados à montagem de rolamentos (impactos, sujeira), no ajuste das folgas de peças móveis, em parafusos soltos, mancais e eixos montados desalinhados, tubulações que exercem esforços excessivos nos bocais do equipamento. normalmente pode ser prevenido com elaboração de bons procedimentos, treinamento e auditorias.

Condições de operação ou manutenção inadequadas

A operação do equipamento em condições extremas de velocidade, carga, temperatura e ataque químico ou sem monitoração, inspeção e manutenção, aumenta muito as chances de falhas em serviço. Tem especial relevância a operação de equipamentos rotativos em condições diferentes daquelas para as quais ele foi projetado. Essa ocorrência é bastante frequente na indústria de processo e é responsável por uma grande parte das falhas de máquinas.

- Em meio a partida, o equipamento enfrenta desafios especiais ao ser ligado, pois sofre com situações que não ocorrem na rotina normal, como alterações bruscas de funcionamento, variações intensas de temperatura e outras anormalidades;

- Ao ser desligado, também fica vulnerável às mudanças mencionadas e precisa de cuidados especiais para preservar sua integridade durante o tempo ocioso;
- A manutenção inadequada é um fator que pode provocar falhas graves, por isso os procedimentos de manutenção devem ser sempre verificados quando houver algum problema, para analisar sua influência no resultado;
- Os erros de operação, devido à falta de procedimentos claros e adequados, treinamento insuficiente ou descuido da equipe. Sendo preciso avaliar constantemente os procedimentos operacionais e fiscalizar as práticas reais.

Conforme Amaral Afonso (2002), para entender e evitar uma falha de equipamento mecânico, é preciso investigar a trajetória do equipamento ou componente de forma reversa até chegar a um ponto onde se possa aplicar medidas preventivas que impeçam sua recorrência. Esse ponto ideal nem sempre é fácil de encontrar, pois as causas básicas podem estar fora do controle do analista. Por exemplo, problemas que tenham como causa básica algum fator que não possa ser eliminado por limitações técnicas ou econômicas. Nesse caso, o responsável pela execução deve buscar, com o apoio das técnicas apresentadas no texto, uma ação que bloqueie de forma efetiva a repetição do problema observado.

E ainda afirma que antes de realizar qualquer alteração no projeto, operação e manutenção dos equipamentos de uma indústria de processo, é fundamental fazer uma análise de risco para avaliar os possíveis impactos da mudança na segurança, qualidade e produtividade do sistema. Essa recomendação também se aplica a qualquer mudança nos procedimentos de manutenção e operação. Nenhuma mudança deve ser feita sem uma análise cuidadosa das consequências provocadas pela alteração.

Para prevenir que as falhas se repitam, é preciso analisá-las com cuidado. A investigação deve esclarecer os motivos que levaram à falha, e deve ser usada para implementar medidas corretivas que evitem o mesmo problema no futuro. Onde a função do componente ou equipamento deve ser levada em conta na análise, que só será classificado como falha, caso ele aconteça antes do tempo esperado para o modo de falha. Uma análise de falhas que não orienta ações corretivas é inútil, pois sem identificar as causas físicas do desgaste, não há como melhorar o sistema.

Amaral Afonso (2002), ainda lembra que, além de compreender por que as máquinas se desgastam, devemos investigar por que algumas máquinas resistem. Ao conhecer os detalhes de projetos daquelas máquinas que operam por anos sem problemas, podemos prevenir quebras de outras similares.

As falhas costumam ter causas diversas, geralmente uma falha de bomba centrífuga pode ter de 4 a 7 causas, sendo que algumas dessas causas, certamente degradam mais o sistema do que outras, mas é fundamental identificar, diagnosticar e aplicar medidas preventivas para todas as causas. Por exemplo, uma falha de rolamento pode ter sido causada por uma contaminação do óleo não percebida; ou possivelmente pela entrada de água na caixa de mancais por causa da falta de vedação adequada; ou até mesmo pelo costume de lavar as bombas com jato de água. Nesse caso, é preciso atuar na vedação da caixa de mancais, nos procedimentos de limpeza da unidade e na rotina de verificação do estado do óleo.

O prejuízo causado pelo evento, levando em conta desde as perdas financeiras, até eventuais danos físicos ou ambientais, vai definir o nível de detalhamento da análise que será realizada. Uma análise abrangente do evento, chamada *Root Cause: Failure Analysis*, só será feita se for viável, e para decidir isso é usada a seguinte metodologia:

- Para as falhas esporádicas, que não tenham causado perdas de produção ou riscos de acidentes ou danos ambientais, a análise deve ser feita pela pessoa responsável por reparar o equipamento e o seu superior. O processo é chamado de *5 Why* (5 Por quês?) pois consiste em questionarmos umas cinco a seis vezes a causa dos eventos;
- Para as falhas repetitivas no equipamento, quando se trata de falhas que causaram perdas de produção ou falhas que geraram risco de acidentes ou impacto ambiental, a análise da falha deve ser feita por um grupo formado por um especialista em manutenção do equipamento, um da operação, e um representante do grupo técnico ou de engenharia da fábrica. Todos na análise devem ter conhecimento dos fatos, preferencialmente obtidos por observação pessoal das evidências e dos relatos recebidos. Esse processo é chamado de Eliminação de Defeito
- Para acidentes considerados catastróficos, o objetivo é esclarecer a origem do problema e definir as medidas preventivas. Esse procedimento,

geralmente, é chamado de “*Root Cause: Failure Analysis*”, que se traduzido, seria a análise de causa raiz da falha, exigindo um grande trabalho para uma investigação abrangente.

Cinco porquês

Para melhorar a confiabilidade e diminuir os custos, é essencial que a cultura de confiabilidade seja difundida de forma ampla, geral e irrestrita. Essa cultura se manifesta quando os colaboradores têm uma atitude questionadora e proativa na resolução de problemas, buscando responder duas perguntas: Qual foi a causa da falha? E como podemos evitar que ela se repita?

Um método criado pelo grupo Toyota na década de 50 para encontrar a causa dos problemas é o “*Five Why*” (cinco porquês), que consiste em perguntar por que o problema aconteceu de cinco a seis vezes. Geralmente, a causa raiz do problema estará próxima da 5ª ou 6ª resposta. E assim definir uma ação corretiva, implementar as mudanças necessárias e acompanhar os resultados obtidos, importante compartilhar os sucessos com toda a organização e padronizar as boas práticas.

A seguir, segue um modelo de aplicação dos 5 porquês, durante a análise de falha de uma bomba centrífuga, onde é possível identificar que o diferencial do método, é a simplicidade para ser usado, realizado pelo próprio profissional da manutenção, responsável pelo equipamento, em conjunto com o supervisor e demais trabalhadores que poderão somar na análise e propor possíveis ações. Consiste na ordenação lógica das fases de uma falha.

Tabela 03: Exemplo aplicação do “*5 Why*” na AF de Bomba.

	PERGUNTA	RESPOSTA
PORQUE 1	Por que a bomba não funciona?	Está ocorrendo um vazamento pelo selo
PORQUE 2	Por que o selo apresentou vazamento?	As faces estavam com alta rugosidade
PORQUE 3	Por que as faces estavam rugosas?	Devido ao sobreaquecimento do material, e a vaporização do <i>flush</i>

	PERGUNTA	RESPOSTA
PORQUE 4	Por que houve a vaporização do flush?	Porque teve um elevado aumento na temperatura
PORQUE 5	Por que o flush teve um sobreaquecimento?	O resfriador estava parcialmente entupido com particulados
PORQUE 6	Por que ocorreu o entupimento?	Não foi realizada a retro lavagem do equipamento após as intervenções no sistema técnico

Fonte: Amaral Afonso - Petrobras (adaptado), 2001.

Eliminação de defeitos

Amaral Afonso, em *Análise de Falha e Soluções de Problemas* (2002), determina que para eliminar os defeitos, é preciso aprofundar a análise do “*Five Why*”. Para isso, é necessário formar um time multifuncional com pessoas da manutenção, da operação e da engenharia, que vão participar de acordo com o tipo ou classe do problema. Além disso, pode-se contar com a ajuda de colaboradores de outras especialidades para ampliar a análise. Quando se trata de falhas de maior impacto, é preciso seguir um protocolo mais rigoroso em todas as etapas, registrando sistematicamente as observações e conclusões. O protocolo se divide em quatro etapas:

- Levantamento de dados, analisando as condições das peças que apresentaram defeito, o histórico de reparos e trocas realizados, as medidas de vibração e desempenho das peças ao longo do tempo, os relatos dos operadores sobre possíveis problemas ou anormalidades, e os dados de operação que indicam o modo e a intensidade de uso dos equipamentos;
- Organização dos dados, é preciso organizar tudo em uma sequência lógica e temporal. Assim, é possível mostrar como os dados se correlacionam, e quais são as causas e consequências dos eventos;
- Analisar os dados, é preciso identificar quais são os eventos que poderiam ser alterados ou eliminados. Podendo envolver desde equipamentos, a processos ou pessoas, que tenham alguma relação com a falha;

- Implementação de melhorias e relatórios, os responsáveis pela análise, devem divulgar um relatório com as seguintes informações: o que deu errado no equipamento, por que investigaram, quanto custou a solução, qual foi a causa da falha, o que fizeram para resolver, quem vai verificar se deu certo, quando será executado e como serão avaliados os resultados da mudança.

Tabela 04: Possíveis causas de falhas críticas.

TIPO	CAUSAS
MÁQUINAS	Peças com defeitos; projeto inadequado; falhas não previstas pelo sistema de monitoramento; uso de ferramentas inadequadas
PROCESSOS	Planejamento equivocado; revisão inadequada; interface IHM (homem máquina) complicada; má elaboração de procedimentos; falta de treinamentos; controle de qualidade indevido; falta de recursos
PESSOAS	Erros de ajuste ou montagem; componentes errados; operação incorreta; distrações no ambiente de trabalho; violação de regras e procedimentos; falha de atenção ou comunicação; manutenções feitas erradas

Fonte: Amaral Afonso - Petrobras (adaptado), 2001.

Root Cause Failure Analysis (RCFA)

O processo de *Root Cause Failure Analysis*, que se traduzido seria Análise da Causa Raiz de Falhas (ACRF), é uma ferramenta que permite identificar com precisão o fator primordial que originou um evento indesejado. Suas principais características são: ser realizado por uma equipe multidisciplinar que reúna os responsáveis de cada área afetada, juntamente com as pessoas que têm conhecimento do problema; utilizar um método formal como o FMEA ou uma árvore de falhas, para a determinação da causa raiz; e ser considerado um processo de alto custo financeiro e temporal, podendo levar de semanas a meses para elaboração de uma RCFA completa.

De acordo com Amaral Afonso (2002), sua aplicação é ideal para casos em que as falhas possam comprometer o funcionamento de toda a empresa e a viabilidade

do negócio. Ou que exista a possibilidade de ocasionar em incidentes ou até mesmo acidentes, que comprometam a saúde e segurança dos colaboradores e do meio ambiente.

Coleta de dados

O estudo das falhas dos componentes, é facilitado quando se dispõe do histórico de alarmes, desde a sua fabricação até a instalação e operação, incluindo também as condições que provocaram a falha. É inviável determinar a causa raiz de uma falha sem obter e analisar os dados relacionados a ela. Onde a primeira ação a ser tomada é referente a coleta de dados sobre a:

- Fabricação da peça, estudo da composição, propriedades, fabricação (modelagem, soldagem, conformação, tratamento térmico), desenho do objeto;
- Histórico operacional, condições de funcionamento, detalhes das forças aplicadas, até mesmo as imprevistas, temperaturas, detalhes de dados operacionais, como fluxos, pressões, temperaturas;
- Registros fotográficos, devem ser levantadas as evidências fotográficas necessárias, a fim de traçar um comparativo da evolução do processo;
- Seleção das amostras, são selecionadas as amostras relevantes, e todas as peças do equipamento devem ser inspecionadas. Concentrando a análise no componente que falhou primeiro, na tentativa de identificar a causa da falha;
- Condições anormais, na busca de entender melhor a falha, é preciso verificar se houve algum problema no funcionamento do equipamento;
- Descrição do funcionamento do mecanismo, é preciso entender como ocorreu a falha, levando em consideração o tamanho, o contato, o espaço e o movimento das peças, e suas interações.

Testes e inspeções

Quando identificada uma peça danificada que foi substituída, e imprescindível que seja feita uma rigorosa inspeção prévia, podendo ser até mesmo visual, antes mesmo da limpeza dos componentes, pois em alguns casos até mesmo os resíduos

presentes no material, são importantes no prosseguimento das análises, para determinar o modo de falha.

Para que seja realizada uma boa execução a partir das amostras obtidas é necessário seguir algumas etapas. O primeiro passo é olhar e fotografar as partes quebradas, desgastadas ou enferrujadas, mostrando como elas são, quanto medem e como parecem para comparar depois; observar se houve alteração no toque ou na cor; e definir como a falha ocorreu (fadiga, fratura frágil, desgaste, corrosão). Após são realizados os testes não destrutivos, usados para determinar a existência de outras trincas além daquelas observadas a olho nu, com a determinação do tipo e a extensão do exame, atrelada ao tipo de peça.

Posteriormente aos não destrutivos, são feitos os testes mecânicos, ou testes destrutivos, medir a dureza do material pode dar pistas para a análise, como saber se a peça foi muito aquecida, que mostra mais ou menos a força do material, e se as suas propriedades forma alteradas. A partir daí, já são realizadas as análises químicas, e de possíveis resíduos que possam contaminar o componente, onde a sua origem pode ser determinante na busca da causa da falha. E por fim, mas não menos importante, voltado para as análises de falhas aplicadas em conjuntos ou mecanismos, é sempre recomendando que seja feito uma retrospectiva dos eventos que ocorreram, que puderam ocasionar a falha.

Relatórios e bancos de dados

Após o término do trabalho é necessário registrar o que foi feito. Para o processo simplificado como o "5 Why", basta inserir a análise ao banco de dados de falhas. Já para um processo de Eliminação de Defeitos é feito um relatório contendo os dados listados. Enquanto uma RCFA terá relatórios específicos. As informações precisam estar em um banco de dados, que possua informações como: os dados dos equipamentos que estão na fábrica, as vezes que intervirem nos equipamentos para consertá-los, e emitir relatórios estatísticos baseados nos dados recolhidos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho refere-se a uma pesquisa aplicada, qualitativa, descritiva e com delineamento bibliográfico, utilizando um estudo de caso da importância da devida utilização da análise de falha na busca das causas raízes de problemas, relacionados aos equipamentos dinâmicos do setor de manutenção mecânica de uma refinaria de Petróleo. Foi feita uma revisão bibliográfica sobre o assunto para se conhecer as diversas informações disponíveis que envolvem o tema e coletar as informações iniciais que irão compor o trabalho, conforme exposto na tabela 05.

Trata-se de uma pesquisa aplicada utilizando o estudo de caso, porque podem ser replicada as ideias propostas sobre manutenção, em diversos setores da indústria, na busca por melhores práticas que garantam o sucesso do setor, de modo a agir com eficiência nas intervenções necessárias. É uma pesquisa qualitativa e descritiva pois faz uma descrição da manutenção como um todo, abordando a importância da análise de falha e ainda expondo algumas ferramentas da qualidade, que proporcionam melhorias para o setor e como elas são aplicados.

Para realizá-la foram efetivadas pesquisas em outros trabalhos acadêmicos; livros; artigos científicos; conversas com profissionais experientes da companhia do setor de óleo e gás; e a experiência adquirida no setor de manutenção, com as vivências dos desafios cotidianos. Em um mundo altamente envolvido por tecnologias, a consulta de materiais ocorreu em sites como: Google Acadêmico; periódicos Lattes; biblioteca virtual Pearson; e através de consultas e empréstimos de livros físicos da Universidade Petrobras.

Na tabela 05 é apresentada uma síntese dos materiais de consulta que foram usados para a confecção do trabalho.

Tabela 05 - Materiais usados para a construção do trabalho.

TIPO DE MATERIAL	QUANTIDADE
Trabalhos acadêmicos	06
Livros	12
Artigos científicos	09
Publicações <i>online</i>	07

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As bombas centrífugas são dispositivos mecânicos que utilizam a força centrífuga para impulsionar um fluido através de um sistema de tubulações. São amplamente empregadas em diversos setores industriais, como por exemplo o de petróleo e gás, por sua eficiência, versatilidade e baixo custo de manutenção. No processo de refino de uma petrolífera, as bombas centrífugas são responsáveis por transportar o óleo bruto e seus derivados entre as diferentes unidades de tratamento, na separação, destilação, craqueamento, hidrotreatamento e outros. Além disso, também são usadas para injetar água, vapor, produtos químicos e gases nos reservatórios, visando aumentar a recuperação e a produtividade dos poços.

Dada a importância das bombas centrífugas para o processo de refino de uma petrolífera, é fundamental que elas operem com confiabilidade, segurança e eficácia. No entanto, esses equipamentos estão sujeitos a diversas falhas que podem comprometer seu desempenho e causar perdas econômicas, ambientais e humanas. Algumas das principais causas de falhas em bombas centrífugas são: desgaste, corrosão, erosão, cavitação, desbalanceamento, desalinhamento, vibração excessiva, sobrecarga, defeitos nos rolamentos, selos ou acoplamentos, entre outras. Por isso, é essencial que seja realizada uma análise de falha, sempre que uma bomba centrífuga apresentar algum problema ou defeito.

A análise de falha é um método sistemático que visa identificar a causa raiz de um problema em um equipamento ou sistema, envolvendo a coleta e a análise de parâmetros, operacionais e históricos do equipamento ou sistema técnico em questão, bem como a aplicação de técnicas de investigação e solução de problemas. O objetivo da análise de falha é determinar o que aconteceu, como aconteceu, por que aconteceu e como evitar que aconteça novamente. A análise de falha pode trazer diversos benefícios para uma indústria, tais como: reduzir os custos de manutenção das bombas centrífugas; aumentar a disponibilidade e a eficiência dos equipamentos; melhorar a qualidade e a segurança dos produtos; prevenir acidentes e danos ambientais; otimizar os recursos e os processos; e gerar aprendizado organizacional, na disseminação do conhecimento, através da análise conjunta do ocorrido.

Desse modo, considerando que as bombas centrífugas são equipamentos fundamentais para os processos em uma indústria de refino, e que a execução da análise de falha é uma ferramenta indispensável para garantir o bom funcionamento

dos ativos. E baseado nessa condição, foi utilizado como objeto de estudo nesse trabalho de conclusão de curso, uma análise de falha de uma bomba hidráulica, onde a diagnose foi solicitada pela fiscalização de campo da companhia. Como forma de ilustrar como uma análise é desenvolvida nos moldes da empresa, apresentando um caso prático de uma falha em uma bomba centrífuga, que servirá como exemplo para aplicar os conceitos teóricos discutidos ao longo do trabalho desenvolvido.

Todo o processo de análise é iniciado a partir da solicitação da fiscalização de campo da refinaria, que ao notar uma recorrência de desvios e falhas do equipamento nos últimos anos, e que os indicadores de controle dos processos de manutenção estão fora do esperado, como o de tempo médio entre intervenções (TMEI) e o tempo médio para reparo (TMPR). É realizada então uma solicitação por parte dos representantes do setor, que sinalizam a necessidade, através de um questionário, contendo as informações pertinentes sobre o modo de falha do equipamento e os KPI's de controle, conforme abaixo.

Tabela 06 – Solicitação de análise de falha, da bomba de circulação de água.

Ordem	2026174180			Data/Hora de Início da Avaria	07.03.2022- 07:30:00				
TAG	0209-P-0001B			Data/Hora de Fim da Avaria	02.04.2022- 00:00:00				
Emitente				TMEF (Tempo Médio Entre Falhas)	8,40				
Empresa Contratada				TMPR (Tempo Médio Para Reparo)	42,07				
Empresa Contratante				DISP (Últimos 12 meses)	2,53				
Código ABC	A			ZF Data Fim de Avaria < 3 Meses	SIM	x	NÃO		
Resserviço	SIM		NÃO	x	Ocorrência Perda/Redução de Carga	SIM		NÃO	x
Dados do Equipamento	Bomba de circulação de água da caldeira de regeneração								

Fonte: Relatório de análise de falha, 2022.

E a partir da solicitação recebida, alguns parâmetros importantes já são identificados, como o número da ordem aberta no sistema interno, para planejamento e controle da intervenção em andamento; o TAG do equipamento, que seria a identidade da bomba centrífuga, que determina a unidade operacional onde é aplicada, o tipo de equipamento, e o número de instalação na área; uma descrição breve do equipamento; os dados da última avaria ocorrida, como data e hora do início e fim da falha a ser analisada; os indicadores que sinalizaram a necessidade de realização da análise de falha; a recorrência do desvio; e o impacto do problema.

Informações que norteiam a elaboração da análise, dando o suporte necessário para início da investigação. Por meio desse formulário de solicitação é possível

identificar que a bomba centrífuga opera com redundância, ou seja, na unidade operacional existem duas bombas idênticas, pertencentes ao mesmo fabricante e com as mesmas especificações de projeto, identificadas como bombas “A” e “B”, que estão montadas em paralelo, mas que apenas um dos equipamentos opera por vez.

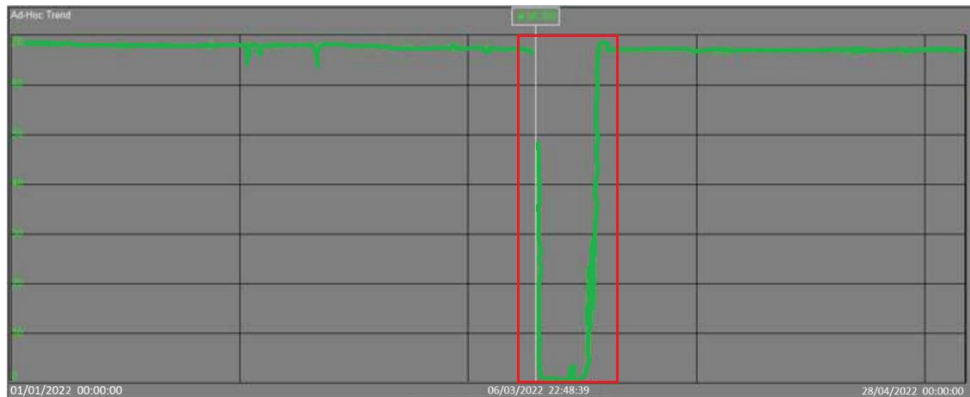
Essa situação ocorre por dois motivos principais, o primeiro seria a criticidade do processo no qual o equipamento é utilizado, com a necessidade de manobrá-las em campo quando necessário, uma vez que o processo de refino é altamente dinâmico e que as unidades não param durante a campanha de operação, existe a obrigatoriedade de intercalar o funcionamento dos equipamentos, como forma de maximizar o tempo de vida útil dos equipamentos e prolongar o tempo médio entre intervenções.

O outro motivo dos equipamentos estarem instalados paralelamente em campo, é para casos em que ocorra uma parada emergencial do equipamento em funcionamento, a operação consiga manobrar a substituição do fluxo entre os equipamentos rapidamente, colocando em operação o equipamento que estava em stand-by, seja através do sistema supervisorio de controle, ou até mesmo manualmente em campo.

Através da ordem de manutenção aberta no sistema interno de controle da empresa, já no título “Equipamento Travado” identificado que o equipamento que estava em operação em campo teve uma parada não programada. E ainda um breve descritivo do ocorrido, informando que durante a operação a bomba “B” o equipamento apresentou falha e ocasionou uma parada repentina de funcionamento. A situação foi agravada pelo fato da bomba “A” que deveria ser colocada em operação instantaneamente a partir da parada da similar, não pode partir pois estava ocorrendo uma intervenção por parte da equipe de caldeiraria nas tubulações, e para isso foi necessário realizar o bloqueio e liberação do equipamento.

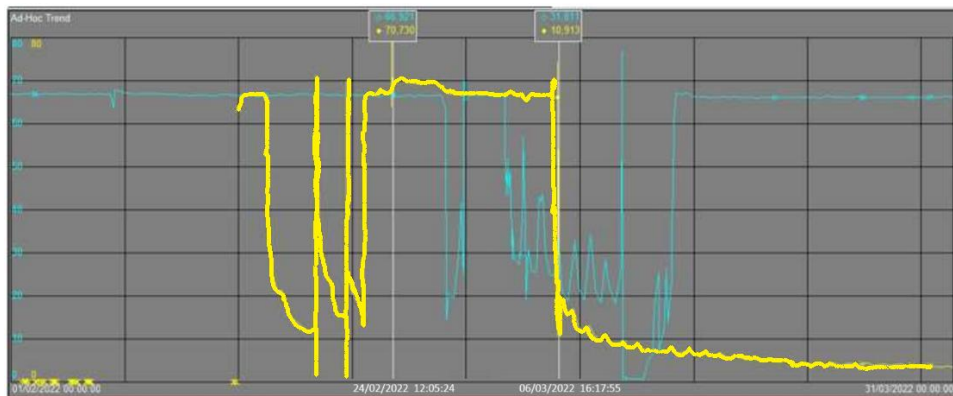
Sendo assim, no dia 06 de março de 2022 às 22:48, ocorreu uma queda total de pressão na linha de descarga da bomba, aproximadamente 12 horas antes do equipamento apresentar falha. E através do gráfico 02, indicando o controle do sistema supervisorio (SDCD) da pressão de selagem, é possível afirmar que a bomba "B" operou normalmente, entre os dias 24/02/2022 e 06/03/2022, identificado pela linha amarela no segundo gráfico exposto abaixo.

Gráfico 01 – Pressão na linha de descarga.



Fonte: Sistema supervisorío de controle (SDCD), 2023.

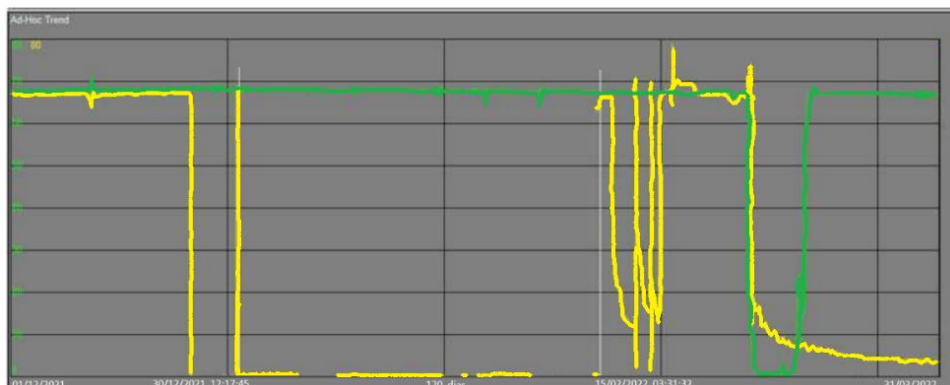
Gráfico 02 – Pressão de selagem.



Fonte: Sistema supervisorío de controle (SDCD), 2023.

E ao comparar a pressão de descarga das bombas, com a pressão de selagem da bomba "B" (identificada em amarelo), é possível afirmar, que a bomba se encontrava fora de operação, enquanto a bomba "A" (identificada em verde) operava normalmente desde 30/12/2021 até 15/02/2022, conforme trecho do gráfico 03.

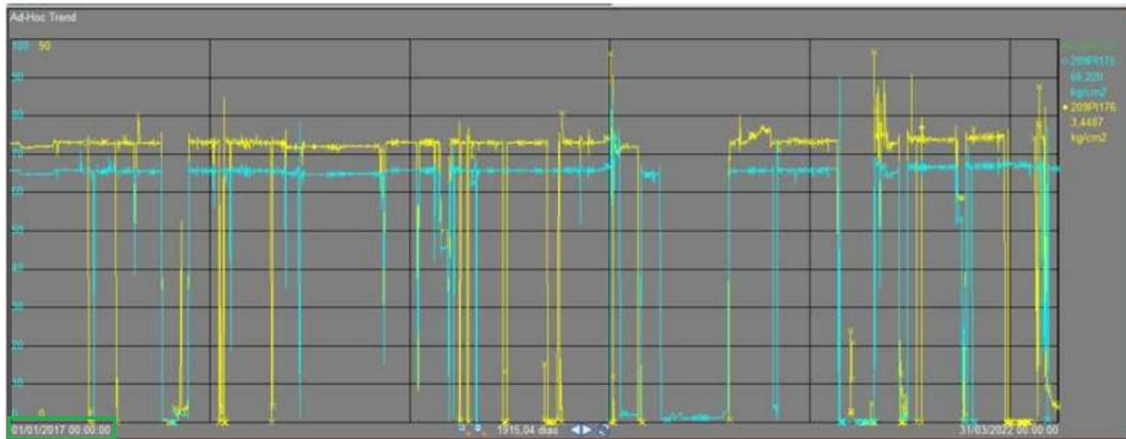
Gráfico 03 – Pressão na linha de descarga X Pressão de selagem.



Fonte: Sistema supervisorío de controle (SDCD), 2023.

A hipótese de que a falta de indicação de pressão de selagem poderia ter sido ocasionada devida à falha do instrumento de medição pode ser descartada, pois ao observar o histórico de controle do sinal, quando estendido para os anos anteriores, mostra que ele é bastante confiável, sendo possível acessar registros de medições realizadas desde o ano de 2017, conforme exposto no gráfico 04.

Gráfico 04 – Histórico de medições do instrumento desde 2017.



Fonte: Sistema supervisor de controle (SDCD), 2023.

Considerando que conforme o histórico de registro de manutenções, a última intervenção no equipamento por parte da equipe de manutenção mecânica em equipamentos dinâmicos, havia ocorrido ainda no ano de 2020, é viável afirmar que a bomba se encontrava instalada em sua posição normal de trabalho por todo esse período em que esteve fora de operação, uma vez que todas as manutenções são registradas no sistema interno de controle (SAP).

Realizando uma análise desse histórico das intervenções sofridas pelas duas bombas nos últimos dez anos, a avaliação deixa claro que a falha do selo mecânico constitui o principal problema de confiabilidade desses equipamentos durante o período, afetando ambas na mesma intensidade. Mas já a falha de rolamentos, no período recente estava praticamente restrita à bomba "B", durante os últimos três anos.

Conforme relato da equipe de manutenção que realizou a intervenção na bomba, durante a desmontagem do equipamento em bancada, foi identificada uma falha destrutiva do mancal de escora, através de inspeção visual dos técnicos.

Tabela 07 – Histórico das intervenções nas bombas (2012 a 2015).

DATA	ITEM	SERVIÇO	OS	OBSERVAÇÕES
26/11/2012	0209-P-0001B	0209-P-0001B VAZAMENTO SELO MECANICO	2009825094	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório físico, número 2601, com entrega no dia 07dez2012. No relatório físico consta expressamente que só foi substituído o SELO MECÂNICO , mas no SAP consta a retirada de rolamentos conforme o NM 10.016.779, SKF 7310-BE-M-CB ou FAG 7310-B-MPUA. Foi assumido que, nesta ocasião, os rolamentos não foram trocados.
01/07/2013	0209-P-0001B	0209-P-0001B MODIFICAÇÃO CAIXA DE MANCAL	2009479328	Conforme orientação técnica arquivada na pasta física em fevereiro de 2013, presume-se que nessa ocasião foi decidida a re instalação a caixa original, com alteração para que fosse ou implementada ou mantida a névoa-purga (aparentemente, a caixa alternativa instalada em 2009 seria névoa pura). Não há relatório salvo no SAP. Na lista de componentes, aparece a retirada de rolamentos pelo NM 10.016.687, mas isso é inconsistente com a documentação da bomba, já que as medidas não batem (o NM pede FAG 7313 B-M-PUA ou SKF 7313 BE-M-CB). No SAP, consta a nota avulsa "209-P-018 MODIFICAÇÃO CAIXA DE MANCAL AR nº 1506532 BOMBA SUBSTITUÍDA PELO FABRICANTE NA PARADA DE MANUTENÇÃO HC/2014". Não há relatório físico correspondente, mas a troca da caixa implica que foram usados ROLAMENTOS novos nesta ocasião. Aparentemente, essa caixa "velha" foi substituída por uma caixa "nova" em 2015 (ver OS 2013726668).
05/10/2013	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO NO SELO	2011095501	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório simplificado, número 3143, datado de 01nov2013, que reporta a troca do SELO MECÂNICO . Considerando esse relatório e as informações da OS, deduzimos que não houve intervenção nos rolamentos.
02/06/2014	0209-P-0001B	0209-P-0001B VAZAMENTO DE SELO	2011735515	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório físico, número 3390, com entrega no dia 13mai2014. Relatada a troca do SELO MECÂNICO . A data de início no SAP deve ter sido adulterada, considerando que as datas de início e fim da avaria são consistentes com o relatório físico. Pelas anotações em ambos, é possível afirmar que os rolamentos não foram trocados.
26/11/2014	0209-P-0001B	0209-P-0001B VAZAMENTO SELO	2012457266	Pela lista de componentes, substituição do SELO MECÂNICO , enquanto os rolamentos foram mantidos. Não foi encontrado relatório, seja físico, seja anexado ao SAP.
23/03/2015	0209-P-0001A	0209-P-0001A MODIFICAÇÃO CAIXA DE MANCAL	2007344128	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório físico, número 3893 e data de entrega 27mar2015, que reporta a troca do SELO MECÂNICO e que informa que a caixa de mancal foi trocada por oportunidade. Não é identificada a OS nesse relatório, mas as datas são coincidentes. Não foi encontrado nenhum esclarecimento técnico acerca da troca da caixa, e em especial, não está claramente e especificada a caixa que foi instalada (apenas é mencionado "caixa mancal completa ITT"). Não existe identificação dos rolamentos no relatório. No SAP, consta a retirada de ROLAMENTOS conforme o NM 10.016.779, SKF 7310-BE-M-CB ou FAG 7310-B-MPUA.
17/06/2015	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO SELO	2013222347	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório simplificado, número 4140, que reporta a mesma falha, mas que identifica a entrega em 31jul2015, o que não é consistente com nenhuma data no SAP, embora elas sejam próximas (pelo SAP, entrega de 19jun2015). Assumimos que se trata do mesmo evento, com registro de datas incorreto. O relatório físico informa que foi substituída a caixa "nova" pela caixa "velha" devido à indisponibilidade de selo mecânico apropriado. Esse relatório reporta ainda que, quando desmontada, na caixa "nova" os rolamentos se encontravam fundidos. Logicamente, pela descrição dos eventos, a bomba foi montada com ROLAMENTOS novos, mas não existe registro de retirada no SAP. Existe ainda uma anotação relatando a mudança do sistema de névoa pura para névoa-purga.
20/10/2015	0209-P-0001B	0209-P-0001B VAZAMENTO DE SELO	2013726668	Não há relatório salvo no SAP. Há um relatório, número 4285, com entrega em 28out2015. Substituição dos selos devido a vazamento na caixa "velha". A caixa "nova", colocada no seu lugar, apresentou problemas, fundindo o mancal de escora com duas horas de operação. Não se observa anotação na lista materiais do SAP, porém a descrição do evento implica que foi feita a troca de ROLAMENTOS pelo menos DUAS VEZES nessa ocasião - a primeira por oportunidade (troca da caixa) e a segunda, possivelmente por erro de montagem, já que falharam com duas horas de operação. O relatório reporta que foram instalados rolamentos 7312 (anotado "7312 Exp", portanto, da SKF), o que mais uma vez é inconsistente com a documentação, a menos que a bomba completa tenha sido substituída ocasionalmente. Efetivamente, há indícios de que essa troca ocorreu, mas não há documentação disponível dessa bomba alternativa. Finalmente, há informação no relatório de que a névoa-purga foi alterada para névoa pura (comparar com o ocorrido na OS 2013222347). O relatório físico 4299, com entrega em 29out2015, implica que houve recuperação do selo mecânico um dia depois desta entrega.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2023.

Tabela 08 – Histórico das intervenções nas bombas (2015 a 2022).

DATA	ITEM	SERVIÇO	OS	OBSERVAÇÕES
08/08/2016	0209-P-0001B	0209-P-0001B REVISÃO DE SELO	2014840878	Substituição do SELO MECÂNICO . Executada entre 22 e 28ago2016. Com base nas informações do relatório e do registro no SAP, não houve troca de rolamentos.
11/07/2017	0209-P-0001B	0209-P-0001B - VAZAMENTO PELO SELO MECÂNICO	2016168728	Pela lista de componentes e pelo relatório físico, substituição do SELO MECÂNICO somente. O serviço foi executado entre 13 e 14jul2017. O relatório físico não se encontra na pasta, disponível somente no SAP. Mais uma vez, relatada dificuldade para realizar o alinhamento.
15/01/2018	0209-P-0001B	0209-P-0001B VIBRAÇÃO ALTA	2017093596	Substituição das lâminas do acoplamento. Executada entre 18 e 19jan2018. Esta ação cobre a RM 06/2018. O relatório físico não se encontra na pasta, disponível somente no SAP
23/04/2018	0209-P-0001B	0209-P-0001B SELO VAZANDO	2017417431	Substituição do SELO MECÂNICO . Executada entre 23 e 24abr2018. Nessa ocasião foi substituído o carretel espaçador do cubo. Não consta retirada de rolamentos no SAP. Observação: nos registros de manutenção, a nota, a OS e o relatório foram abertos para a turbina (0209-TP-0001B).
11/06/2018	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO NO SELO	2017524336	Substituição do SELO MECÂNICO . Executada entre 11 e 18jun2018. Registrada a dificuldade com o alinhamento, mesmo a quente. Conforme relatório físico e de acordo com os registros do SAP, não houve troca de rolamentos.
24/10/2018	0209-P-0001B	0209-P-0001B VIBRAÇÃO ALTA (RM06/2018)	2018356601	Intervenção atendida entre 24out e 11nov2018. Foi usada para fixação da proteção do acoplamento somente. O serviço já havia sido coberto na OS 2017093596.
02/05/2019	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO NO SELO	2020116763	Manutenção executada entre 02 e 06mai2019. O relatório físico não tem identificação da OS, mas foi carregado no SAP e a data é pertinente. Substituído o SELO MECÂNICO , mas não os rolamentos.
05/09/2019	0209-P-0001B	0209-P-0001B VAZAMENTO DE SELO	2019199598	Substituição de SELO MECÂNICO e ROLAMENTOS de escora. Executada entre 03 e 09set2019, porém o fiscal só assinou o relatório em 14out2019. Usados os rolamentos NM 10.016.779 (no relatório, "7310"). Foi necessário trocar novamente os rolamentos após 10 horas de teste. Segundo o relatório, aparentavam ser falsificados. Menos de um mês depois, substituição dos ROLAMENTOS de escora e radial. Bomba travada. Executada entre 02 e 07out2019 (rolamentos considerados de baixa qualidade nessa ocasião).
02/01/2020	0209-P-0001B	0209-P-0001B FALTA ALINHAMENTO A QUENTE	2022429834	Substituição do SELO MECÂNICO e de lâminas do acoplamento. Executada entre 02 e 13jan2020. Neste relatório não é mencionada a troca de rolamentos, mas na OS consta a retirada de dois jogos de rolamentos NM 10.016.779 (ver OS 2020933535). Foram carregados dois relatórios nesta OS, sendo que um deles é de serviço executado entre 26fev e 29mai2020, sendo que neste caso, os rolamentos fundiram e houve necessidade de trocar o eixo da bomba. Indicada a instalação de ROLAMENTOS SKF 7310. Observar que, pelo registro da OS, ela estaria ativa somente entre 02 e 09jan2020.
09/01/2020	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO NO SELO	2020933535	Substituição do SELO MECÂNICO . No SAP consta retirada de selo, mas pelo relatório físico, o selo foi reaproveitado da bomba "B". Deduz-se que o selo do estoque foi destinado a ela em reposição. Os ROLAMENTOS foram substituídos por recomendação da preditiva. Serviço realizado entre 26 e 27fev2020. Nessa OS não consta retirada de rolamento (ver OS 2022429834).
29/10/2020	0209-P-0001A	0209-P-0001A VIBRAÇÃO ALTA (RM34/2020)	2023642806	Serviço realizado entre 26out e 04nov2020. Identificada vibração e levada no conjunto e posteriormente apontados os ROLAMENTOS de escora como causa do desvio. No relatório e estão identificados como "7310". Na OS consta a retirada de dois conjuntos de rolamentos pelo NM 10.016.779.
25/10/2021	0209-P-0001A	0209-P-0001A VAZAMENTO NO SELO	2025365889	Preenchida caderneta, foi substituído somente o SELO MECÂNICO , o que é coerente com os materiais da OS. A caderneta não se encontra na pasta física. Serviço executado entre 25out e 01nov2021.
31/03/2022	0209-P-0001B	0209-P-0001B EQUIPAMENTO TRAVADO	2026174180	Evento relacionado com esta análise. Os ROLAMENTOS travaram. O SELO MECÂNICO foi substituído por OPORTUNIDADE .

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2023.

Foi realizado um comparativo entre as duas bombas centrífugas, sobre a recorrência de manutenções, e as substituições de rolamentos e selos mecânicos:

Tabela 09 – Comparativo troca de selos mecânicos e rolamentos.

OS	ITEM	DATA	0209-P-0001A				0209-P-0001B				
			ROLAMENTOS		SELO MECÂNICO		ROLAMENTOS		SELO MECÂNICO		
			OPORT.	FALHA	OPORT.	FALHA	OPORT.	FALHA	OPORT.	FALHA	
2009825094	0209-P-0001B	26/11/2012									X
2009479328	0209-P-0001B	01/07/2013					X				
2011095501	0209-P-0001A	05/10/2013			X						
2011735515	0209-P-0001B	02/06/2014									X
2012457266	0209-P-0001B	26/11/2014									X
2007344128	0209-P-0001A	23/03/2015	X		X						
2013222347	0209-P-0001A	17/06/2015	X		X						
2013726668	0209-P-0001B	20/10/2015					X	X			
2014840878	0209-P-0001B	08/08/2016									X
2016168728	0209-P-0001B	11/07/2017									X
2017417431	0209-P-0001B	23/04/2018									X
2017524336	0209-P-0001A	11/06/2018			X						
2020116763	0209-P-0001A	02/05/2019			X						
2019199598	0209-P-0001B	05/09/2019					X				X
2019199598	0209-P-0001B	05/09/2019					X				
2022429834	0209-P-0001B	02/01/2020					X				X
2020933535	0209-P-0001A	09/01/2020	X		X						
2023642806	0209-P-0001A	29/10/2020		X							
2025365889	0209-P-0001A	25/10/2021			X						
2026174180	0209-P-0001B	31/03/2022					X	X			

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2023.

Através do comparativo, está clara a maior recorrência de falhas relacionadas a rolamentos na bomba “B”, substituição dos componentes que ocorreu em sete intervenções distintas, sendo que dessas cinco vezes foram por falha do rolamento que estava em operação, indicando que o problema das sucessivas manutenções nesse equipamento possa ser relacionado a isso, que pode ter sido mal especificado.

A Tabela 07 a seguir mostra as mesmas intervenções, porém relacionando cada uma delas com o tempo decorrido entre as intervenções, e ainda o tempo que cada bomba ficou disponível para a operação no período que antecedeu cada falha. Nessa análise foram levantadas somente as intervenções onde houve falha de rolamento, ou seja, excluídos os casos de troca por oportunidade e para as manutenções de falha somente no selo mecânico, mas sem desgaste do rolamento.

Tabela 10 – Comparativo substituição de rolamentos.

OS	ITEM	DATA	DATA DE ENTREGA (OS ANTERIOR)	DATA DA FALHA (ESTA OS)	DIAS CORRIDOS ENTRE AS INTERVENÇÕES	DIAS DE OPERAÇÃO ENTRE AS INTERVENÇÕES	DIAS FORA DE OPERAÇÃO ENTRE AS INTERVENÇÕES
2009825094	0209-P-0001B	26/11/2012			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2009479328	0209-P-0001B	01/07/2013			OPORTUNIDADE		
2011095501	0209-P-0001A	05/10/2013			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2011735515	0209-P-0001B	02/06/2014			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2012457266	0209-P-0001B	26/11/2014			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2007344128	0209-P-0001A	23/03/2015			OPORTUNIDADE		
2013222347	0209-P-0001A	17/06/2015			OPORTUNIDADE		
2013726668	0209-P-0001B	20/10/2015			OPORTUNIDADE / PROVÁVEL ERRO DE MONTAGEM		
2014840878	0209-P-0001B	08/08/2016			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2016168728	0209-P-0001B	11/07/2017			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2017417431	0209-P-0001B	23/04/2018			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2017524336	0209-P-0001A	11/06/2018			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2020116763	0209-P-0001A	02/05/2019			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2019199598	0209-P-0001B	05/09/2019	24/04/2018	03/09/2019	497	115	382
2019199598	0209-P-0001B	05/09/2019	09/09/2019	02/10/2019	23	4	19
2022429834	0209-P-0001B	02/01/2020	07/10/2019	02/01/2020	87	75	12
2020933535	0209-P-0001A	09/01/2020			OPORTUNIDADE		
2023642806	0209-P-0001A	29/10/2020	29/02/2020	04/10/2020	218	93 (*)	125 (*)
2025365889	0209-P-0001A	25/10/2021			NÃO HOUVE FALHA DE ROLAMENTO		
2026174180	0209-P-0001B	31/03/2022	13/01/2020	07/03/2022	784	548 (*)	234 (*)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2023.

Os valores de dias de operação entre intervenções e de dias fora de operação entre intervenções que estão marcados com asterisco (*), correspondem ao período para o qual não é possível acesso aos dados de status individuais por bomba, ou seja, desde o início de 2020 até atualmente.

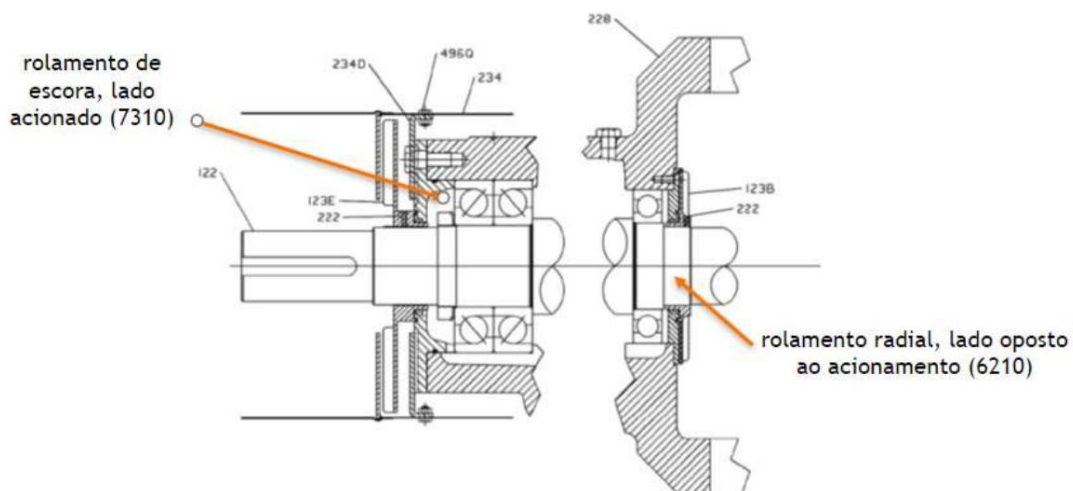
Ao observar o histórico de acontecimentos, nota-se que a falha em análise, ocorrida em março de 2022, é muito similar a que ocorreu em fevereiro de 2020, onde na ocasião, foi constatado que os rolamentos de escora haviam sofrido um tipo

específico de degradação, identificado como falso brinelamento, caracterizado pela formação de marcas ou amassados permanentes nas pistas ou nos corpos rolantes.

Essa degradação ocorre devido à ação de forças de grande intensidade, causando endentação direta das pistas. Mas no caso do falso brinelamento, as marcas observadas são muito parecidas, são identificadas na origem, com formatos estreitos e regularmente espaçadas, porém a causa não está associada com sobrecarga, mas sim, com movimentos de baixa amplitude e repetitivos dos componentes do mancal, que fazem com que as esferas ou rolos removam gradativamente a película lubrificante do componente, e deixa marcas sobre as pistas.

Na ilustração a seguir, que foi retirada do desenho de montagem da bomba, é possível ver a região dos mancais em corte, identificando a forma de montagem.

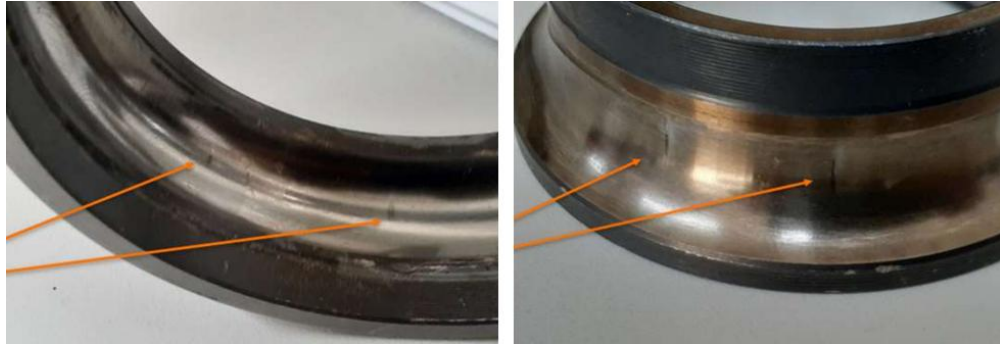
Figura 12 – Desenho de montagem dos mancais de escoa e radial.



Fonte: Manual de montagem e operação da bomba, 2012.

Através das evidências registradas pela equipe de manutenção responsável por realizar a intervenção, é possível identificar o falso brinelamento ocorrido na pista interna do rolamento interno, onde as marcas foram ocasionadas pela fricção das esferas em condição da bomba parada.

Figura 13 – Evidências de desgaste na pista interna do rolamento interno.



Fonte: Evidências registradas pelo próprio autor, 2023.

Já nas evidências registradas para pista externa do rolamento externo, é possível notar regiões escurecidas, que indicam um superaquecimento no ponto, e ainda estão alinhadas com as marcas de desgaste que foram ocasionadas pelas esferas, como esse padrão de degradação por todo o contorno da pista.

Figura 14 – Evidências de desgaste na pista externa do rolamento externo.



Fonte: Evidências registradas pelo próprio autor, 2023.

Para a pista interna do rolamento externo, é notada uma deformação da face, o que evidencia um superaquecimento ocorrido durante a falha, e áreas onde existe um profundo desgaste, que coincidem exatamente com as regiões desgastadas pelas esferas, com o padrão se repetindo por todo o contorno da pista também.

Figura 15 – Evidências de desgaste na pista interna do rolamento externo.



Fonte: Evidências registradas pelo próprio autor, 2023.

Em contrapartida, o rolamento radial não teve evidência de danos significativos, o que indica que no momento de parada da bomba, ainda havia lubrificação na região. Se nota apenas um escurecimento nas esferas, mas que provavelmente não são devido a aquecimento da região, mas sim o acúmulo de fuligem que foi sendo depositada sobre a superfície proveniente do mancal de escora, indicando mais uma vez os danos severos que foram sofridos pelo mancal de escora.

Figura 16 – Evidências do rolamento radial.



Fonte: Evidências registradas pelo próprio autor, 2023.

Diante das evidências registradas e das análises realizadas sobre as condições nas quais os rolamentos foram encontrados, pode-se elencar três principais motivos da ocorrência do falso brinelamento das pistas:

- Mancal inoperante ou sujeito a velocidades muito baixas;
- Lubrificação deficiente, não necessariamente por negligência, mas devido a existência de restrições operacionais;
 - Por exemplo, situações em que uma caixa de mancal não pode ter os rolamentos completamente imersos em óleo.
- Movimentos de baixa amplitude induzidos nos roletes, notadamente devido à presença de fontes de vibração nas imediações.

Existem também as interferências sofridas pelos periféricos e pelo ambiente no qual o equipamento está introduzido, que precisam ser tratadas antes mesmo da definição relacionada as condições dos rolamentos, que servem de embasamento para que possam ser realizadas outras constatações, como:

- Tubulações pesadas apoiada nos bocais da bomba, devido à perda de geometria das linhas, com grande possibilidade de tensionamento excessivo;
- Temperatura excessiva do fluido de processo, com respeito à caixa de mancal usada, composta com resfriamento insuficiente da caixa e resultando em deficiência de lubrificação;
- Possível ação de sobrecarga nos mancais de escora.

Sobre o possível tensionamento excessivo nos bocais, o fato de haver um histórico expressivo de falha de selos mecânicos já é suficiente para levantar suspeitas quanto à deformação da carcaça, associando-se ao fato de que essas bombas trabalham com fluido limpo, onde a observação no campo deixa claro que os tubos de grandes dimensões e conseqüentemente das grandes cargas mecânicas que eles geram, encontram-se mal apoiados nas imediações das bombas. A falta desses apoios rígidos é um grande indicativo de ser fonte de esforços excessivos nos bocais.

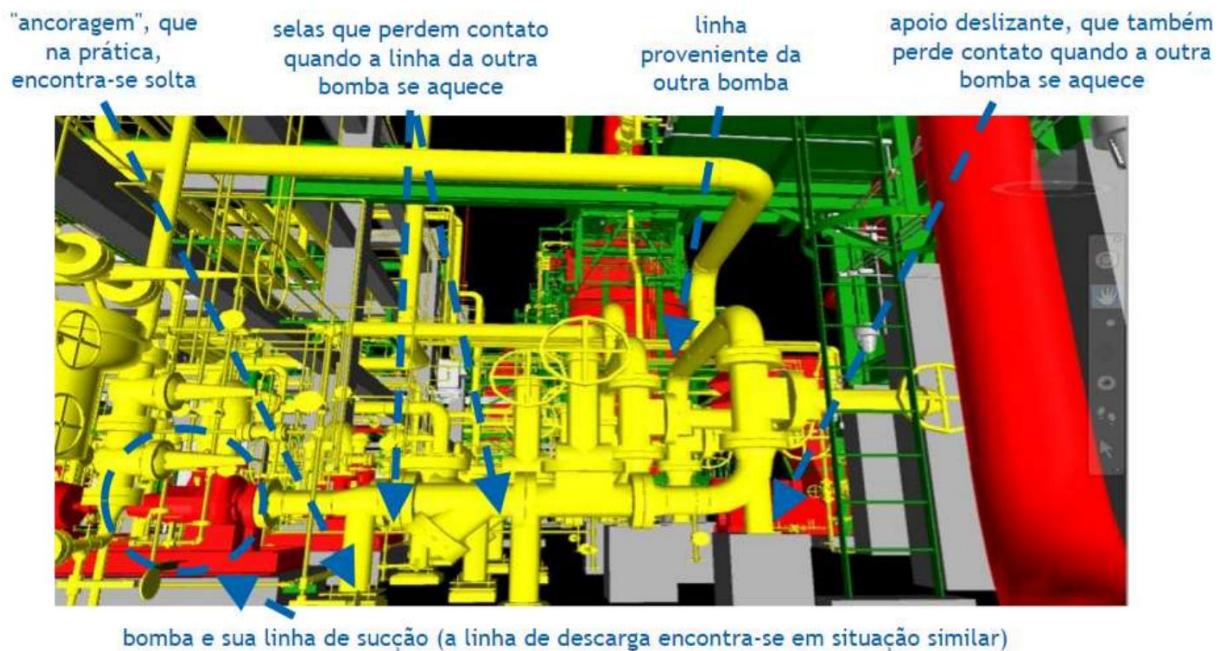
Em um levantamento realizado ainda no ano de 2020, foi observado que, quando apenas uma das bombas está operando, situação essa que é seria a condição

normal da instalação, as linhas das duas bombas tanto de sucção quanto de descarga, apresentam diferentes graus de dilatação, ou seja, as pernas verticais se tornam mais longas na bomba que está operando. Ocorre que as linhas de sucção e descarga são interligadas e apoiadas de tal forma que, na prática, as linhas "frias" são obrigadas a subir, acompanhando a dilatação das linhas de fluídos "quentes". Por outro lado, os apoios junto aos bocais não estão rigidamente fixados.

O resultado é que as linhas descarregam tensão sobre os bocais, uma situação que pode tanto provocar distorções na carcaça, quanto contribuir para a condução de vibrações, provenientes de outros pontos da instalação.

A seguir, segue o mapeamento 3D da região da unidade, onde é possível observar a construção física das tubulações e as interferências entre as linhas de sucção e descarga da bomba.

Figura 17 – Detalhamento 3D do local de instalação da bomba.



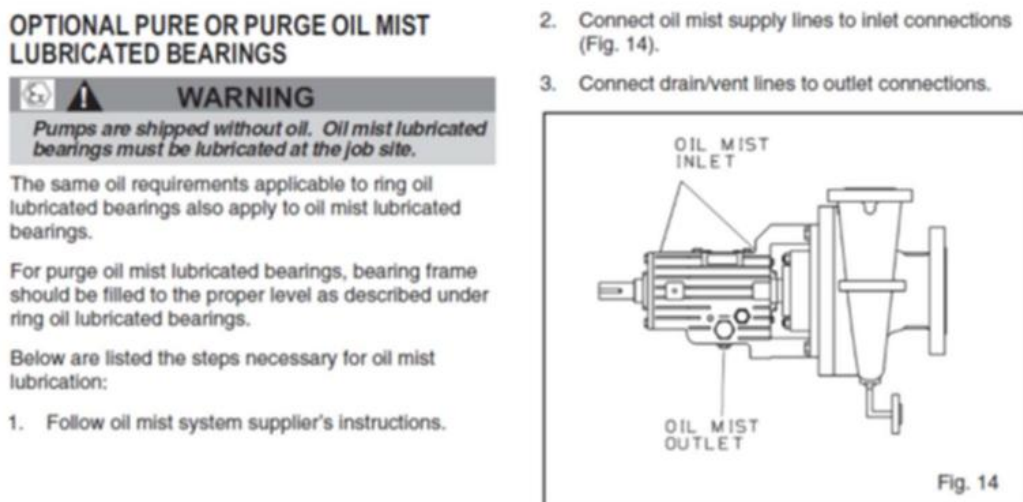
Fonte: Modelagem 3D (*software Navis Work*), 2023.

Tratando agora do segundo tópico levantado, sobre a temperatura excessiva no processo e a possibilidade de lubrificação ineficiente, há evidências de que a caixa de mancal foi substituída por outro modelo durante um período, conforme histórico de manutenção, e que além da condição inicial do projeto definida pelo fabricante da bomba centrífuga, que era banho de óleo com dois pescadores, o equipamento já trabalhou com névoa pura e com névoa-purga. Não foi possível localizar registros e

documentos que esclareçam o motivo pelo qual se decidiu retornar ao sistema névoa-purga, mas é necessário observar que essa configuração foi mantida e que ainda hoje é empregada. Essa correspondência teve ainda considerações a respeito da viscosidade do óleo utilizado, sugerindo que caso a temperatura normal do óleo ultrapasse 80 °C em operação, seria necessário substituir a classe do óleo de ISO VG 68 para ISO VG 100. Relatado que a temperatura encontrada para o óleo estava na faixa de 50 a 82 °C.

Resumindo, essa discussão técnica apontou a necessidade de se adequar o óleo às condições de operação, o que poderia ser obtido por troca do lubrificante, ou por alteração do sistema de resfriamento, e que a lubrificação prevista era por banho de óleo com dois anéis pescadores, mas que atualmente trabalha com névoa-purga, sendo que a entrada de óleo é somente central, e os pescadores foram removidos.

Figura 18 – Recomendações do fabricante sobre modo de lubrificação.



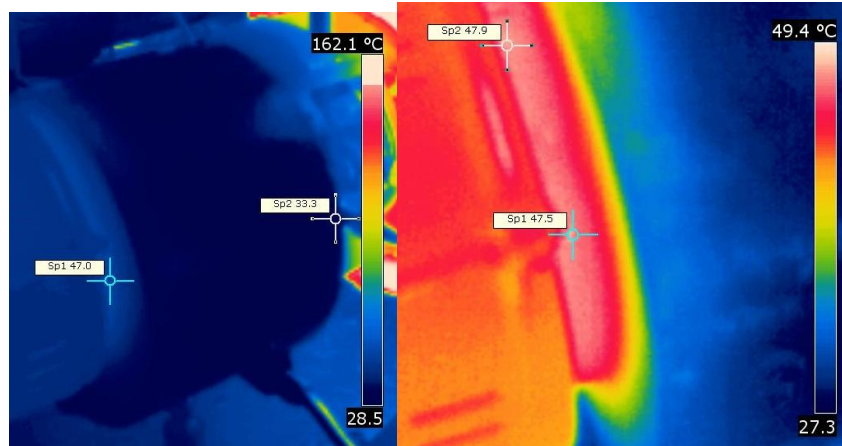
Fonte: Manual de montagem e operação da bomba, 2012.

A terceira hipótese levantada, de uma possível sobrecarga, decorreu das considerações feitas a respeito da possibilidade de temperatura excessiva na caixa, como o fato de não ser habitual da equipe de manutenção o controle de torque aplicado a porca de fixação dos rolamentos, alegando a inviabilidade de aferimento, mas é possível controlar o deslocamento angular ao final do aperto.

Através de inspeções periódicas de rotina, havia sido identificado pela equipe de medição de campo, um distúrbio na temperatura da bomba. Conforme análise termográfica realizada no equipamento em campo, durante a operação da centrífuga,

foi constatado e evidenciado que a bomba estava sofrendo um sobreaquecimento, justamente na região do mancal, conforme registrado abaixo.

Figura 19 – Evidências da termografia realizada em campo.



Fonte: Evidências registradas pelo próprio autor, 2023.

Estudos comprovam que o aperto excessivo da porca, e a elevação da temperatura, se tornam causadores da eliminação de folgas internas do rolamento, o que acaba ocasionando o seu desgaste prematuro. Conforme a documentação original da fabricante, é prevista a instalação de rolamentos de escora com pré carga.

Conforme essa documentação técnica do fabricante, os seguintes dados são fornecidos para os rolamentos do mancal de escora de fabricação própria:

- Rolamento de esferas de contato angular contrapostos = 7310 BEGAY
 - Carga axial à vazão nominal = 5,6 kN
 - Carga dinâmica nominal do rolamento 7310BE = 120 kN
 - Vida estimada do rolamento = 43.800 horas

De acordo com a denominação encontrada no próprio manual do fabricante, a sigla “GA” indica que o rolamento é de pareamento universal, e que são montados em conjunto, seja "costas com costas" ou "frente com frente", e ainda informa sobre a necessidade de aplicação de uma pré carga leve, e o “Y” ao fim da sigla, determina que a gaiola é fabricada em latão, e centrada nas esferas, sendo um rolamento duplo, com necessidade de inserção de uma pré carga, na realização da montagem.

Culturalmente no setor, para aplicações similares em bombas centrífugas, é comumente utilizado o rolamento da mesma fabricante, porém denominado como 7310 BEMCB, que após realizada sua montagem opera normalmente com folga.

Foi notado que as gaiolas do componente não apresentavam desgastes significativos após a ocorrência da falha, fato que é determinante, pois para casos de sobrecarga, é tipicamente comum que a gaiola sofra sucessivos desgastes, o que seria mais um indício de que não houve a aplicação da pré carga no momento da montagem, descartando a hipótese de sobrecarga durante a instalação.

Durante a realização da análise de falha, diversas possibilidades foram levantadas, na tentativa de ampliar ainda mais o horizonte de investigação, provocando uma avaliação detalhada dos desvios encontrados, na busca da causa raiz da falha. Algumas hipóteses foram descartadas através de conversas com a equipe de manutenção responsável pelo equipamento, ou até mesmo uma análise visual do equipamento. Já para outros casos, buscou-se o histórico de operação gerado pelo sistema supervisão de controle, sendo possível avaliar os modos de operação, e entender de uma melhor forma o ocorrido.

Algumas possibilidades que chegaram a ser cogitadas, foram excluídas durante a realização do relatório de análise de falha, e pode ser justificado o não desenvolvimento da investigação, por motivos como:

- Falha no eixo, foi descartada pois durante a inspeção visual, ele não estava danificado e ou empenado;
- Falha na transmissão, pois foi solicitada avaliação da equipe de elétrica e constatado que o motor elétrico e acoplamento, estavam em boas condições;
- Desbalanceamento do rotor, não existem evidências ou indícios que correlacione ao equipamento;

Outras hipóteses até chegaram a ser mais aprofundadas, mas durante a realização de testes ou evidências, ficou comprovado que não foram o motivo da falha e que assim como as citadas anteriormente, poderiam ser descartadas:

- Desvios no dimensional dos componentes internos da bomba, após ser realizada a remoção do equipamento pela equipe de manutenção responsável, é obrigatoriamente realizado o levantamento das medidas e tolerâncias de montagem, e que durante a realização não foi encontrado nenhum desvio significativo;

- Atrito interno das esferas do rolamento, mas ao realizar a medição e análise de vibração do equipamento não foram encontrados indícios no espectro de vibração, que levem a essa conclusão.

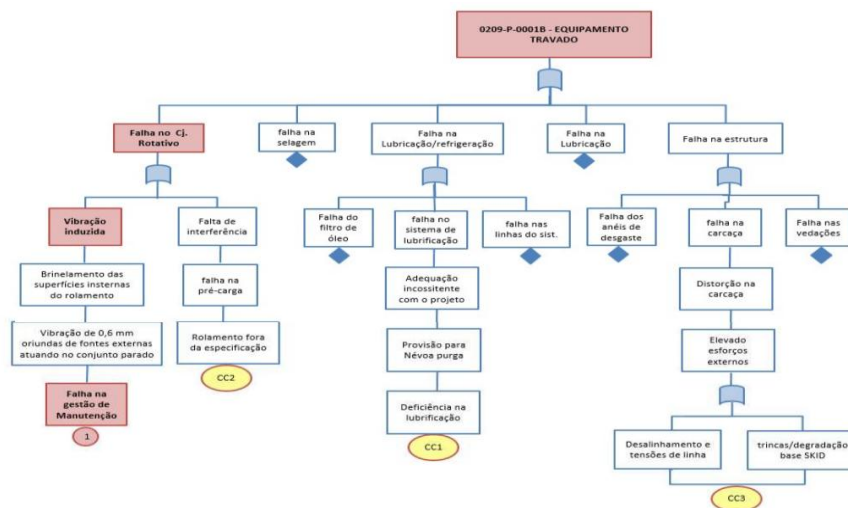
E ainda, aquelas alternativas que foram levantadas inicialmente, e que no decorrer da análise e das verificações foram sendo feitas através de análises e evidências que as justifiquem, foram levantadas algumas hipóteses que determinaram a investigação proposta e deram o embasamento necessário, para dar suporte a equipe de engenharia da empresa na busca de definir a causa raiz do problema.

Primeiramente os rolamentos não sofrem interferência excessiva quando instalados no eixo, pois o fabricante preconiza o uso de rolamentos com pré-carga, que trabalham sem folga por definição. Ou seja, não existe a possibilidade de esmagamento do rolamento, pois o componente é projetado para operar sem folga.

Conforme dados do *data sheet* do fabricante da bomba, é necessária a substituição preventiva dos rolamentos, a um prazo limite de 25.000 horas em trabalho. E considerando o regime de trabalho da bomba esse prazo pode ser definido como sendo de 2 a 3 anos, a depender do modo de trabalho da unidade. Conforme o plano de preventiva definido para a bomba centrífuga, as trocas não foram efetuadas.

Elaborado então um fluxograma relacionado ao modo de falha da bomba centrífuga, foi encontrada a possível causa da falha e ainda as causas complementares, que serviram como objeto de investigação e estudo, e que podem ser corrigidas, para melhorar ainda mais a disponibilidade e os índices operacionais.

Figura 20 – Diagrama Árvore de Falhas (0210-P-0001B).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2023.

Evidenciando que os três principais desvios estão relacionados ao desalinhamento e aos excessivos esforços que as linhas de fluídos exercem sobre a bomba, a visível degradação e as trincas observadas na base do equipamento comprovam tal suspeita. Existe uma deficiência na lubrificação dos rolamentos, e devido a modificação interna, atualmente não são seguidas as recomendações e modo de lubrificação determinado pelo fabricante. E por fim, falha na gestão da manutenção, pois foram observados dois desvios muito significativos sobre esse ponto, que seriam a falha na instalação do componente, sem o devido controle e ajuste necessário, e ainda a falha na especificação do rolamento que conforme analisado, não atende às necessidades operacionais exigidas pela bomba.

Após identificados esses desvios, algumas recomendações e práticas foram adotadas na tentativa de melhorar a disponibilidade operacional do equipamento, reduzindo as perdas por falhas ao máximo.

Na tentativa de limitar os esforços contínuos de uma única bomba por um período muito longo, foi apresentada à operação, nos encontros das reuniões de confiabilidade, a necessidade de adoção do revezamento mínimo mensal das bombas centrífugas. Uma vez que ambos os equipamentos estejam disponíveis para operar, as bombas “A” e “B” respectivamente, ter o rodízio entre elas, para otimizar o uso.

Para evitar esforços na bomba, que possam acarretar uma elevação na tensão exercida sobre as tubulações ligadas a bomba, e ainda o fim prematuro da vida útil da bomba, foi necessário a remoção carcaças das bombas, para realinhar as tubulações, e assim garantir afixação rígida das extremidades dos tubos ligados as linhas de sucção e descarga das bombas, e realizar a instalação dos equipamentos de modo a sofrerem o mínimo de tensionamento possível.

Reduzir o prazo entre as trocas programadas dos rolamentos, que conforme determinado pelo manual do fabricante seria de 25 mil horas, mas que preventivamente passariam a ser realizadas a cada 24.000 horas em trabalho, na busca de eliminar as paradas por desgaste nas esferas. E por fim, restabelecer as condições originais determinadas pelo fabricante, promovendo a lubrificação na região dos rolamentos por meio de banho de óleo com dois anéis pescadores.

A análise da falha na bomba de circulação forçada, mostra como o uso das ferramentas da qualidade podem ajudar a entender melhor os problemas e melhorar a confiabilidade da manutenção mecânica. Durante a investigação, foi possível

verificar que os rolamentos não apresentaram sinais de montagem incorreta no eixo, e nem há provas suficientes de que a porca tenha sido apertada além do necessário.

Além disso, não foram encontrados desgastes nas gaiolas, o que indica que as falhas não foram causadas por sobrecarga. Por outro lado, ficou claro que a vida útil dos rolamentos, estimada em 25.000 horas, exige que eles sejam trocados preventivamente a cada três anos, aproximadamente 24 mil horas de trabalho, para evitar falhas inesperadas.

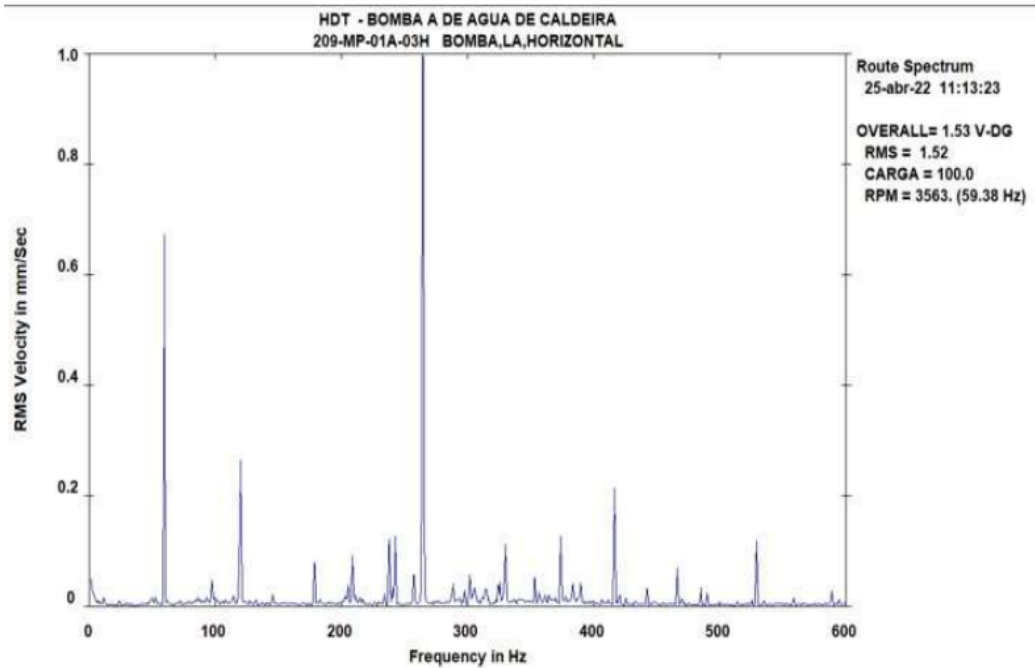
O tipo de desgaste encontrado nos rolamentos está ligado ao falso brinelamento, que acontece quando o equipamento está em repouso por muito tempo, com lubrificação ruim e presença de vibrações. Os registros de manutenção mostram que a bomba esteve parada por períodos que permitem esse tipo de desgaste, o que pode confirmar essa hipótese.

A lubrificação usada atualmente na bomba, ficou caracterizada como um ponto crítico, mesmo que durante a operação ela não seja o principal problema, nos períodos em que a bomba está parada, a lubrificação é insuficiente por vários motivos, como o fato de a bomba ter operado sem os anéis pescadores, que fazem parte do projeto original e ajudam a manter o óleo nos rolamentos. Também o fato da entrada de óleo estar posicionada no centro, reduz a quantidade de óleo que chega aos rolamentos. Ainda o tipo de lubrificação usado no sistema de névoa-purga é menos intenso do que o ideal, o que também diminui o fluxo de óleo lubrificante.

Os rolamentos são duplos, aquele que fica na extremidade acaba recebendo menos lubrificação, mesmo sendo o que mais sofre esforço quando a bomba entra em operação. Essas observações mostram que a confiabilidade da bomba depende muito de uma lubrificação adequada e de cuidados durante os períodos de parada. A falta da lubrificação prevista no projeto original compromete a proteção dos rolamentos, aumentando o risco de falhas.

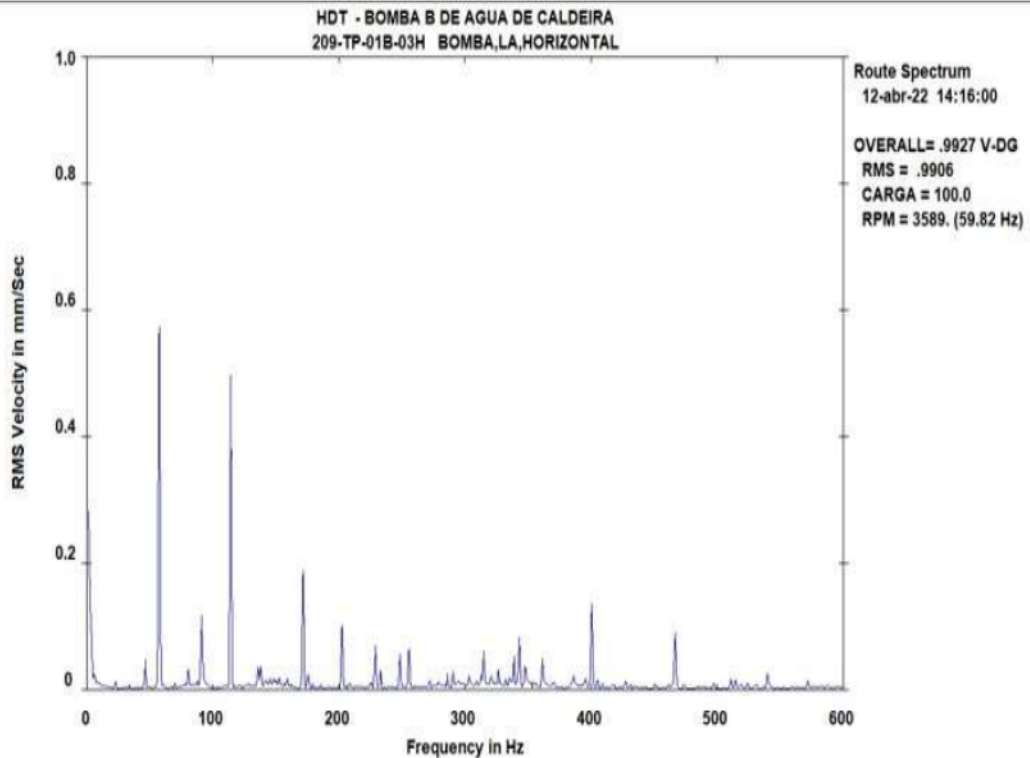
Com relação à vibração induzida, foram realizados dois testes para entender melhor o comportamento das bombas. No primeiro, feito em 12/04/2022, a bomba "B" estava em operação e a bomba "A" parada. No segundo, em 25/04/2022, a situação foi invertida: a bomba "A" operava e a "B" estava parada. Seguem levantamentos registrados, que serviram como base para a análise realizada.

Gráfico 05 – Espectro de vibrações da bomba (0210-P-0001A).



Fonte: Espectro de vibrações 0209-P-0001A (*software System One*), 2022.

Gráfico 06 – Espectro de vibrações da bomba (0210-P-0001B).



Fonte: Espectro de vibrações 0209-P-0001B (*software System One*), 2022.

A comparação entre os dois testes mostrou comportamentos bem diferentes. Quando a bomba "B" estava funcionando, ela causava uma vibração na bomba "A" que estava em repouso, com frequência de cerca de 400 Hz e intensidade de 0,3 mm/s RMS. Já quando a bomba "A" estava em operação, não foi observada vibração significativa na bomba "B" que estava parada. Notado apenas um leve sinal de 120 Hz com intensidade de 0,1 mm/s RMS, que pode até ser desconsiderado.

Além disso, foi detectada uma vibração de baixa frequência e intensidade de 0,6 mm/s RMS na bomba "B" quando ela estava parada, mesmo sem que a bomba "A" estivesse funcionando. Isso indicava que existe outra fonte de vibração, que pode estar vindo da tubulação ou da base onde as bombas estão instaladas. No entanto, com os dados disponíveis, não foi possível identificar com certeza a origem dessa vibração.

O ponto mais importante dessa análise foi entender se essa vibração pode estar relacionada com as falhas nos rolamentos. Pesquisas em fontes técnicas e fóruns de manutenção mostram que não há um padrão definido sobre qual nível de vibração é seguro para equipamentos parados. Porém, muitos profissionais da área relatam que valores baixos já podem causar danos, e que vibrações acima de 0,5 mm/s RMS são consideradas perigosas.

Como a vibração medida na bomba "B" parada foi de 0,6 mm/s RMS, isso reforça a possibilidade de que essa vibração esteja contribuindo para o desgaste dos rolamentos, especialmente durante os períodos em que a bomba não está em operação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo demonstrar a importância da análise de falha como ferramenta estratégica para a melhoria da confiabilidade na manutenção mecânica de equipamentos dinâmicos, com foco na aplicação prática das ferramentas da qualidade. Através de uma abordagem teórica de um estudo de caso em uma refinaria de petróleo, foi possível evidenciar como a aplicação sistemática dessas ferramentas pode transformar a forma como a manutenção é conduzida, promovendo ganhos significativos em desempenho, segurança e disponibilidade operacional.

Ao longo do desenvolvimento, foi possível compreender que a manutenção moderna vai muito além da simples correção de falhas. Ela se tornou um pilar estratégico dentro das organizações industriais, sendo responsável por garantir que os ativos operem dentro dos padrões de confiabilidade e segurança exigidos pelo processo produtivo. Nesse contexto, a análise de falha se destaca como uma metodologia essencial, pois permite não apenas identificar os sintomas de um problema, mas principalmente compreender suas causas raízes, possibilitando a implementação de ações corretivas, preventivas e preditivas eficazes.

O estudo de caso da bomba centrífuga evidenciou com clareza essa realidade. A partir da falha recorrente nos rolamentos do mancal de escora, foi possível aplicar uma análise estruturada, utilizando ferramentas como: fluxograma de falha; gráfico de Pareto; análise dos 5 Porquês; RCFA (*Root Cause Failure Analysis*); análises de vibrações e termográficas; e todo o histórico de manutenção e banco de dados: utilizados para validar hipóteses e identificar padrões de falha.

A investigação revelou que a falha não era resultado de um único fator isolado, mas sim de um conjunto de desvios interligados, envolvendo aspectos técnicos, operacionais e gerenciais.

Entre os principais fatores identificados, destacam-se: o tensionamento excessivo nos bocais da bomba, causado por tubulações mal apoiadas e deformações estruturais; a deficiência no sistema de lubrificação, que havia sido alterado em relação ao projeto original, comprometendo a proteção dos rolamentos durante os períodos de parada; falhas na gestão da manutenção, como a ausência de controle de pré-carga na montagem dos rolamentos e o não cumprimento dos prazos de substituição preventiva recomendados pelo fabricante.

Esses achados reforçam a importância de uma abordagem sistêmica na manutenção, onde cada variável do processo, desde o projeto do equipamento até a sua operação e manutenção, deve ser considerada de forma integrada. A confiabilidade de um ativo não depende apenas da qualidade de seus componentes, mas também da forma como ele é instalado, operado, monitorado e mantido ao longo de seu ciclo de vida.

Além disso, o trabalho demonstrou como os indicadores de desempenho (KPI's), como o TMEI, TMPR e a Disponibilidade Operacional, são fundamentais para o monitoramento contínuo da eficiência da manutenção. Uma vez bem aplicados, esses indicadores permitem identificar tendências, antecipar falhas e direcionar os esforços da equipe técnica para as áreas mais críticas do processo.

Outro ponto de destaque foi a aplicação das ferramentas da qualidade, que se mostraram essenciais para a estruturação da análise de falha. O uso de ferramentas como o fluxograma, do gráfico de Pareto, e da análise de vibração e termográfica. Permitiu uma visualização clara dos desvios e facilitou a tomada de decisão baseada em dados concretos. Essas ferramentas, quando integradas a uma cultura de confiabilidade, promovem a padronização de processos, a redução de retrabalhos e o aumento da eficiência operacional.

Como resultado prático da análise realizada, foram propostas e implementadas diversas ações corretivas e preventivas, como:

- O revezamento mensal entre as bombas A e B, para evitar longos períodos de inatividade. Com medições de vibrações pré-programadas, para realizar o acompanhamento das tendências das medições feitas;
- O realinhamento das tubulações e reforço dos apoios, para reduzir esforços nos bocais;
- A redução do intervalo de troca dos rolamentos para 24.000 horas;
- O retorno ao sistema de lubrificação original, com banho de óleo e anéis pescadores;
- A padronização de procedimentos de montagem, com controle de pré-carga e torque.

Essas medidas visam não apenas corrigir os problemas identificados, mas também prevenir a reincidência das falhas, promovendo uma melhoria contínua no desempenho do equipamento e na confiabilidade do processo como um todo.

Por fim, este trabalho reforça a ideia de que a análise de falha não deve ser vista como uma atividade pontual, mas sim como parte integrante da estratégia de manutenção.

Ela deve ser incorporada à rotina da equipe técnica, com o apoio da gestão e o envolvimento de todas as áreas relacionadas. Somente assim será possível construir uma cultura de confiabilidade sólida, capaz de sustentar os níveis de excelência exigidos pela indústria moderna.

A análise de falha da bomba centrífuga, portanto, não apenas ilustrou a aplicação prática dos conceitos discutidos ao longo do trabalho, mas também serviu como um exemplo concreto de como a engenharia de manutenção pode atuar de forma proativa, estratégica e integrada. A confiabilidade dos ativos é, em última instância, o reflexo da maturidade técnica e organizacional da empresa, e a análise de falha é uma das ferramentas mais poderosas para alcançá-la.

REFERÊNCIAS

ABRAMAN.

Disponível em: <<https://abramanoficial.org.br/>>. Acesso em: 03/05/2023.

AFFONSO, Luiz. **Equipamentos Mecânicos – Análise de Falhas e Soluções de Problemas**. 12.^a ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001.

ARIOLI. **Análise e solução de problemas: o método da qualidade total com dinâmica de grupo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004

CATTINI. **Derrubando os Mitos da Manutenção**. São Paulo: STS Publicações e Serviços Ltda., 1992.

COSTA, Willer Rodrigues. **Manutenção preventiva no setor sucroalcooleiro: estudo de caso em uma usina no vale do rio Ivinhema**, 2017, Naviraí. Anais Naviraí: Egedin, 2017. p. 1-18.

Disponível em: <desafioonline.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/4286/3848>. Acesso em: 28/04/2023.

DIÓGENES, José Abner N. **Análise e implementação de um plano de manutenção na indústria alimentícia**. 2019. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <repositorio.ufc.br/handle/riufc/54910>. Acesso em: 21/03/2023.

DRUMMOND, Getúlio V. **Programa de Atualização Para Mecânicos de Equipamentos de Processo – Manutenção e Reparo de Bombas**. 1^a ed. Rio de Janeiro: Editora Petrobras Abastecimento, 2006.

FREITAS, Laís F. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de juiz de fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva**. TCC, Eng Mecânica - UFJF, MG, 2016. Disponível em: <ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TCC-Laís-Fulgêncio-Freitas.pdf>. Acesso em: 29/03/2023.

HIRANO, H. **5S na Prática**. São Paulo: Instituto IMAM, 1994.

KARDEC, A. & NASCIF, J.A. **Manutenção – função estratégica**. 2.^a ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001.

KARDEK, A.; NASCIF, J. & BARONI, T. **Gestão da Manutenção e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

MATTOS, E. & FALCO, R. **Bombas Industriais**. 2.^a ed. Rio de Janeiro. Editora Inter-ciência. 1998.

MIRSHAWKA, V. & OLMEDO, N. **Manutenção – combate aos custos na não-eficácia – a vez do Brasil**. São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda., 1993.

MIRSHAWKA, V. **Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos**, 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1991.

MONCHY, François. **A função da manutenção – Formação Para Gerência de Manutenção**. 2.^a ed. São Paulo: Editora DURBAN Ltda. / EBRAS Editora Brasileira Ltda., 1989.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (Reliability-Centered Maintenance – RCM)**. Trad. Kleber Siqueira. São Paulo: Aladon, 2000.

MOUBRAY, J. **RCM II: manutenção centrada em confiabilidade**. Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn, 2000.

OLIVEIRA, André & BONORA, Taicimara. **Método de tomada de decisão AHP aplicado na gestão da manutenção industrial: estudo de caso em uma empresa de bens de consumo**. Orientador: Thiago de Almeida KLOSS. 2020. 102f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

Disponível em: <nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/final.pdf>. Acesso em: 21/03/2023.

PALADY, Paul. **FEMEA: Análise de Modos de Falha e Efeitos**. Editora IMAN, 1997

PRASS, Leandro & NUNES, Fabiano. **Implantação da manutenção preventiva em um centro de usinagem CNC de uma indústria moveleira**. *Produção em Foco*, Joinville, v. 2, n. 19, p. 33-73, 2019.

Disponível em: <researchgate.net/profile/Fabiano-Nunes/publication/337678967>. Acesso em: 22/03/2023.

REIS, Igor A. **Revisão de um plano de manutenção preventiva para minimização de intervenções corretivas**. 2021. 45 f. TCC – Engenharia de Produção, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2021. Disponível em: <monografias.ufop.br/handle/35400/3090>. Acesso em: 22/03/2023.

SANITÁ, Willian & CAMPOS, Ronaldo. **PCM**. *Revista Interface Tecnológica*, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 673-685, Jul/2020. *Interface Tecnológica*.

Disponível em: <revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/791>. Acesso em: 22/03/2023.

SELEME, Robson. **Manutenção industrial: mantendo a fábrica em funcionamento**. Curitiba: InterSaber, 2015.

SIMAS, Nilton G. **Principais etapas da análise de óleo lubrificante**, *FILTROVALI*, Nov/2018, Itajaí - Santa Catarina.

Disponível em: <filtrovali.com.br/blog/conheca-as-principais-etapas-da-analise-de-oleo-lubrificante/>. Acesso em: 13/05/2023.

TAKAYAMA, Mariana. **Análise de falhas aplicada ao planejamento estratégico da manutenção**. Monografia, Eng Produção - UFJF, MG, 2008.

Disponível em: <ufff.br/ep//files/2014/07/2008_3_Mariana-Amorim.pdf>. Acesso em: 31/03/2023.

TELES DUTRA, Jhonata. **Ebook - Planejamento e controle de manutenção**. ENGETELES – Engenharia de Manutenção LTDA. Brasília, 2017.

VELOSO, Norwil. **Gerenciamento E Manutenção De Equipamentos Móveis**. 1ª ed. São Paulo: Editora Sobratema, 2009.

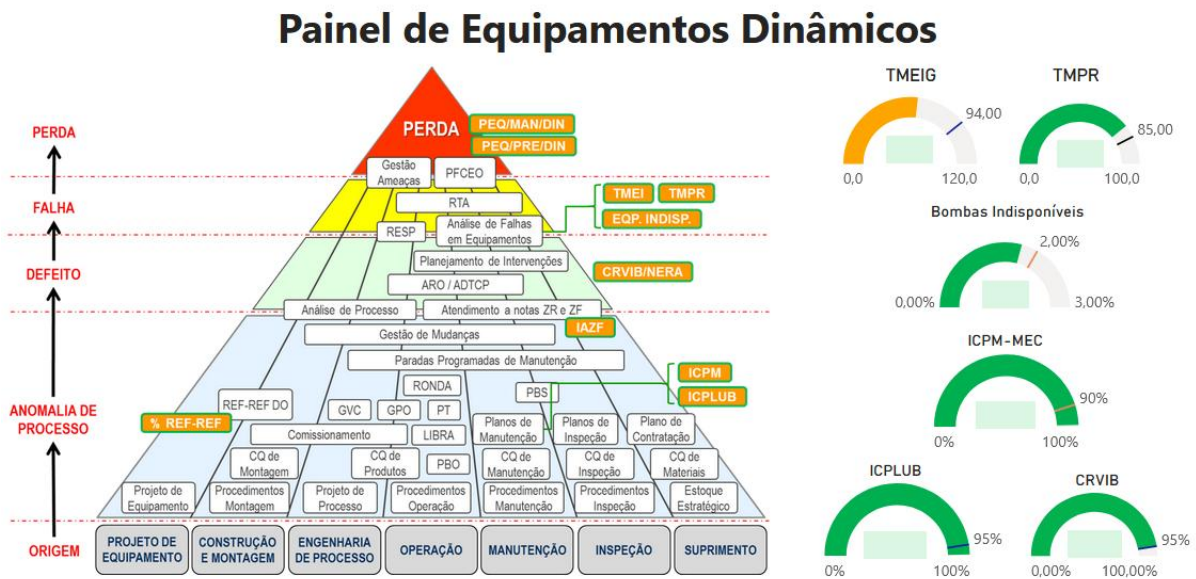
APÊNDICE A – OS INDICADORES DO SETOR DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS DINÂMICOS DE UMA REFINARIA DE ÓLEO E GÁS

A manutenção mecânica é uma atividade essencial para garantir o bom funcionamento das refinarias de petróleo, por se tratar de plantas extremamente complexas, onde existe a alta exposição a perigos e se trabalha sempre sobre altos valores econômicos, que impactam todo o país. As refinarias de petróleo processam o petróleo bruto em diversos produtos derivados, como gasolina, diesel, querosene, asfalto, entre outros.

Para isso, elas utilizam equipamentos dinâmicos, como bombas centrifugas, compressores alternativos, turbinas a gás e a vapor, válvulas de admissão e descarga, válvulas de alívio de pressão, trocadores de calor, redutores de velocidade, reatores, destiladores, entre outros. Esses equipamentos, assim como todos, estão sujeitos a desgastes, falhas e avarias, que podem comprometer a qualidade, a segurança e a rentabilidade do processo de produção. Por isso, é necessário realizar uma manutenção mecânica periódica e preventiva, que consiste em inspecionar, reparar e substituir os componentes defeituosos ou danificados.

Para determinar essa eficiência e eficácia na manutenção em uma refinaria, é preciso controlar indicadores que possam medir o seu desempenho, por intermédio de ferramentas que permitem quantificar e qualificar os resultados obtidos pela manutenção, comparando-os com os objetivos e as metas estabelecidos. Esses indicadores podem auxiliar na tomada de decisão, na identificação de problemas e oportunidades de melhoria, na alocação de recursos e na gestão da qualidade da manutenção.

Abaixo estão alguns dos indicadores de manutenção, usados pela Refinaria de Petróleo de Minas Gerais, que foi vivenciado durante o período de estágio na empresa explicando os conceitos, as suas formas de cálculo e a sua importância; Através do acompanhamento e apurações mensais dos serviços de manutenção realizados de rotina nas unidades de processo, pela empresa contratada do setor.



Através dos encontros mensais entre a fiscalização da Contratante e os representantes da Contratada, os indicadores apurados são debatidos, sendo definida a bonificação ou oneração do valor contratual, referente ao mês. De acordo com o Contrato estabelecido entre as empresas, que determina as relações de trabalho entre a companhia Pública e a empresa Privada ganhadora da licitação, para serviços de manutenção preditiva, preventiva, corretiva, lubrificação e usinagem, no setor da manutenção mecânica de equipamentos dinâmicos, estabelecido através do Instrumento Contratual Jurídico assinado entre as partes. Os indicadores são:

- **Número de Resserviços (NSRV)**, mede a quantidade de intervenções de manutenção em um mesmo sistema técnico em um período inferior a 90 dias;
- **Índice de Perda de Produção (IPP)**, avalia a carga de produto abaixo da meta determinada para o ciclo, que não foi produzida, devido a indisponibilidade de equipamentos ou sistemas, que sejam de responsabilidade do setor;
- **Índice de Cumprimento do Plano de Manutenção (ICPM)**, determina o percentual de realização das manutenções preventivas programadas para as unidades;
- **Cumprimento de Programação Agregado (CPA)**, define a proatividade na resolução de problemas e a utilização da mão de obra disponível determinada em contrato, em relação as quantidades de tarefas executadas;
- **Número de Bombas Indisponíveis (NBI)**, mede a quantidades de bombas centrífugas que não estão operando por indisponibilidade - considerando um valor mínimo admissível, de 10%, em relação ao total de bombas da planta;

- **Cumprimento da Rota de Vibração (CRVIB)**, define o percentual de cumprimento da rota de vibração, prevista para ser realizadas no mês;
- **Número de Vazamentos de Selo (VAZSEL)**, avalia quantos selos mecânicos estão apresentando vazamento em campo, que não seja possível o ajuste imediato;
- **Cumprimento da Rota de Lubrificação (CPLUB)**, avalia a realização da rota de lubrificação dos pontos estratégicos determinados pelo sistema, que devem ser lubrificados ou avaliados, durante o ciclo de medição.

Número de resserviços

Corresponde à quantidade de reparos repetidos em um mesmo Sistema Técnico realizados em um intervalo inferior a 90 dias, contados a partir do término do reparo anterior. Assume-se 90 dias como o período de garantia do equipamento. Para calcular esse indicador, deve-se levar em conta todas as categorias de equipamentos da área, pois é usado o indicador do conjunto, o sistema técnico é visto como se fosse um “equipamento” único, ou seja, se houver serviço em uma bomba e depois no motor, a nova intervenção será contabilizada como resserviço.

Quando a fiscalização de campo própria da Contratante nota a possibilidade de retrabalho na unidade operacional, é feita uma solicitação formal de Análise de Falha à Contratada, que deverá elaborar um relatório técnico com a avaliação e determinação da causa principal, incluindo as orientações para solução das anomalias detectadas, de forma a prevenir a reincidência da falha. Este relatório deverá ser apresentado à fiscalização no prazo máximo de 7 dias após o evento.

Número de bombas indisponíveis

Representa a média das bombas fora de operação nas semanas do ciclo de medição anterior. São contabilizadas as bombas que estão fora de operação por falta de materiais, decorrentes de fatores atribuídos à Petrobras, nas seguintes situações: Falta de materiais previstos no estoque estratégico ou Falta de materiais, não previstos no estoque estratégico, e que estão há mais de 60 dias em processo de compra, a partir da data de emissão da requisição de compra. Considerado um valor de referência mínimo aceitável, de 10% do total de bombas da Refinaria.

Índice de perda de produção

Determina o percentual de carga de cada unidade, que não foi processada por causa de problemas relacionados a equipamentos dinâmicos, e deverá ser estimado considerando-se as seguintes Unidades de Processo da Refinaria: Destilação, Craqueamento, Coque e Hidrotratamentos. As perdas de produção serão apuradas a partir do sistema de cálculo de Perdas de Processamento que é administrado pelo setor de Otimização da Refinaria e computa todas as perdas das unidades em questão em termos percentuais.

Índice de cumprimento do plano de manutenção

Este indicador é gerenciado pela Refinaria para avaliar o grau de aderência dos planos de manutenção mecânica. O indicador abrange todo o plano preventivo relacionado à manutenção mecânica em geral, independentemente de quem seja o responsável pela execução das tarefas. O cumprimento do plano é definido pela realização das atividades planejadas e registradas no sistema e pelo encerramento efetivo das ordens. O indicador é importante para garantir a segurança, a qualidade e a produtividade da Refinaria, bem como para evitar falhas e paradas não programadas.

Cumprimento da programação agregado

Tem como objetivo monitorar o desempenho das atividades planejadas e agendadas para o período, em comparação com a sua execução real, incluindo o atendimento por meio de interrupções de programação. As atividades previamente agendadas, que forem substituídas pelas interrupções eventuais, serão descartadas, em favor da inclusão no indicador das atividades provenientes da interrupção de programação. Este indicador é calculado com base nos dados do Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados (SAP) e é realizado seu acompanhamento de maneira mensal.

Cumprimento do plano de lubrificação

O objetivo é verificar qual a fração de equipamentos que foram lubrificados corretamente em relação ao total estimado conforme a programação nivelada. Para isso, conta-se com um programa interno de controle de lubrificação, que se conecta diretamente com o equipamento de lubrificação usado pelos responsáveis da área. O

próprio sistema é encarregado de medir o indicador e determinar se a lubrificação foi satisfatória ou não. A lubrificação adequada é essencial para reduzir o atrito, o desgaste e o calor nos equipamentos, aumentando sua vida útil e seu desempenho.

Cumprimento da rota de vibração

O propósito é avaliar o desempenho da equipe de coleta de dados preditivos da Refinaria, no que se refere ao cumprimento das rotas e coletas de vibração dos equipamentos dinâmicos. A medição de vibrações é importante para detectar possíveis falhas ou desgastes nos equipamentos, prevenindo paradas não programadas e acidentes. O indicador é calculado mensalmente, através do sistema interno da Refinaria.

Número de vazamento de selos

O selo mecânico é um componente que impede a fuga de fluidos entre o eixo rotativo e a carcaça fixa da bomba, operando em condições de alta pressão e temperatura. Possuindo faces de vedação que se mantêm em contato por meio de uma força mecânica ou hidráulica, e quando essas faces se desgastam ou se desalinham, ocorre o vazamento de fluido.

A apuração desse indicador trata da quantidade de equipamentos que deverão ser retirados para oficina ou reparados na área industrial, devido impossibilidade de reversão. A empresa Contratada, responsável pela manutenção de rotina da Refinaria, deverá inspecionar todos os equipamentos antes de realizar os reparos e apresentar laudo, indicando ações de correção, visando manter a disponibilidade do equipamento.

A medição dele será ao fim de cada ciclo mensal, e a quantidade de notas de manutenção que deverão ser planejadas, cujas causas imediatas sejam vazamento de selo. Essas notas devem ser abertas após a tentativa de todas as práticas e métodos de reversão de vazamentos, como manobras de campo e identificação de problemas em sistemas junto à operação. Caso após a execução de todos os procedimentos o vazamento persista, o equipamento é contabilizado no indicador.