

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

Felipe Lima Moraes

**Estudo de Caso de uma Manutenção Preditiva em Rolamentos de uma Bomba
Centrífuga por Meio da Análise de Vibração.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2025**

Felipe Lima Moraes

**Estudo de Caso de uma Manutenção Preditiva em Rolamentos de uma Bomba
Centrífuga por Meio da Análise de Vibração**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do DEPEMC, do
Centro Federal de Educação Tecnológica
Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Jonatas Motta Quirino
Coorientador: Eng. Raphael Sena Barbosa
Leite

**RIO DE JANEIRO
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M828 Morais, Felipe Lima

Estudo de caso de uma manutenção preditiva em rolamentos de uma bomba centrífuga por meio da análise de vibração / Felipe Lima Morais. — 2025.

79f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.

Bibliografia : f. 75-79

Orientador: Jonatas Motta Quirino

Coorientador: Raphael Sena Barbosa Leite

1. Engenharia mecânica. 2. Bombas centrífugas – Manutenção e reparos. 3. Vibração. I. Quirino, Jonatas Motta. (Orient.). II. Leite, Raphael Sena Barbosa. (Coorient.). III. Título.

CDD 621

Dedico este trabalho à minha avó Iara Cabral Moraes, pelo apoio infindável e carinho inextinguível. Por cada lágrima derramada e sorriso dado.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Jonatas Quirino e Raphael Leite, que com sua experiência e dedicação foram fundamentais para a realização deste projeto, e sou imensamente grato por sua confiança e incentivo, tanto na faculdade, quanto no trabalho.

Aos que não puderam estar presentes fisicamente, Prof. Alexandre Silva e Prof. Paulo Vogel, agradeço por me apresentarem a engenharia como ela é e serem um exemplo de carreira e profissionais. E ao meu querido avô Carlos Moraes, por me levar a fazer engenharia pela beleza do curso e sua paixão por automobilismo.

Aos meus queridos amigos, Arthur Vilche, Bernardo Paiva, Caio Gomes, Caio Ribeiro, Felipe Teixeira, Leonardo Berriel, Luis Tanaka, Mateus Barreto, Mateus Severo, Matheus Almeida, Matheus Barros, Nathan Lagares, Rafael Mondaini, Stephanie Aguiar, considero-os o maior tesouro que levamos dessa vida. Cada momento, negativo ou positivo, traz enorme sensação de realização e felicidade pelo orgulho de ter vocês como participantes de todas minhas conquistas.

À minha futura esposa, Eduarda. Seu carinho, acalento, trabalho e dedicação, principalmente no final da minha graduação, foram de gigantesca valia, transformando esse momento, tantas vezes traumático, em cena tão bela que deveria ser revivida. E que, depois de mais de uma década de relacionamento, continua sendo minha melhor amiga e parceira.

Aos meus mais queridos irmãos, Beatriz e Bernardo, que são minha vida e impactam positivamente em todas as decisões que tomo na vida.

Por fim, à minha família, ao meu pai Carlos, à minha mãe Regina, à minha avó Iara, meu tio Renato, seu amor, sua grandiosidade, paciência, carinho, sabedoria, preocupação são de mais precioso que uma pessoa pode ter durante esse período tão notável em nossas vidas. Obrigado por suportarem tamanha responsabilidade com extremo louvor. São alicerce de todo meu ser e caráter. Uma menção especial à minha avó Iara Cabral Moraes, que sempre foi, é e será um exemplo de vida. E a quem dedico não só esse trabalho, mas toda minha graduação.

Respirarás na zona superior ou inferior,
torturada ou tranquila, em que colocas a
própria mente.
(Emmanuel)

RESUMO

MORAIS, Felipe. **Estudo de Caso de uma Manutenção Preditiva em Rolamentos de uma Bomba Centrífuga por Meio da Análise de Vibração**. 2025. 63 pages. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

Este estudo investiga a aplicação da manutenção preditiva em rolamentos de uma bomba centrífuga em um FPSO, resultando na identificação do defeito, antes de se tornar uma falha, consequentemente, a parada do equipamento para manutenção. Foca-se na rotina de manutenção e os passos para execução da atividade utilizando a análise de vibração como ferramenta para a identificação precoce de falhas nos rolamentos, permitindo intervenções corretivas programadas que asseguram a continuidade das operações e minimizam impactos financeiros. O estudo aborda os desafios logísticos, como a importação de peças devido à indisponibilidade no mercado nacional, que resultou em prazos de entrega de até 11 meses. Apesar disso, o monitoramento contínuo possibilitou a intervenção planejada, garantindo que o MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) fosse ampliado com segurança operacional e o MTTR (Tempo Médio para Reparo) reduzido, otimizando a disponibilidade do equipamento. A pesquisa também explora o potencial das tecnologias da Indústria 4.0, como sensores sem fio e análise em tempo real, para aprimorar as práticas de manutenção, aumentando a confiabilidade e eficiência operacional. Este trabalho reafirma a importância da manutenção preditiva no contexto de um FPSO, demonstrando sua eficácia em melhorar a produtividade e reduzir custos operacionais.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. Análise de Vibração. FPSO.

ABSTRACT

MORAIS, Felipe. **Case Study of Predictive Maintenance in Bearings of a Centrifugal Pump Through Vibration Analysis**. 2025. 63 pages. Final Paper – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2025.

This study investigates the application of predictive maintenance on bearings of a centrifugal pump in an FPSO, resulting in the identification of the defect before it becomes a failure, consequently, the shutdown of the equipment for maintenance. It focuses on the maintenance routine and the steps for executing the activity using vibration analysis as a tool for the early identification of bearing failures, allowing programmed interventions that ensure operational continuity and minimize financial impacts. The study addresses logistical challenges, such as the importation of parts due to their unavailability in the national market, resulting in delivery times of up to 11 months. Despite this, continuous monitoring enabled planned interventions, ensuring that the MTBF (Mean Time Between Failures) was extended with operational safety and the MTTR (Mean Time to Repair) was reduced, optimizing equipment availability. The research also explores the potential of Industry 4.0 technologies, such as wireless sensors and real-time analysis, to enhance maintenance practices, increasing reliability and operational efficiency. This work reaffirms the importance of predictive maintenance in the context of an FPSO, demonstrating its effectiveness in improving productivity and reducing operational costs.

Keywords: Predictive Maintenance. Vibration Analysis. FPSO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama da Técnica de <i>Bow Tie</i>	18
Figura 2 - Bomba OHH.....	19
Figura 3 - Diagrama de Gestão da Qualidade Total Fonte: Xenos (1998)	23
Figura 4 - Análise por Termografia Fonte: Abecom (2023)	25
Figura 5 - Posicionamento dos Sensores para uma máquina elétrica pequena.	26
Figura 6 - Espectros de Falhas de Vibração	Error! Bookmark not defined.
Figura 7 – MTBF	29
Figura 8 - Martelo e Bigorna.....	32
Figura 9 - Movimento harmônico.....	36
Figura 10 - Movimento harmônico simples.....	38
Figura 11 - Visualização do RMS	39
Figura 12 - Sistema Massa-Mola-Amortecedor	40
Figura 13 - Vibração de sistemas massa-mola-amortecedor	41
Figura 14 - Ressonância em 1 grau de liberdade.....	43
Figura 15 - Posicionamento dos sensores	44
Figura 16 - Relação de Amplitudes entre Deslocamento, Velocidade e Aceleração - Adaptado	45
Figura 17 - Visualização da aplicação da Transformada de Fourier	46
Figura 18 - Variáveis utilizadas para cálculo das frequências de falha	49
Figura 19 - Espectro de defeito de rolamento	50
Figura 20 - Avaliação da severidade das vibrações por zonas e velocidade	53
Figura 21 - Analisador SKF Microlog GX	55
Figura 22 - Checagem de posicionamento de sensores	56
Figura 23 - Diagrama de conexão dos cabos com analisador	57
Figura 24 - Conexão dos cabos com os sensores Fonte: SKF (2015)	57
Figura 25 - Teste de desbalanceamento - Spindle Test.....	58
Figura 26 - Controle de Programação	59
Figura 27 - Condição dos Equipamentos	59
Figura 28 - Classificação dos equipamentos por criticidade	60
Figura 29 - Diagnósticos	60
Figura 30 – Ordens de Trabalho	61
Figura 31 - Laudo Técnico.....	62
Figura 32 - Espectros de Vibração	62
Figura 33 - Calculadora de Frequência de Falha - SKF 6412 Fonte: SKF (2024).....	63
Figura 34 - Calculadora de Frequência de Falha - SKF 7311 BECBP Fonte: SKF (2024).....	64
Figura 35 - Espectro de baixa frequência - nov./22.....	65
Figura 36 - Espectro baixa frequência - nov./22.....	65

Figura 37 - Espectro de alta Frequência - SKF 7311BECBP	66
Figura 38 - Rolamento SKF 6412: Inspeção Visual 1.....	68
Figura 39 - Rolamento SKF 6412: Inspeção Visual 2.....	69
Figura 40 - SKF 6412 Novo.....	70
Figura 41 - Rolamento SKF 7311 BECBP: Inspeção Visual	70
Figura 42 - Rolamento SKF 7311 BECBP: Detalhe da inspeção visual	71

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BJSA	Campos de Bijupirá e Salema
DE	<i>Drive End</i> (Lado Acoplado)
DFT	Transformada de Fourier Discreta
EDO	Equação Diferencial Ordinária
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
FPSO	<i>Floating, Production, Storage and Offloading</i>
GQT	Gestão de Qualidade Total
IFC	Instituto de Física Computacional
KPI	<i>Key Productive Indicators</i> (Indicadores-chave de Desempenho)
MCC	Manutenção Centrada em Confiabilidade
ML	Milhões de Litros
MMSCF	<i>Million Standard Cubic Feet</i> (Milhões de Pés Cúbicos Padrão)
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> (Tempo Médio para Reparo)
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i> (Tempo Médio Até a Falha)
NDE	<i>Non-Drive End</i> (Lado Oposto ao Acoplado)
OHH	<i>Overhung, Horizontal, with feet in the center, single stage, and radial split</i> (Bomba Centrífuga com Rotor em Balanço, Horizontal, com Pés no Centro, Simples Estágio e Bipartida Radialmente)
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> (Eficiência Geral dos Equipamentos)
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
PDI	Programa de Descomissionamento das Instalações
RPM	Rotações por Minuto
SCE	<i>Safety Critical Element</i>
SGSO	Sistema de Gestão de Segurança Operacional
SKF	<i>Svenska Kullagerfabriken</i> (fabricante de rolamentos)
SWSP-B	<i>Sea Water Service Pump B</i> (Bomba de Serviço de Água do Mar B)

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE SIGLAS	11
LISTA DE ACRÔNIMOS	12
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	17
3.1 BOMBA CENTRIFUGA	19
3.1 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL	20
3.1.1 Resumo Histórico	21
3.1.2 Conceitos De Manutenção	22
3.1.3 Métodos De Manutenção	23
3.1.4 Indicadores de Produtividade	28
3.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	30
3.1.1 Sistemas De Vibrações E Seus Elementos	30
3.1.2 Graus de Liberdade	31
3.1.3 Modelagem Matemática	33
2.4.3.1 Vibração livre sem amortecimento	33
3..3.1 RMS	38
3..3.2 Vibração forçada com amortecimento com 1 grau de liberdade.	39
3..3.2 Ressonância	42
3.1.4 Sensores	43
3.1.5 Aquisição e Interpretação dos Sinais	46
3.1.6 Espectros de Vibração	48
3.1.7 Normas de Vibração	50
3..7.1 ISO 20816-1	51
3 DESENVOLVIMENTO	54
3.1 METODOLOGIA	54
3.1.1 Métodos	54
3.1.2 Anatomia do Relatório de Serviço	58
3.1.3 Equipamento e Seus Elementos	63
3.1 RESULTADOS	64
3.1.1 Identificação do Alarme	64
3.1.2 Planejamento da Intervenção	66
3.1.3 Inspeção Visual da Falha	67
3.1 DISCUSSÕES	71

4 CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

No setor *offshore*, onde as condições operacionais são notoriamente rigorosas e desafiadoras, e os equipamentos críticos desempenham um papel vital na produção de petróleo e gás, a implementação da manutenção preditiva é considerada absolutamente essencial. Tal abordagem permite evitar falhas inesperadas e interrupções não programadas que poderiam levar a consequências catastróficas tanto em termos financeiros quanto ambientais (Mather, 2009)

Para fins de contextualização, o FPSO Fluminense (*Floating, Production, Storage and Offloading*), uma plataforma que teve seu primeiro óleo em 2003, ou seja, com equipamentos obsoletos e fora de linha, produzia diariamente em torno de 80.000 barris, ou aproximadamente 12,7 ML, de óleo e 75 MMSCF (*Million Standard Cubic Feet*), ou aproximadamente 2.123.763,5 m^3 , de gás por dia (SHELL, 2022). Considerando que o valor do óleo tem a cotação em torno de 90 dólares americanos (IFC MARKET, 2024), um *downtime* de apenas 1 dia pode resultar em uma perda de 7,2 milhões de dólares. Atualmente, um FPSO, na bacia do Pré-sal, pode ter uma capacidade de 180.000 barris por dia, como é o caso do FPSO Guanabara (PRÉ-SAL PETRÓLEO S.A., 2023), essa perda diária causada por um *downtime* pode chegar a 16,2 milhões de dólares.

Portanto, fica evidente que o impacto econômico que um *downtime* na produção tem relevância nacional, e dependendo do período e criticidade dessa parada, o impacto tem relevância internacional (GUPTA, 2020).

Este estudo visa identificar uma falha em uma bomba centrífuga dentro de um sistema crítico de operação de um FPSO utilizando a análise de vibração. A pesquisa foca na aplicação da manutenção preditiva, uma estratégia que antecipa falhas potenciais e propõe intervenções corretivas e preventivas através de inspeções regulares, aumentando a confiabilidade e eficiência dos equipamentos industriais. Especificamente, a análise de vibrações é empregada como uma ferramenta para avaliar a condição física e operacional da bomba centrífuga através dos níveis de vibração dos rolamentos, permitindo uma tomada de decisão mais informada quanto às necessidades de manutenção. Ao monitorar e analisar os dados vibracionais, busca-se identificar precocemente sinais de desgastes, desalinhamentos, desbalanceamento, folgas mecânicas, “pé manco”, folgas em acoplamentos, empeno de eixos, cavitação e outras irregularidades que possam afetar a performance e

integridade do equipamento, observando o desenvolvimento dessas condições até que uma intervenção se faça necessária e avaliando os resultados dessa ação.

Neste trabalho, será apresentado os conceitos teóricos por trás dessa atividade de manutenção, como análise de risco, conceitos de manutenção, análise de vibração e a leitura e interpretação de uma análise de vibração, e os conceitos de vibração livre e forçada.

Como corpo do estudo, será apresentado o impacto da manutenção preditiva na disponibilidade do equipamento usando a análise de vibração como principal ferramenta de diagnóstico pela interpretação do espectro de vibração extraído da bomba.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de trazer um embasamento teórico para o presente estudo de caso, neste capítulo são apresentados: a contextualização do meio no qual o equipamento é localizado, o equipamento, e os conceitos utilizados no trabalho: Manutenção industrial e Vibrações mecânicas.

3.3 CONTEXTUALIZAÇÃO

Um FPSO é uma plataforma flutuante de extração de petróleo offshore, ou seja, em alto mar. Assim como qualquer campo industrial, é constituído de sistemas e subsistemas que realizam a operação e obtenção de um produto. MATHER (2009)

Toda plataforma utiliza do meio mais abundante a sua volta para execução do projeto, a água salgada. O sistema de água salgada é direcionado para o tratamento para água potável, injeção nos poços, refrigeração de componentes e sistema de emergência de combate a incêndio. Todas essas linhas são alimentadas por uma série de bombas que realizam o processo de levar a água do mar ao FPSO, chamada de Bomba de Captação de Água do Mar, conhecida no mundo *offshore* como *Sea Water Lift Pump*, a de distribuição para as linhas, chamada de Bomba de Serviço de Água do Mar, conhecida como *Sea Water Service Pump*.

Os componentes do presente estudo são os rolamentos do eixo de uma bomba centrífuga, a *Sea Water Service Pump*, cujo fluido de trabalho é água do mar. A bomba centrífuga em questão abastece linhas como a linha de incêndio e refrigeração de turbina de geração de energia, ambos sistemas e equipamentos Críticos de Segurança Operacional. Os itens 2.5.1 e 2.5.2 do Sistema de Gestão de Segurança Operacional (SGSO) de 2007 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP), define equipamentos e sistemas críticos de segurança operacional como: Equipamento de Segurança Operacional Crítico, refere-se a qualquer componente ou parte estrutural da instalação cuja falha possa resultar ou contribuir significativamente para um incidente operacional ou para a iminência de tal evento; Sistema de Segurança Operacional Crítico refere-se a qualquer sistema de controle técnico projetado para assegurar que a Instalação opere

dentro dos parâmetros de segurança estabelecidos, interrompa completamente ou em parte a operação ou um processo em resposta a uma falha de segurança, ou minimize a exposição humana aos riscos decorrentes de possíveis falhas (ANP, 2007) .

A Empresa Operadora do FPSO Fluminense determina da criticidade desses sistemas por meio da Análise de *BowTie* (Figura 1), que é uma ferramenta para análise e controle de risco, ISO 31000:2018. Através desse método é realizado uma avaliação dos equipamentos e do sistema como um conjunto e o efeito que um sistema ou equipamento tem sobre o outro. É denominada dessa maneira, pelo fato do sistema a ser analisado ser o “Nó da Gravata”, e as “Pontas da Gravata” representadas pela prevenção (antes do evento de falha) e mitigação (após o evento de falha).

Técnica Bow Tie - Análise de Risco



Figura 1 - Diagrama da Técnica de *Bow Tie*.
Fonte: ArrudaConsult (2023)

O Diagrama de *Bow tie*, indicado pela Figura 1, representa graficamente as etapas para uma análise de criticidade do equipamento.

Os equipamentos de alta criticidade possuem um acompanhamento com maior frequência para que as falhas sejam evitadas e a produção e segurança não seja afetada.

Por exemplo, para o caso de falha da bomba centrífuga (EVENTO), é feita a análise antes (CAUSA) e depois (IMPACTO), conforme o diagrama de *bowtie*. Para prevenção da causa, é feito um acompanhamento mensal da condição do equipamento (CONTROLE), como a análise de vibração. Para mitigação da falha, é necessário uma redundância, para que a parada inesperada não pare o sistema e, por consequência, a produção.

3.3 BOMBA CENTRIFUGA

SEGUNDO A NORMA API 610 (*American Petroleum Institute*) e ISO 13709, a bomba centrífuga usada na FPSO em questão é uma bomba do tipo OHH, também conhecida como OH2. Uma bomba centrífuga com rotor em balanço, horizontal, com pés no centro, simples estágio, e bipartida radialmente (Figura 2).



Figura 2 - Bomba OHH
Fonte: Sulzer (2023)

A Figura 2, mostra uma bomba OH2 com um corte na carcaça. O item 1 é a carcaça da bomba; 2 é a carcaça de saída do fluido de alta pressão; (3) é o impelidor, que tem sua força transmitida pelo eixo (4), alinhado pelos rolamentos (5) e girado por um motor, elétrico ou a combustão. (6) é a caixa de mancais e (7) é o selo mecânico, que separa o fluido do interior da bomba.

Especificamente, o essa bomba é do modelo OHH (O2H) feita pela fabricante Sulzer, seguindo os padrões da API610, tem uma vazão de até $2250 \text{ m}^3/\text{h}$ e pressão de até 75 bar. Mais detalhes presentes no datasheet (Anexo 4).

Os elementos desse equipamento que mais precisam de atenção são os elementos rotativos e, principalmente os de acoplamento. Os rotativos sofrem maior desgaste dinâmico por conta do atrito, tanto com o fluido quanto com outros elementos. Já os elementos de acoplamento sofrem do mesmo problema, com o adicional de precisarem ter uma montagem em campo adequada. É evidente que os internos necessitam da mesma preocupação quanto a montagem, porém por ser, normalmente, realizado em oficinas com maquinário, instrumentos e equipe especializados, os defeitos de montagem dos internos são mitigados.

A bomba utilizada para esse sistema é chamada de “*Sea Water Service Pump B*”, ou SWSP-B. O sistema possui duas bombas, a Alpha e a Bravo, para ter redundância e aumentar a confiabilidade do sistema, ou seja, na necessidade de uma parada programada, ou espontânea, do equipamento para manutenção, não há necessidade de parada total da planta.

A *Sea Water Service Pump* é responsável pela alimentação dos sistemas e processos de uma planta de produção de óleo, após a água ter sido elevada e pressurizada pela *Sea Water Lift Pump*. Suas funções incluem o fornecimento de água para resfriamento, por meio dos trocadores de calor, compressores, geradores e motores; a pressurização do vaso de separação de óleo, gás e água; além do fornecimento de água para o sistema de combate a incêndios.

3.3 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Manutenção industrial é um aspecto crítico para assegurar uma eficiente operação do maquinário e componentes em diferentes cenários das indústrias. Segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 5462/1994, manutenção é definido por: A

combinação de todas as medidas técnicas e administrativas, englobando a supervisão, tem como objetivo manter ou restaurar um item a um estado em que seja capaz de cumprir sua função necessária.

Com os conceitos apresentados a seguir, têm-se o embasamento para o entendimento da manutenção industrial, sua história, conceitos básicos e filosofias, e como, com os métodos adequados, consegue-se aumentar a confiabilidade e a eficiência de um Sistema ou dispositivo.

3.2.1 Resumo Histórico

Segundo Kardec & Nascif (2009), pode-se discriminar a manutenção em 4 gerações, usando como marcos temporais as revoluções industriais.

A 1ª Revolução Industrial marcou uma transição crucial, introduzindo máquinas e equipamentos complexos e impulsionando a formalização dos processos de manutenção, inicialmente com ênfase corretiva, marca a 1ª geração da manutenção industrial, sendo feito previamente serviços de limpeza, lubrificação e reparos após uma quebra.

A subsequente evolução para a manutenção preventiva, com destaque para a busca por abordagens mais proativas, releva a 2ª geração. Durante a Segunda-guerra, visto a necessidade de maior confiabilidade dos bens duráveis pela falta de materiais e mão-de-obra, sendo implementado o Planejamento e Controle de Manutenção usado nos dias de hoje. A manutenção baseada em condições surge como um marco, considerando não apenas o tempo, mas o estado real dos equipamentos (Rehab, et al, 2021)

A terceira geração da manutenção é marcado pela crise de 1970, evidenciando a necessidade de uma produção equiparada ao mercado e a necessidade de um Sistema de aumento da qualidade relacionado à produção, diferente da 2ª geração que focava na confiabilidade do produto. Tendo início na indústria aeronáutica, a Manutenção Centrada na Confiabilidade cumpre, primordialmente, um papel de controle de qualidade exigido pelo Departamento de Defesa Americano, (Nowlan & Heap, 1978).

Apesar da produção possuir maior confiabilidade do produto, devido ao desenvolvimento de softwares e das tecnologias de automação, o planejamento e

controle dos processos tiveram que se tornar mais precisos, pelo incremento de componentes adicionados nos processos, por consequência o aumento da probabilidade de falhas. Portanto, aumento da manutenção exigida.

Por fim, a 4ª geração da manutenção que representa o panorama atual e as perspectivas futuras da manutenção industrial, considerando o papel crescente da inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e aprendizado de máquina. Que é caracterizada pela mínima, ou nenhuma, utilização de mão-de-obra humana, automatização da produção e manutenção por monitoramento, visando reduzir falhas e downtime.

3.2.2 Conceitos De Manutenção

Um dos principais objetivos da manutenção industrial é evitar falhas inesperadas nos equipamentos, minimizando assim os custos associados à paralisação da produção. Para alcançar esse objetivo, existem diferentes estratégias e métodos de manutenção que podem ser aplicados.

Em Siqueira (2005), é definido que a manutenção deve ser dividida em 7 etapas: Seleção do sistema e coleta de informações; Análise do método de Falha e Efeito; seleção das funções significantes; seleção das atividades aplicáveis; avaliação da efetividade das atividades; seleção das atividades aplicáveis e efetivas; definição da periodicidade das atividades.

Em Kardec & Nascif (2009), manutenção é definida como sendo um modelo estratégico de aumento de efetividade de uma linha de produção. Com “*Benchmarks*” dos sistemas utilizados e das empresas concorrentes para aquisição de dados. Com a análise dos dados obtidos, o PCM (Planejamento e Controle da Manutenção), é criado, tornando a produção mais efetiva e confiável, devido à redução de Downtime, custos e aumento da segurança.

Já em Xenos (1998), a manutenção é classificada como uma ferramenta de manutenibilidade do sistema, ou seja, uma interferência sem alteração da originalidade do equipamento, e uma ferramenta de melhoria, que busca a substituição de uma componente do equipamento a fim de melhorá-lo, ou adequá-lo melhor para atividade em ocorrência.

Mesmo com abordagens diferentes, os autores supracitados têm o mesmo objetivo: Aumento da Produtividade e Redução de Gastos.

3.2.3 Métodos De Manutenção

Os métodos de manutenção são representados pelas atividades técnicas de manutenção, geridos pela Gestão pela Qualidade Total (GQT). De forma resumida, tem-se a manutenção produtiva, que é mais uma estratégia organizacional do que uma atividade técnica, englobando as manutenções corretivas, preventivas e preditivas.

Pode ser observado na figura 3, o diagrama de métodos de manutenção organizado baseando-se na GQT, Xenos (1998).

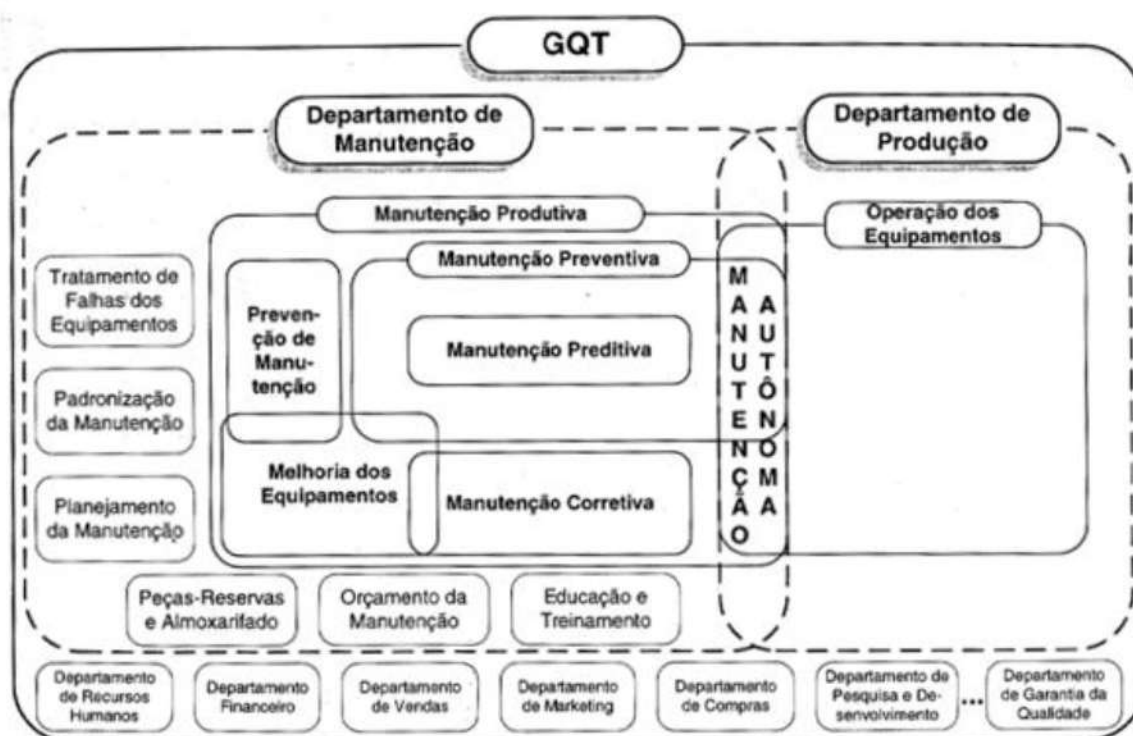


Figura 3 - Diagrama de Gestão da Qualidade Total
Fonte: Xenos (1998)

Manutenção corretiva é a denominação da atividade realizada em um equipamento ou sistema após a ocorrência da falha. Mesmo com tecnologias de monitoramento, posteriormente explicadas no presente estudo, para controle da

condição, esse método é utilizado por conta do impacto econômico que a paralização desse equipamento ou Sistema teria para a produção.

Manutenção Preventiva é a denominação da atividade realizada periodicamente, sendo a principal atividade realizada na operação. Como detalhado por Siqueira (2005), a implementação de uma MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) possui 7 etapas, sendo uma delas a análise dos sistemas e coleta de informações, tais como manual do equipamento e dados de funcionamento do Sistema. Além disso, o uso do *Benchmarking*, Kardec e Nascif (2009), para comparação de dados entre diferentes empresas do mesmo segmento e aplicação em diferentes sistemas, para criação de uma “Filosofia de Manutenção”, que, conforme a ABNT NBR 5462/1994, é um “conjunto de princípios para a organização e execução da manutenção”, ou seja, criação de um PCM baseado em dados reais e experiências prévias.

Por último, tem-se Manutenção Preditiva, a qual baseia-se pelo monitoramento das condições de componentes críticos para funcionamento de um equipamento ou Sistema, dessa forma, realizando a intervenção do componente em alarme crítico, reduzindo o *downtime* e evitando uma possível falha crítica no futuro.

A manutenção preditiva é composta por inúmeras técnicas de inspeção da condição de saúde do equipamento, sendo as mais utilizadas a termografia (Figura 4), tribologia, análise de óleo e análise de vibração.

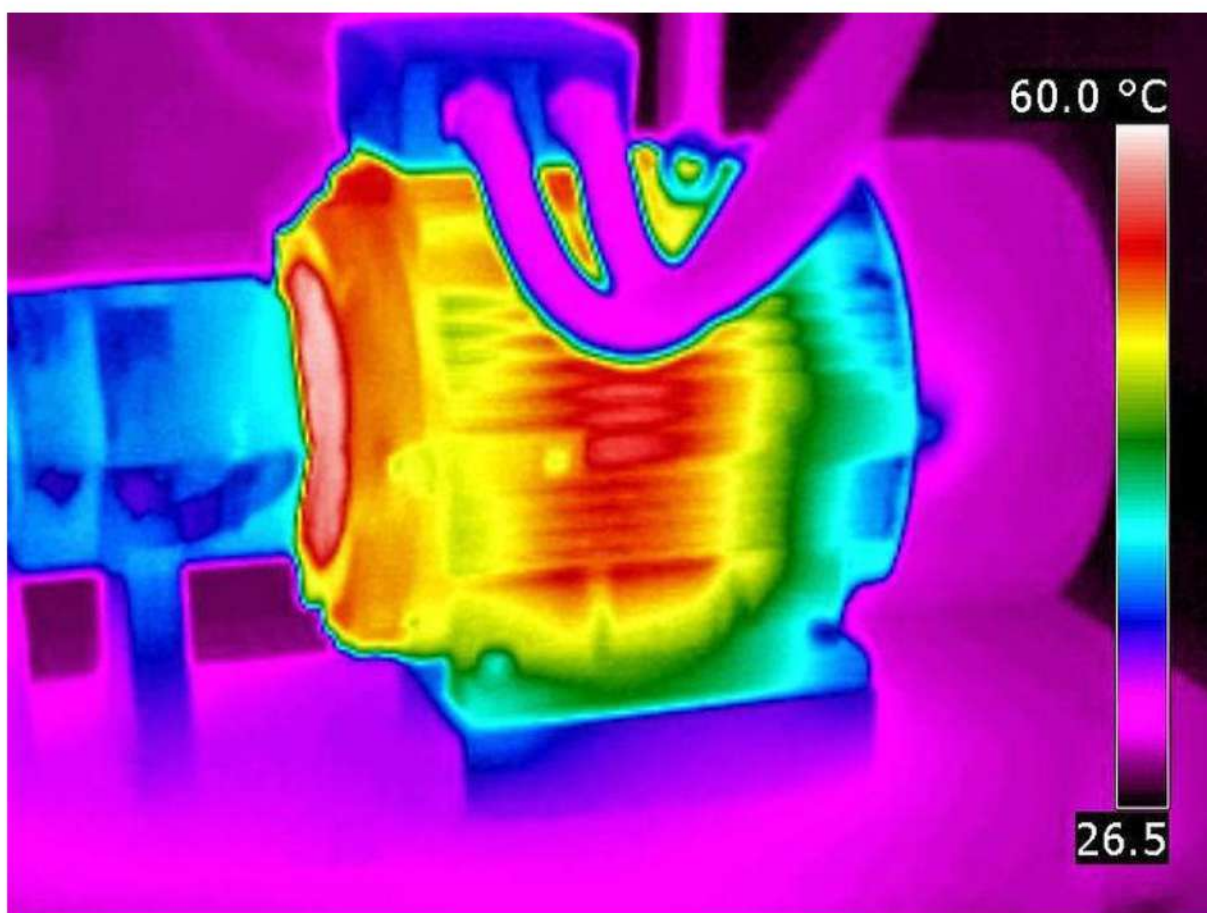


Figura 4 - Análise por Termografia
Fonte: Abecom (2023)

A Figura 4 representa a imagem de uma análise por termografia, com as cores bem destacadas é possível detectar zonas com alta temperatura (zonas avermelhadas) que podem indicar alguma falha caso a temperatura seja maior que a temperatura de operação do equipamento, em contraste com as zonas que não apresentam alteração de temperatura com o ambiente (zonas arroxeadas). Analisando a termografia da Figura 4 ,pode ser observado que o motor apresenta um aumento de temperatura no acoplamento com o eixo, o que pode indicar uma falha na montagem e que precisa de uma avaliação da equipe para resolução do problema.

Já na análise de vibração, sensores, mais especificamente acelerômetros, são colocados em pontos específicos de um equipamento para leitura das vibrações, conforme mostrado na Figura 5.

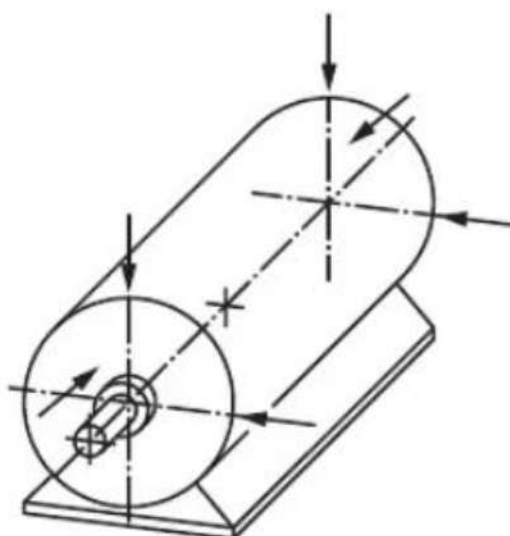


Figura 5 - Posicionamento dos Sensores para uma máquina elétrica pequena.
Fonte: ISO (2022)

Na Figura 5 é marcado pelas setas que indicam o posicionamento do sensores que realizarão a leitura da vibração. Mais a frente no estudo é feita uma análise mais afundo desses pontos.

Essas leituras são representadas por espectros de vibração (Frequência x Velocidade ou Frequência x Aceleração) de forma que cada falha fique evidente em uma simples inspeção visual, como mostrado na Figura 6.

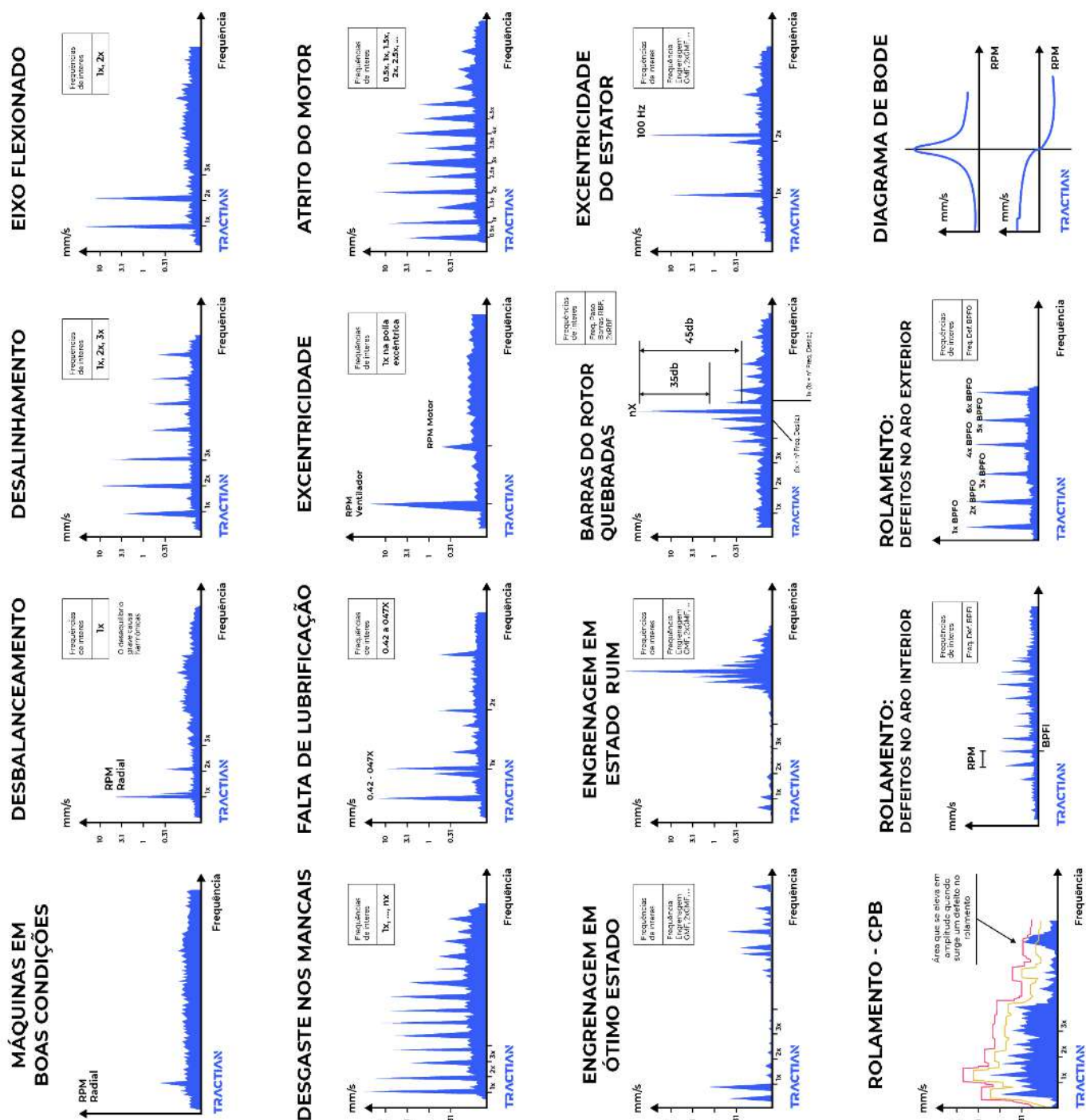


Figura 6 - Espectros de Vibração
Fonte: Tractian (2025)

Os espectros de vibração da Figura 6 **Error! Reference source not found.** são exemplos de falhas identificadas por meio de uma análise de vibração, de maneira que cada assinatura espectral caracteriza uma falha específica. Esse assunto será tratado, também. Será tratado com maior profundidade mais adiante do trabalho.

3.2.4 Indicadores de Produtividade

Como forma de medir a produtividade e a efetividade da aplicação da manutenção preditiva são utilizados indicadores de produtividade, mais conhecidos como KPIs (*Key Productive Indicators*). Por exemplo, para medir a eficiência de uma máquina é feito um cálculo da produção teórica com a produção real, chamado de OEE (*Overral Equipment Effectiveness*) Efetividade Total do Equipamento. O OEE leva em conta a disponibilidade do equipamento e equipe, desempenho e qualidade da produção

O OEE é um indicador que leva em conta muitas variáveis, a disponibilidade do equipamento é uma delas. Para mensurar essa disponibilidade devemos levar em conta os tempos de parada, falhas e relação Homem-Máquina, por exemplo.

Para medirmos a disponibilidade de um equipamento, são utilizados, principalmente, três KPIs: MTBF (*Mean Time Between Failures*), MTTF (*Mean Time To Failure*) e MTTR (*Mean Time To Repair*).

O MTBF, ou Tempo médio entre falhas, é uma medida comumente usada para equipamentos que operam até a falha (*Run Until Failure*). Assume-se que o equipamento opera até a necessidade de um reparo. Pode ser visualizado na

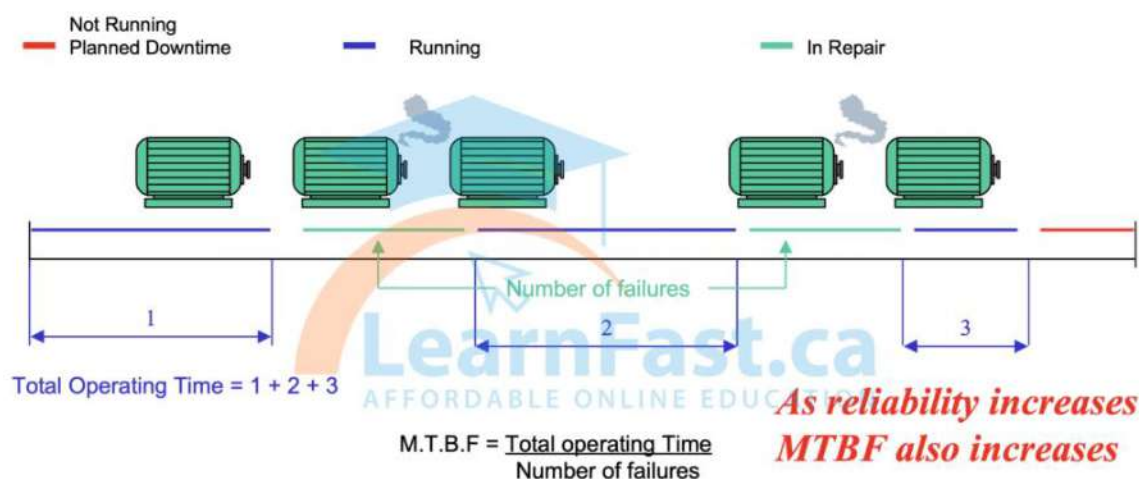


Figura 7 – MTBF
Fonte: leanmanufacturing.online (2025)

A Figura 7, torna gráfico o MTBF (tempo entre falhas) e o MTTR (tempo em reparo). Dessa maneira, fica claro o porquê do aumento do MTBF, aumenta a confiabilidade do equipamento, pois o tempo entre as falhas aumentado indica maior tempo de operação, que, por sua vez, indica maior produtividade.

O MTTF, ou tempo médio até a falha, é um indicador que mede o tempo de um equipamento até a falha. Comumente usados para equipamentos que não são reparáveis, como resistências, por exemplo. FM2S

Por fim, temos o MTTR, ou tempo médio de reparo. O quanto tempo a máquina fica parada para o reparo. FM2S. O MTTR é um dos indicadores mais afetados positivamente pela manutenção preditiva. A previsão de uma falha, através da análise dos métodos de análise, como o de espectro de vibração, fornece ao engenheiro a possibilidade de planejar a parada, comprar os materiais para a manutenção corretiva do sistema em estado crítico, sem que haja a falha catastrófica, melhorando, em todos os sentidos, a manutenção da planta.

A disponibilidade do equipamento pode ser avaliada pelo uso dos indicadores MTTR e MTBF .

$$Av = \frac{1 - MTTR}{MTBF + MTTR} \quad [1]$$

A equação 1 representa a disponibilidade de dado equipamento, onde, A_v representa a *availability*, ou disponibilidade, do equipamento. MTTR é o indicador do tempo medio do REPARO e o MTBF é o tempo ENTRE reparos, ou seja, periodo disponível. A soma desses dois representa o tempo total do equipamento, tanto operacional, quanto fora de operação. Com essa informação, é calculada a disponibilidade do equipamento, e , se feito com os outros equipamentos do sistema, tem-se o a disponibilidade do sistema.

3.3 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Vibração é o movimento oscilatório de uma partícula, conhecido como vaivém, pode ser classificado em dois tipos: natural e artificial. Um exemplo de vibração natural ocorre durante um terremoto (VIBRAÇÃO, 2023). Para RAO (2008), a teoria de vibração aborda o estudo dos movimentos oscilatórios dos corpos e das forças relacionadas a esses movimentos. A partir dessas definições tem-se um ponto de partida para o entendimento dos componentes equivalentes de um corpo oscilatório, os sistemas que o compõe, a classificação dessas dinâmicas e o procedimento de análise de vibrações.

3.2.1 Sistemas De Vibrações E Seus Elementos

Em Rao (2008), um sistema de vibrações possui um meio de armazenar energia potencial (mola ou rigidez), um meio de armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de dissipação de energia (amortecedor).

Os sistemas de vibrações podem ser classificados em sistemas de vibração livre, onde há uma somente uma perturbação inicial sem uma fonte externa agir sobre o Sistema, e sistemas de vibração forçada, onde uma força externa atua no corpo constantemente, um motor, por exemplo.

Ainda em RAO (2008), para que um sistema de vibração se mantenha constante, ou seja, sem dissipação de energia, é necessário a existência de uma fonte externa para que o movimento harmônico mantenha seu perfil. Dado isto, têm-se as

classificações de vibração não-amortecida e amortecida. Em alguns sistemas, a perda por dissipação é tão pequena que não possui efeito relevante ao Sistema.

Pode-se, também, classificar a vibração quanto a linearidade do comportamento de seus componentes, para vibrações lineares, as equações diferenciais do movimento são lineares, já para não lineares, a equação diferencial do movimento é não-linear.

Por fim, tem-se a classificação quanto à previsibilidade da excitação. Em excitações conhecidas a qualquer instante, a vibração é determinística. Porém, em excitações imprevisíveis a qualquer momento, a vibração é aleatória. (RAO, 2008).

3.2.2 Graus de Liberdade

O grau de liberdade é definido como o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para descrever completamente o movimento de todas as partes de um sistema vibratório. Para um sistema com ao menos um grau de liberdade, é preciso especificar os valores das variáveis que descrevem seu estado (posição, velocidade, aceleração), escolhendo um sistema de coordenadas adequado.

O número de graus de liberdade é igual ao número de coordenadas que influenciam no modo de vibração, a batida de um martelo em uma bigorna, conforme Figura 8, por exemplo, pode ser analisado com um ou dois graus de liberdade.

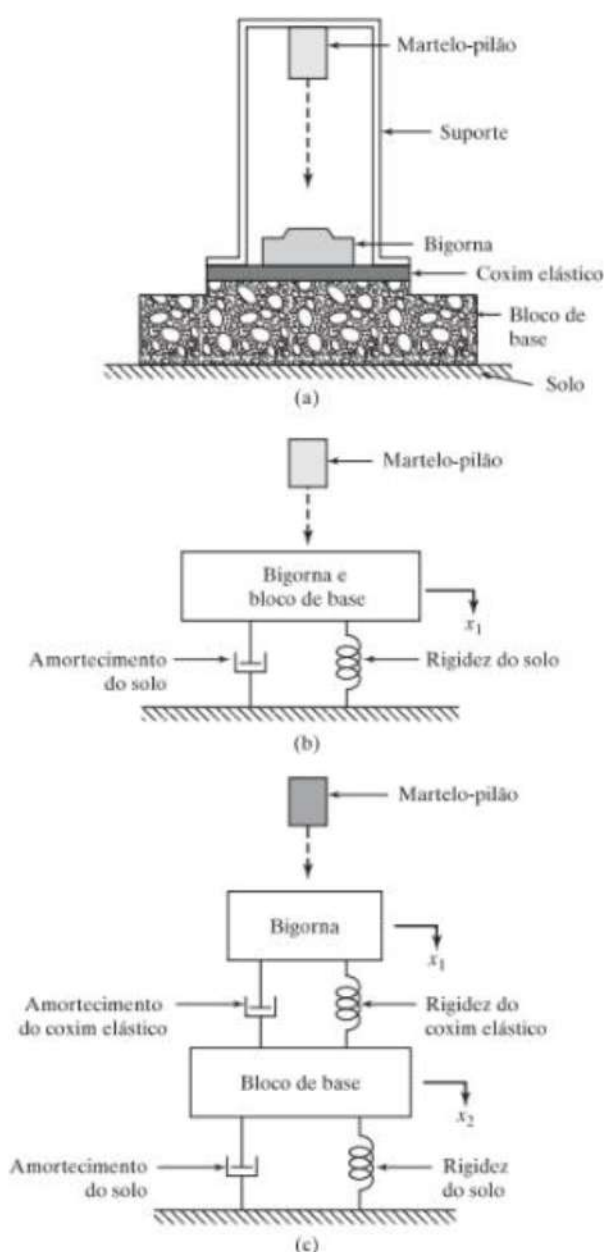


Figura 8 - Martelo e Bigorna
Fonte: Rao (2009)

É observado, na Figura 8, a representação de um martelo que irá imprimir numa bigorna uma força F que iniciará a vibração, modelo (a). Os modelos representados por (b) e (c) são interpretações do mesmo sistema para a modelagem matemática. O modelo (b) representa um sistema de um grau de liberdade, pois temos somente uma coordenada de movimentação, x_1 , que representa a movimentação da bigorna. Já o modelo (c), faz uma análise com dois graus de liberdade, por levar em

consideração o movimento da bigorna e do bloco de base, por possuir duas coordenadas de movimento interdependentes.

3.2.3 Modelagem Matemática

Um sistema vibratório pode experimentar dois tipos de vibrações: vibração livre e vibração forçada. A vibração livre ocorre quando o sistema sofre uma perturbação inicial e depois é deixado para vibrar por conta própria, sem a ação de forças externas; um exemplo é um pêndulo deslocado de sua posição inicial. Já a vibração forçada acontece quando o sistema é submetido a uma força oscilatória, como um corpo sob a influência de um motor de massa excêntrica.

Segundo Rao (2009), o objetivo da modelagem matemática é transcrever os elementos que governam o movimento do sistema. Seguindo o método didático usado na Figura 8 como referência, pode-se fazer uma análise vibracional de um carro considerando um grau de liberdade, com valores de massa, rigidez e amortecimento equivalentes, ou com infinitos graus de liberdades, como a torção e flexão da estrutura como um dos elementos a serem calculados.

Se a frequência dessa força for igual ou próxima da frequência natural do sistema, o fenômeno de ressonância ocorre, levando o sistema a experimentar grandes oscilações, o que geralmente não é desejável. Os conceitos de frequência natural e ressonância serão abordados com mais detalhes posteriormente.

2.4.3.1 Vibração livre sem amortecimento

Um sistema massa-mola quando deslocado na direção de X e liberado para oscilar livremente, apresenta uma resposta em função do tempo. Considerando que a massa da mola e seu amortecimento interno são desprezíveis (mola ideal), a equação de movimento do sistema pode ser descrita pela Lei de Hooke [2]:

$$F = -kx \quad [2]$$

Onde “F” é a força restauradora exercida pela mola, “k” é a constante da mola e “x” é o deslocamento em relação à posição de equilíbrio.

A partir da segunda Lei de Newton [3], pode-se escrever a equação de movimento do sistema:

$$ma = -kx \quad [3]$$

Onde “m” é a massa do corpo e “a” é sua aceleração. Substituindo a aceleração pela derivada segunda em relação ao tempo ($d^2x/dt^2 = \ddot{x}$), obtem-se a equação diferencial [4]:

$$m\ddot{x} = -kx \Rightarrow m\ddot{x} + kx = 0 \quad [4]$$

Dividindo a equação 4 por m, tem-se:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad [5]$$

A solução de uma EDO de coeficientes constantes, linear, homogênea e de qualquer ordem é uma função exponencial da forma:

$$x(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad [6]$$

Para $\lambda_1 \neq \lambda_2$.

$$x(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 t e^{\lambda_2 t} \quad [7]$$

Para $\lambda_1 = \lambda_2$.

Onde A_1 e A_2 dependem das condições iniciais do problema, $x(0)$ e $\dot{x}(0)$, e λ_1 e λ_2 são as raízes da equação característica do problema, dada por:

$$m\lambda^2 + k\lambda = 0 \quad [8]$$

Substituindo a solução da EDO na equação 5 e solucionando-a, têm-se:

$$\lambda^2 e^{\lambda t} + \frac{k}{m} e^{\lambda t} = 0 \quad [9]$$

$$\lambda^2 + \frac{k}{m} = 0 \quad [10]$$

$$\lambda = \mp i \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [11]$$

A solução geral da EDO pode ser descrita como a soma de todas as suas soluções, ou seja, a combinação linear de λ_1 e λ_2 :

$$x(t) = C_1 e^{i\sqrt{\frac{k}{m}}t} + C_2 e^{-i\sqrt{\frac{k}{m}}t} \quad [12]$$

De maneira que C_1 e C_2 são a amplitude do movimento e dependem das condições iniciais do sistema. Considerando a solução com base na identidade de Euler:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad [13]$$

Combinando as equações 12 e 13:

$$x(t) = C_1 \left(\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + i \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t \right) + C_2 \left(\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t - i \sin \sqrt{\frac{k}{m}}t \right) \quad [14]$$

Sendo as funções seno e cosseno linearmente independentes:

$$x(t) = C_1 \left(\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t \right) + C_2 \left(\sin \sqrt{\frac{k}{m}}t \right) \quad [15]$$

Onde as funções $\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t$ e $\sin \sqrt{\frac{k}{m}}t$ descrevem o movimento de frequência angular igual a:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ rad/s} = \omega_n \quad [16]$$

A Equação 16, é conhecida também por definir a frequência natural do sistema ω_n .

As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre de uma estrutura após a força que provocou seu movimento ser cessada. Em outras palavras, representam a velocidade com que a estrutura vibra quando não há forças aplicadas sobre ela. Essa frequência é diretamente proporcional à rigidez e inversamente proporcional à massa da estrutura, sendo expressa por um número real positivo com unidade em radianos por segundo.

A vibração causa um movimento periódico. A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico. O movimento oscilatório pode ser repetido regularmente, como no pêndulo de um relógio, ou apresentar irregularidades consideráveis, como em terremotos. Quando o movimento se repete em intervalos iguais de tempo “T”, ele é denominado Movimento harmônico (Figura 9). O tempo de repetição “T” é chamado período da oscilação, e seu inverso é conhecido como frequência (f), que representa o número de ciclos completos por unidade de tempo.

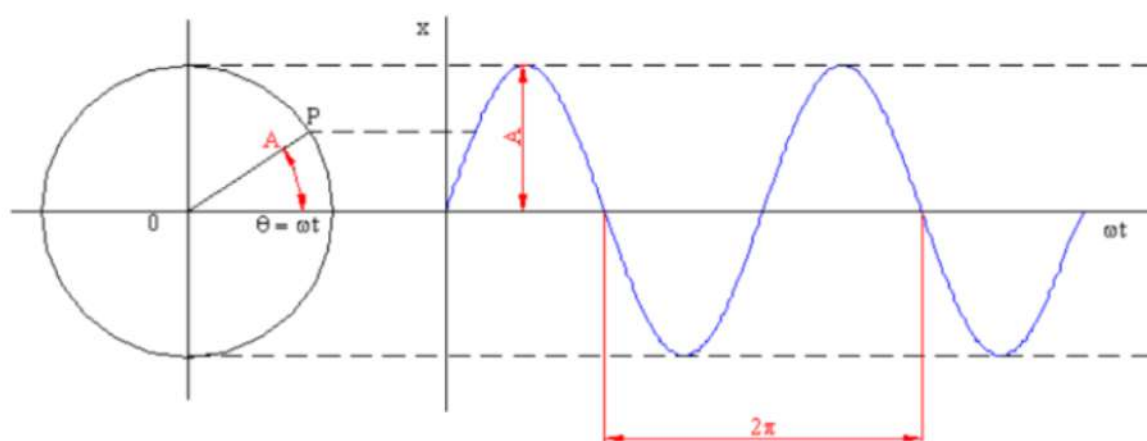


Figura 9 - Movimento harmônico

$$x(t) = A \cos(\omega t - \varphi) \quad [17]$$

A Figura 9 representa graficamente a equação 17. De forma que A é a amplitude máxima da oscilação em relação ao seu ponto de equilíbrio, ω é a velocidade angular da oscilação, t é a duração e φ representa a fase

As frequências naturais (equação 16) indicam a taxa de oscilação livre de uma estrutura após a força que provocou seu movimento ser cessada. Em outras palavras, representam a velocidade com que a estrutura vibra quando não há forças aplicadas sobre ela. Essa frequência é diretamente proporcional à rigidez e inversamente proporcional à massa da estrutura, sendo expressa por um número real positivo com unidade em radianos por segundo.

A vibração causa um movimento periódico. A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico. O movimento oscilatório pode ser repetido regularmente, como no pêndulo de um relógio, ou apresentar irregularidades consideráveis, como em terremotos. Quando o movimento se repete em intervalos iguais de tempo T , ele é denominado Movimento Periódico. O tempo de repetição T é chamado período da oscilação, e seu inverso é conhecido como frequência (f), que representa o número de ciclos completos por unidade de tempo.

Uma massa suspensa por uma mola que é deslocada de sua posição de equilíbrio oscilará em torno desse equilíbrio com um movimento harmônico simples. Ao criar um gráfico que mostra a relação entre a distância da massa à posição de equilíbrio e o tempo, a curva resultante será uma senoide (Figura 10) como mostrado na Figura 9.

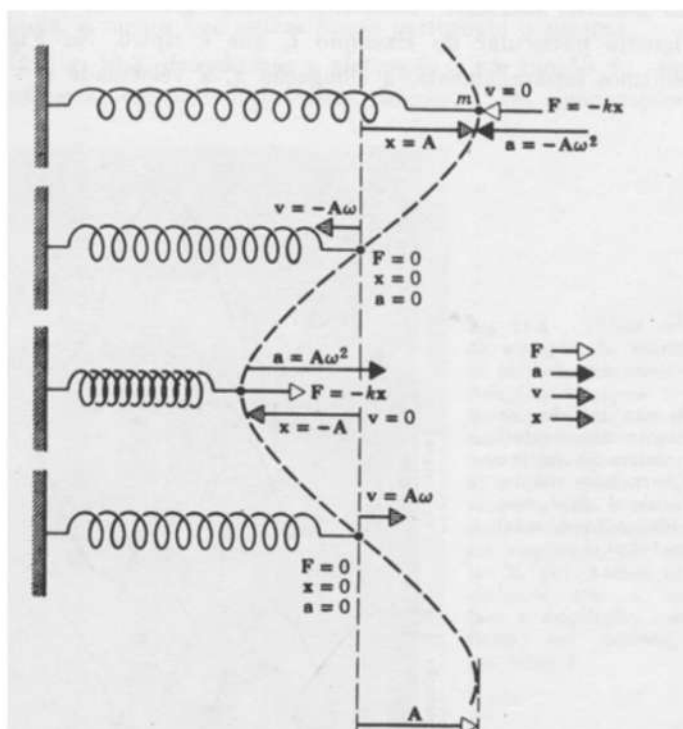


Figura 10 - Movimento harmônico simples.
Fonte: Shigley

A Figura 10 exemplifica o movimento harmônico simples de um sistema massa-mola oscilando entorno do equilíbrio estático. Pode ser observado a relação entre as forças do sistema vibratório atuando na partícula pelo tempo.

2.4.3.1 RMS

A Raiz Média Quadrática (RMS) é uma medida essencial na análise de vibrações, proporcionando uma avaliação da intensidade total da vibração ao considerar tanto a amplitude quanto a frequência dos componentes do sinal.

Utilizar o RMS é vantajoso por diversas razões. Diferentemente das medidas de pico, que se concentram apenas nos valores extremos, o RMS fornece uma visão abrangente da energia presente no sinal. Essa métrica correlaciona-se diretamente com a severidade das falhas, aumentando conforme a intensidade da vibração, e é padronizada, o que facilita a comparação entre diferentes máquinas e tipos de falhas.

O cálculo do RMS, ou V_{rms} , é representado a baixo pela equação:

$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt}$	[18]
---	------

De maneira que V_{RMS} é a velocidade de raiz média quadrática, T é o tempo total e V é o valor das velocidades aquisitados. De forma visual tem-se a Figura 11.

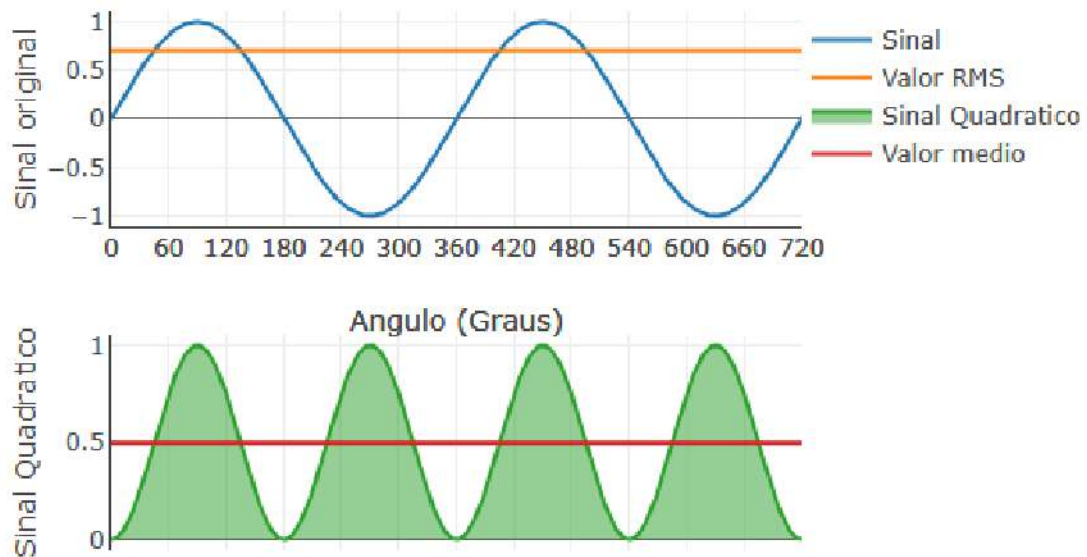


Figura 11 - Visualização do RMS
Fonte: Eltgeral Editada(2025)

A interpretação dos valores de RMS varia conforme o tipo de máquina, a velocidade e a posição dos sensores. De maneira geral, enquanto mais alto for o RMS, maiores as vibrações e maior o risco de falha.

2.4.3.2 Vibração forçada com amortecimento com 1 grau de liberdade.

A fim de se ter uma boa aproximação do sistema real, será feito uma explanação de um sistema de vibrações considerando amortecimento e a ação de uma força eterna. Um bom exemplo desse sistema, é uma motor a diesel com uma base de borracha, o o movimento oscilatório dos pistões é a “força externa” e a base de borracha é tanto um elemento rígido (mola) quanto um elemento dissipativo (amortecedor). De forma simplificada, a Figura 12, representa esse sistema.

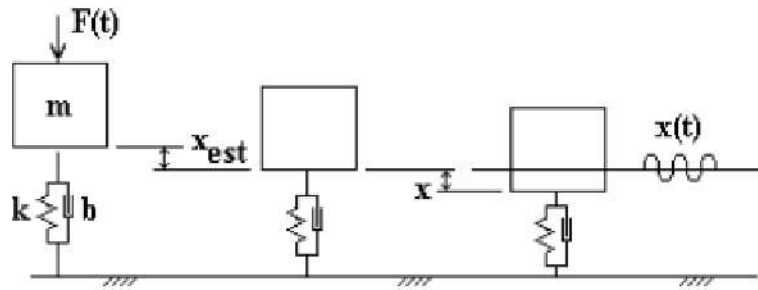


Figura 12 - Sistema Massa-Mola-Amortecedor
Fonte: Silva, 2016

A Figura 12 é uma representação de uma Sistema de Vibrações, retratando a mola de rigidez “k”, o amortecedor “b”, a massa “m” e uma fonte externa “F(t)”, e o deslocamento da massa “x” após a aplicação da Força. O deslocamento estático “x(est)”, que é o deslocamento realizado pelo Sistema ao entrar em equilíbrio estático, ou seja, antes da atuação da força “F(t)”.

Ao realizarmos o equilíbrio estático desse Sistema, temos a equação:

$$mx'' + bx' + kx = F(t) \quad [19]$$

A equação 22 é uma equação diferencial de segundo grau que representa o equilíbrio de forças estático de um sistema de vibração forçada. Para o caso de vibração livre, considera-se $F(t) = 0$.

A solução dessa equação depende dos parâmetros supracitados de rigidez, amortecimento e massa do sistema, considerando a fração de amortecimento (ζ), a frequência natural (ω_n), e a vibração livre, a equação 22 pode ser reescrita como:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad [20]$$

Onde:

$$\zeta = \frac{b}{b_{cr}} \quad [21]$$

A fração de amortecimento, representada na equação 24, é a razão entre o amortecimento “b” e o amortecimento crítico “ b_{cr} ”. E a frequência natural, em radianos

por segundo, representada por “ ω_n ” na equação 20, é a frequência da qual o sistema vibra sem uma perturbação inicial Rao (2008).

A equação 23, tem como uma de suas soluções a expressão:

$$x(t) = Ae^{st} \quad [22]$$

A solução, representada pela equação 25, funciona para um sistema oscilatório e um não oscilatório, dependendo do quão amortecido é esse sistema. Conforme representação:

$$s = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad [23]$$

O valor de “s”, representa o amortecimento do sistema em relação à fração do amortecimento (ζ). Para os casos de $\zeta \geq 1$, trata-se de um amortecimento subcrítico e crítico, ou seja, o movimento é não oscilatório. Para o caso de $\zeta < 1$, trata-se de um movimento oscilatório, Figura 13, Silva (2016).

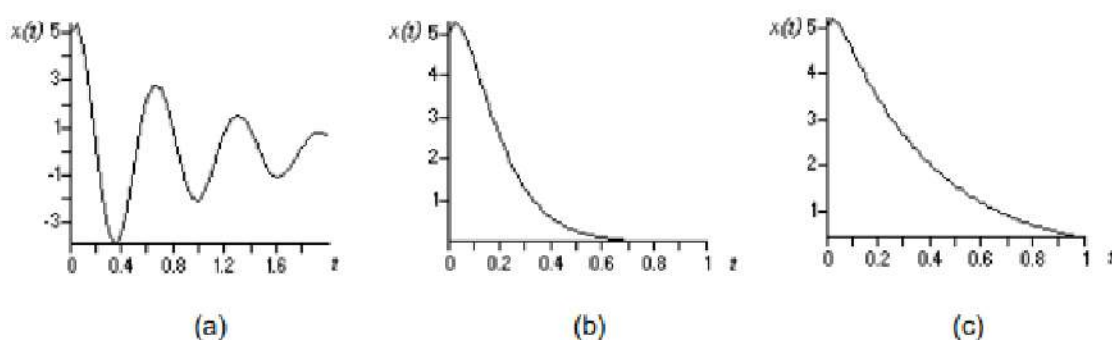


Figura 13 - Vibração de sistemas massa-mola-amortecedor
Fonte: Silva, 2016

A Figura 13, ilustra a relação da fração de amortecimento. O gráfico a, mostra um sistema subcrítico; o gráfico b mostra um sistema crítico; e o gráfico c mostra um sistema supercrítico.

O sistema representado pelo gráfico (a), na Figura 13, é um sistema de amortecimento subcrítico que possui um decremento logarítmico. Representado pela equação:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_{n+1}} \quad [24]$$

A equação 27 representa o decremento logarítmico que é a relação entre as amplitudes subsequentes na resposta de um sistema subamortecido. Onde δ é o decremento logarítmico, e n é o número de ciclos.

2.4.3.3 Ressonância

A ressonância é um fenômeno que ocorre em sistemas vibratórios quando a frequência de uma força externa aplicada coincide ou se aproxima da frequência natural do sistema. Quando isso acontece, a amplitude de vibração do sistema aumenta significativamente, podendo causar danos estruturais ou falhas em equipamentos, Rao (2018).

Esse fenômeno tem grande influência no funcionamento do equipamento. Caso a frequência da força externa seja igual ou próxima à frequência do equipamento, essa força é transferida de forma mais eficiente, aumentando a amplitude da vibração. Esse efeito pode ser resolvido aumentando o amortecimento do sistema, como coxins de borracha, ou sistemas mais complexos de amortecimento dinâmico para casos mais severos, ou que exijam maior precisão (MENNA, 2007).

Para demonstração da ressonância, utiliza-se a equação 29:

$$A = \frac{\frac{f}{k}}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad [25]$$

Onde “ A ” é a amplitude de vibração, “ f ” é a amplitude da força externa e “ k ” é a constante de rigidez. Pode-se notar que a aproximação da relação ω/ω_n a 1, a amplitude aproxima-se de infinito. Na Figura 14, pode ser observado esse efeito para diferentes tipos de amortecimento.

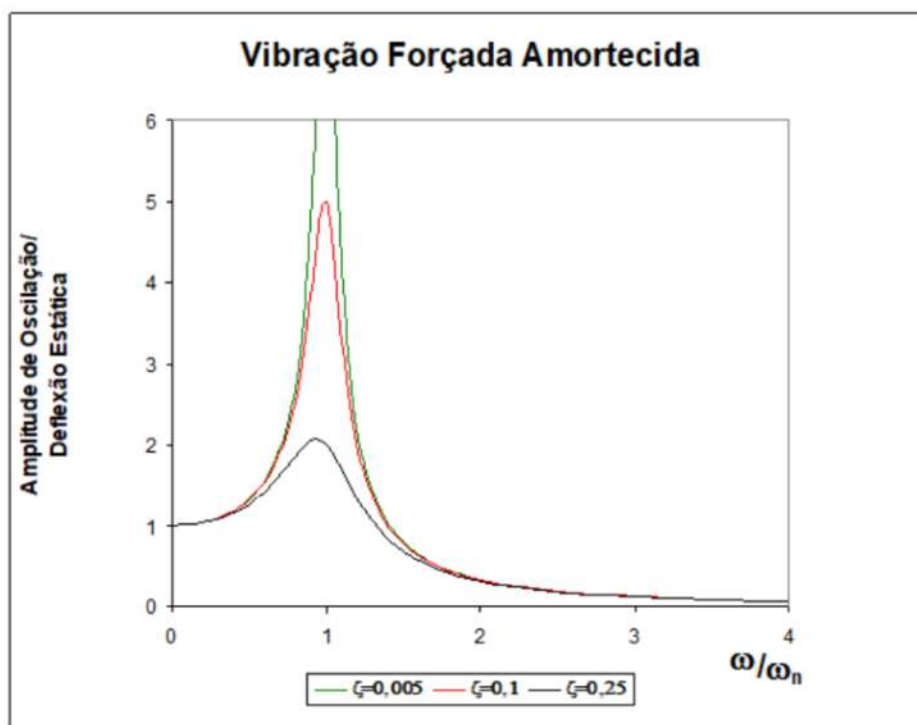


Figura 14 - Ressonância em 1 grau de liberdade.

A Figura 14 representa o impacto do aumento da razão do amortecimento (ζ), presente na equação 20, com a consequente redução da amplitude da oscilação. Dessa maneira, fica provado a importância do amortecimento para conter a ressonância.

3.2.4 Sensores

Os sensores de vibração comumente utilizados na indústria do óleo e gás, são os acelerômetros, os sensores de velocidade e os sensores de deslocamento. Acelerômetros, especialmente os piezoelétricos, são preferidos devido à sua precisão e robustez, medindo a aceleração das vibrações em uma ampla gama de frequências. Sensores de velocidade medem a velocidade da vibração e são adequados para frequências intermediárias, sendo ideais para equipamentos de baixa a média velocidade. Sensores de deslocamento, por sua vez, medem o deslocamento físico causado pela vibração e são eficazes em aplicações de baixa frequência, monitorando o movimento relativo entre dois pontos. Além disso, sistemas de monitoramento online integram esses sensores para fornecer análises contínuas e em tempo real, enquanto

sensores de vibração sem fio ganham popularidade pela facilidade de instalação e transmissão remota de dados, especialmente em locais de difícil acesso.

Cada um desses sensores possui aquisições de faixas de frequência diferentes e são colocados em pontos específicos do componente a ser analisado (Antoniol, 2008). No caso de estudo, são 4 pontos representados pela Figura 15.

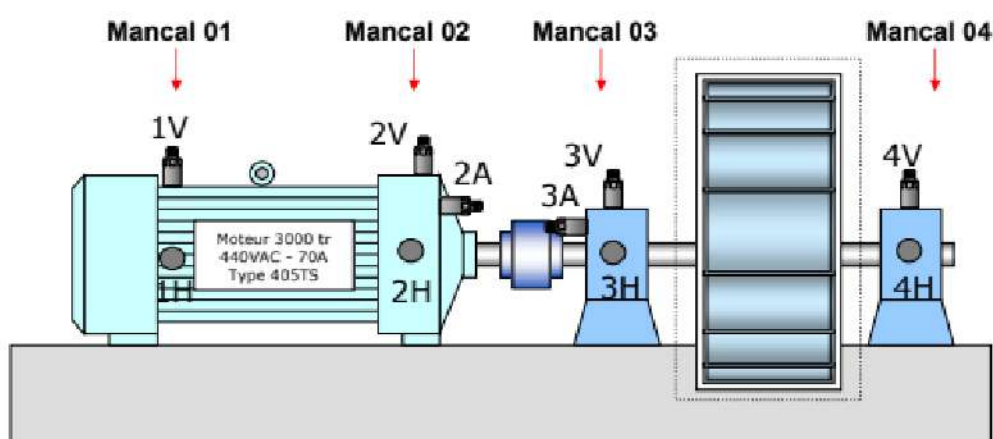


Figura 15 - Posicionamento dos sensores
Fonte: Antoniol, 2008

Na Figura 15, os 4 pontos de posicionamento dos sensores são apresentados por “mancal 01”, fixado na carcaça do motor, “mancal 02”, saída do motor, “mancal 03”, eixo acoplado e “mancal 04”, eixo não acoplado.

Teoricamente, a escolha entre os três parâmetros - aceleração, velocidade ou deslocamento - para medir a vibração é indiferente. Ao realizar uma análise de frequência de banda larga de um sinal de vibração com base nesses três parâmetros, todos exibirão os mesmos componentes de frequência, porém com representações de amplitudes médias distintas, conforme ilustrado na Figura 16 (Antoniol, 2008).

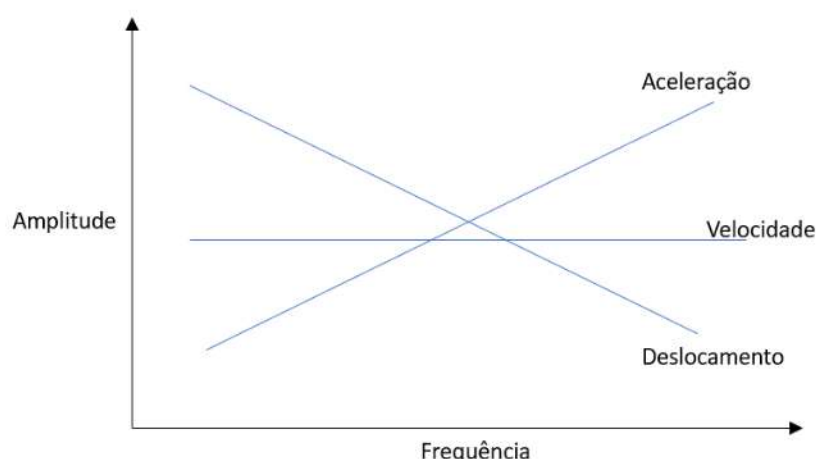


Figura 16 - Relação de Amplitudes entre Deslocamento, Velocidade e Aceleração - Adaptado
Fonte: E&P-UO-RIO (2012)

A Figura 16 representa a relação da amplitude de acordo com o deslocamento, aceleração e velocidade.

Além disso, a escolha do parâmetro é feita de forma empírica por conhecimentos e testes práticos, como a medição da aceleração é comumente utilizada para componentes de alta frequência (Antoniol, 2008)

A força necessária para produzir uma resposta específica varia consideravelmente com a frequência, impondo restrições reais às medições que podem ser realizadas por um determinado transdutor. Por exemplo, uma aceleração de 100 Gs a 10 kHz, uma amplitude inaceitável na frequência típica de passagem de palhetas em turbinas, corresponde a um deslocamento de apenas 0,5 μm . Nesse cenário, um nível de força inadmissível gera um deslocamento que se torna imensurável, mesmo estando dentro da frequência de resposta especificada para a maioria dos sistemas de medição de deslocamento (E&P-UO-RIO,2012).

Sistemas de medição de aceleração enfrentam um problema semelhante. Conforme representado na Figura 16, com a redução da frequência, as limitações de força diminuem progressivamente a relação sinal/ruído, o que dificulta a medição de movimentos moderados em termos de aceleração. A natureza dos sistemas mecânicos implica que deslocamentos significativos ocorrem apenas em baixas frequências; assim, as medições de deslocamento apresentam valor limitado no estudo abrangente de vibrações mecânicas. O deslocamento é comumente utilizado

como indicador de desbalanceamento em componentes de máquinas (E&P-UO-RIO,2012).

3.2.5 Aquisição e Interpretação dos Sinais

Conforme apresentado anteriormente, os dados dos sensores podem ser adquiridos por vários métodos, aquisição local por meio de aparelho leitor de sinais, como o SKF Microlog GX, que será explicado mais adiante, e até mesmo por monitoramento online, ou seja, enviam as leituras em tempo real da vibração do equipamento para interpretação pelo programa de análise de vibração.

A decomposição de um sinal de vibração complexo em suas várias componentes senoidais, cada uma caracterizada por sua amplitude e sua frequência, é realizada por meio de uma transformação de tempo para frequência conhecida como Transformada de Fourier. Essa função matemática transforma o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, resultando em uma representação conhecida como espectro de frequência (Antoniol, 2008), conforme Figura 17.

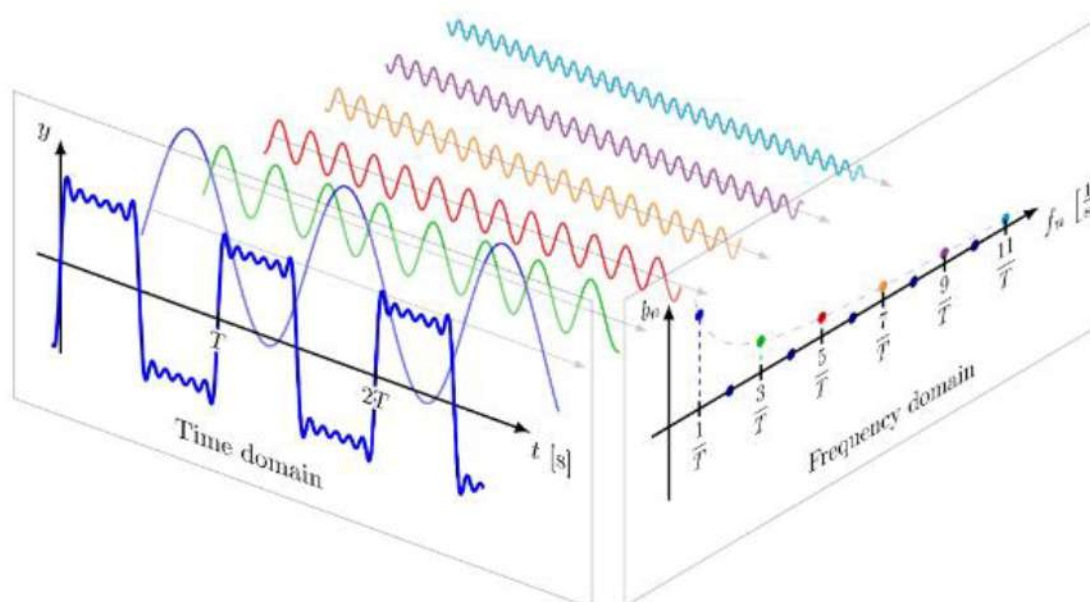


Figura 17 - Visualização da aplicação da Transformada de Fourier
Fonte: O’Gorman (2025)

É facilmente visualizado, na Figura 17 - Visualização da aplicação da Transformada de Fourier, como é feita a transformação no domínio do tempo para o domínio da frequência. Nos analisadores de espectros modernos, a Transformada de Fourier é implementada na forma de FFT (Fast Fourier Transform ou Transformada Rápida de Fourier) para interpretação dos sinais e construção dos espectros.

De maneira simplificada, a Transformada Rápida de Fourier (FFT) é uma implementação eficiente da Transformada de Fourier Discreta (DFT). A DFT de um sinal discreto $X(n)$ com n amostras é dada pela fórmula:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \quad [26]$$

Onde, $F(k)$ representa o componente de frequência k , i é a unidade imaginária, $e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}$ é o termo de rotação complexa. Ou seja, com essa equação, é necessário N^2 passos em relação ao número de dados avaliados.

Conforme apresentado A FFT reduz a complexidade computacional da DFT de N^2 para $N \log_2 N$ utilizando o algoritmo de Cooley-Tukey. Esse algoritmo divide a DFT em um conjunto de dados igualmente espaçados, calculando separadamente as DFTs das partes par e ímpar do sinal original. (fiscomp, Acesso 09/08/2024))

Matematicamente, o sinal $x(n)$ pode ser separado em componentes de índices pares e ímpares:

$$x(n) = x(2n), \quad \text{para } n = 2n \quad [27]$$

$$x(n) = x(2n + 1), \quad \text{para } n = 2n + 1 \quad [28]$$

Assim, a DFT pode ser reescrita como:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}(2n)k} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n + 1) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}(2n+1)k} \quad [29]$$

Isso pode ser simplificado para:

$$F(k) = \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N/2}nk}}_{\text{DFT dos pares}} + e^{-i\frac{2\pi}{N}k} \cdot \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N/2}nk}}_{\text{DFT dos ímpares}} \quad [30]$$

$$F(k) = \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N/2}nk}}_{\text{DFT dos pares}} + C(k) \cdot \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N/2}nk}}_{\text{DFT dos ímpares}} \quad [31]$$

Esse processo pode ser repetido, dividindo as partes até que a DFT de cada parte seja trivialmente calculada, diminuindo o tempo de computação dos cálculos, resultando na eficiência da FFT.

3.2.6 Espectros de Vibração

Espectro de vibração consiste em uma representação gráfica da distribuição de amplitudes em função das frequências presentes em um sinal vibracional. Obtido através da aplicação da Transformada de Fourier (FFT) ou de outras técnicas de análise espectral, o espectro revela as componentes de frequência dominantes e suas respectivas magnitudes, fornecendo informações detalhadas sobre a composição do sinal.

Nessa representação, o eixo horizontal indica a frequência, geralmente expressa em Hertz (Hz), ou RPM/60, enquanto o eixo vertical representa a amplitude da vibração em cada frequência, medida em unidades apropriadas como aceleração, velocidade ou deslocamento. Picos de amplitude identificados no espectro correspondem a frequências de vibração significativas, as quais podem estar associadas a fontes específicas de excitação ou a modos de ressonância do sistema em análise.

A interpretação do espectro de vibração possibilita a identificação e o diagnóstico de condições operacionais anormais, tais como desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas e outras anomalias estruturais. Adicionalmente, a análise comparativa de espectros obtidos em diferentes momentos permite o monitoramento da evolução do estado de saúde do equipamento, auxiliando na implementação de estratégias de manutenção preditiva e preventiva.

Para rolamentos, por exemplo, as frequências de falhas são calculadas de acordo com as dimensões e tipo deles (esferas, agulhas, rolos, rolos cônicos e autocompensadores) e são definidas pela ISO 15243:2017.

A Tabela 1 e Figura 18 representam os cálculos das frequências de falha mais comuns de rolamentos, que são informados em catálogos dos fabricantes de acordo com cada tipo de rolamento.

Tabela 1 - Equações para cálculo de frequência de falha em rolamentos	
Frequências de Falha	Equações
Frequência de Gaiola	$FTF = \frac{S}{2} \left(1 \pm \frac{D \cos \phi}{d} \right) \quad [32]$
Frequência de Defeito na Pista Interna	$BPFI = \frac{S \times n}{2} \left(1 + \frac{D \cos \phi}{d} \right) \quad [33]$
Frequência de Defeito na Pista Externa	$BPFO = \frac{S \times n}{2} \left(1 - \frac{D \cos \phi}{d} \right) \quad [34]$
Frequência de Defeito na Esfera	$BSF = \frac{S \times D}{2d} \left(1 + \frac{D^2 \cos^2 \phi}{d^2} \right) \quad [35]$

Fonte: Nichterwitz (2013)

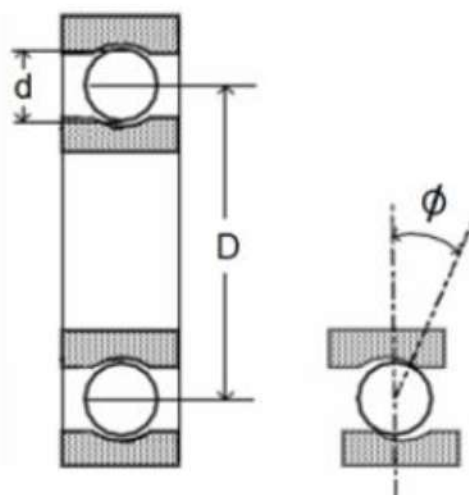


Figura 18 - Variáveis utilizadas para o cálculo das frequências de falha

Fonte: Nichterwitz (2013)

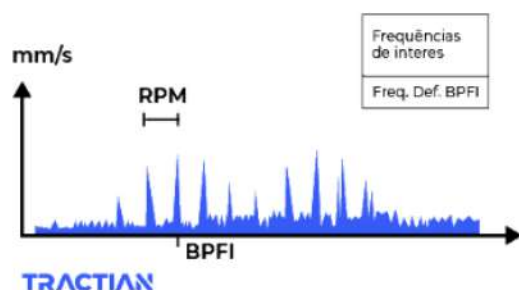
As fórmulas indicadas na Tabela 1 são as equações características de falhas dos rolamentos, de forma que: S , é a diferença entre a frequência da pista externa (S_e) e a pista interna (S_i); n , velocidade de rotação; d , diâmetro da esfera; D , diâmetro

primitivo, medido entre os centros das esferas opostas entre si; ϕ , ângulo de contato, que são ilustrados na Figura 18.

FTF (*Fundamental Train Frequency*) representa a frequência com a qual a gaiola completa uma rotação em relação ao anel externo. BPFO (*Ball Pass Frequency Outer Race*) corresponde à frequência com que uma esfera passa por um ponto fixo na pista externa. BPFI (*Ball Pass Frequency Inner Race*) refere-se à frequência com que uma esfera passa por um ponto fixo na pista interna. E BSF (*Ball Spin Frequency*) indica a frequência com que uma esfera completa uma rotação em torno de seu próprio eixo.

A frequência de falha é interpretada com o espectro de vibração, sendo marcada por um pico na assinatura em cada harmônico da frequência de falha do rolamento. Esses picos de assinatura registrados são decorrentes da ressonância que a falha gera no equipamento, conforme demonstrado na .

ROLAMENTO: DEFEITOS NO ARO INTERIOR



ROLAMENTO: DEFEITOS NO ARO EXTERIOR

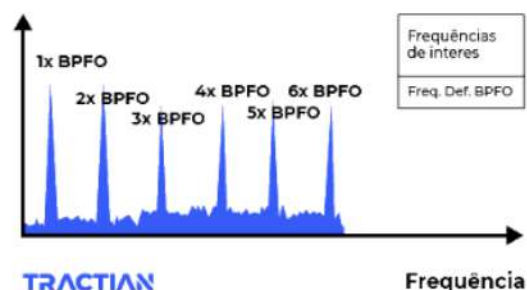


Figura 19 - Espectro de defeito de rolamento
Fonte: editado Tractian (2025)

Como observado na Figura 19, tem-se dois tipos de falhas de rolamento e ambos com o efeito da ressonância na frequência de falha e com os picos de velocidade nessas frequências.

3.2.7 Normas de Vibração

Nesta seção, será discutido as 4 principais normas da atualidade para avaliação de vibrações em equipamentos rotativos

Cada uma dessas normas possui especificidades que cumprem diferentes requisitos, como operacionalidade, regionalidade e tipo de indústria. As normas são: ISO 2372, ANSI S2.41, VDI 2056 e ISO 20816-1.

Apesar de possuírem suas particularidades, todas as normas citadas contemplam o aumento da confiabilidade, aumento vida útil do equipamento e redução de *downtime*.

A ISO 2372 estabelece critérios para a avaliação de vibrações em máquinas com potência superior a 15 kW. Ela é usada para monitorar a condição de máquinas industriais e identificar possíveis problemas de vibração que possam afetar o desempenho e a vida útil do equipamento (ISO, 1974).

A ANSI S2.41 fornece diretrizes para a medição e avaliação de vibrações em máquinas e equipamentos. Ela é amplamente utilizada nos Estados Unidos e cobre uma variedade de tipos de máquinas, ajudando a garantir que elas operem dentro de limites seguros de vibração. (ANSI, 1984).

A VDI 2056 é uma norma alemã que fornece diretrizes para a avaliação de vibrações em máquinas. Ela é usada para monitorar a condição de máquinas e equipamentos, ajudando a identificar problemas de vibração e a tomar medidas corretivas antes que ocorram falhas. (VDI, 1964).

2.4.7.1 ISO 20816-1

A ISO 20816-1 (2016) é uma atualização do padrão internacional de medição de vibrações em equipamentos rotativos. É um compilado das normas ISO 10816 e ISO 7919, já que ditam os métodos de acompanhamento e avaliação de “saúde” das máquinas, consequentemente, garantindo segurança e confiabilidade operacional. E que será futuramente substituída pela ISO/CD 20816-1, adicionando vibrações torcionais ao quórum de vibrações abordados.

A ISO 10816 fornece diretrizes para a medição e avaliação de vibrações em partes estáticas de máquinas rotativas (ISO, 1995), enquanto a ISO 7919 é focada nos elementos rotativos dos equipamentos (ISO, 1996). Portanto, unindo dois padrões que tem a mesma finalidade.

A ISO 20816-1, assim como seus antecessores, define os métodos de medição de vibração. De forma geral é medido nos componentes não-rotativos,

geralmente pré-estabelecidos pelo fabricante. A medição deve utilizar frequências de banda larga, para que todo o espectro seja coberto (ISO, 2016).

Este padrão internacional também é responsável por definir os alarmes e os *Trips* dos equipamentos rotativos. Os alarmes são valores baseados no RMS, que divide por Classe e Zona a faixa de vibração do equipamento e serão demonstrados na Tabela 2 e Figura 20.

Tabela 2 - Zonas de Vibração

Fonte: Adaptado ISO (2016)

Zona	Abrangencia
Zona A	Máquinas novas, operação normal.
Zona B	Máquinas com um certo nível de uso, porém aptas a operarem sem restrições.
Zona C	Alerta. As máquinas nesta zona de vibração, podem operar sem restrições, mas devem possuir uma rotina de inspeções mais rígidas. É sugerida a manutenção assim que houver a oportunidade.
Zona D	Alerta crítico. Vibrações nesta magnitude podem causar danos aos elementos da máquina. Manutenção necessária.

Avaliação da severidade das vibrações com base na velocidade eficaz de acordo com a ISO 20816-3 - RPM entre 120 e 15000 - (mm/seg RMS)					
		Grupo 2 : Máquinas com potência 15 - 300 kW Máquinas eléctricas $160 \leq H < 315$		Grupo 1: Máquinas com potência 300 kW - 40 MW Máquinas eléctricas $H \geq 315$	
		Base Rígida	Base Flexível	Base Rígida	Base Flexível
1,4	A	A	A	A	A
2,3	B				
2,8	C				
3,5	C	C	C	C	B
4,5	D				B
7,1	D	D	D	D	C
11	D				D

Figura 20 - Avaliação da severidade das vibrações por zonas e velocidade
FONTE: dmc (Acesso em 2025)

As zonas, demonstradas na Tabela 2 e Figura 20, são divididas em 4, de A a D. E definem os alarmes e os *Trips* dos equipamentos. Os alarmes definem a quão frequente deve ser o acompanhamento da evolução dessa vibração para que um *Trip*, ou pior, uma falha ocorra. O *Trip*, definido pela 20816, é um nível crítico de vibração que é computado no sistema operacional da máquina para parar seu funcionamento, caso o valor desse nível crítico seja atingido.

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta sessão do projeto serão apresentados os sensores utilizados, os instrumentos de coleta e a metodologia, baseada em procedimento de serviço. Em seguida serão mostrados os parâmetros de funcionamento da bomba e seus rolamentos. Por fim, será analisado todos os espectros de vibração, do estado de “alarme”, pelo “Alarme Crítico”, e o espectro pós manutenção.

3.3 METODOLOGIA

3.2.1 Métodos

A coleta dos dados é realizada segundo procedimento desenvolvido pela engenharia da empresa que opera o ativo, detalhando o material necessário, as qualificações e a necessidade de um acompanhamento do responsável pelo sistema a ser aquisitado ou não.

O técnico qualificado conecta o cabo do analisador aos sensores acoplados nas máquinas. Para leitura da vibração, é utilizado o analisador “SKF Microlog GX”, Figura 21.



Figura 21 - Analisador SKF Microlog GX
Fonte: SKF (2015)

O SKF Microlog GX, presente na Figura 21, é um analisador portátil de vibração e coletor de dados utilizado para o monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas em ambientes industriais. Na Figura 22 vê-se o posicionamento dos sensores a serem checados.

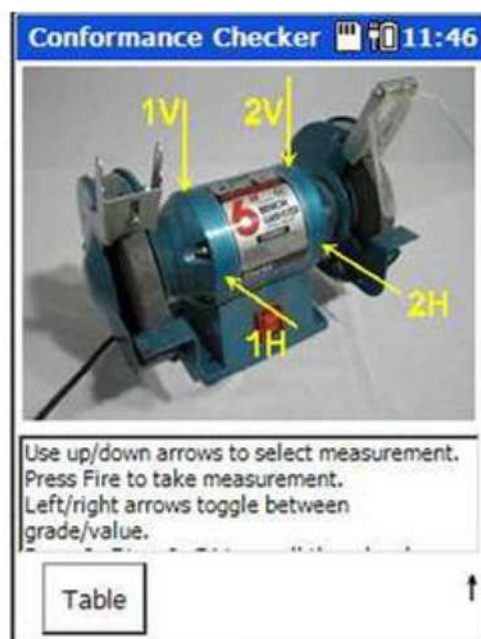


Figura 22 - Checagem de posicionamento de sensores
Fonte: SKF (2015)

A Figura 22 é uma extração do analisador. A função mostrada auxilia o operador com a conexão dos cabos nos sensores e as posições corretas de cada um deles durante a operação e coleta de dados. Os cabos são conectados em pares, conforme Figura 23 e Figura 24.

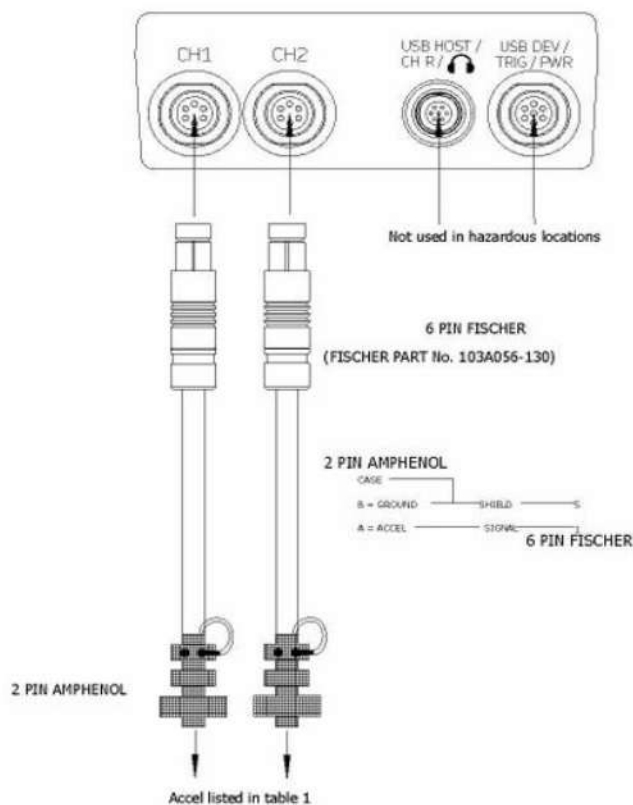


Figura 23 - Diagrama de conexão dos cabos com analisador
Fonte: SKF (2015)



Figura 24 - Conexão dos cabos com os sensores
Fonte: SKF (2015)

As figuras acima representam a conexão entre o analisador e os sensores que traduzem as vibrações emitidas pelo motor, no caso da Figura 24. Caso a máquina

não tenha um sistema de contagem de rotação, faz-se necessário o uso de um tacômetro para realizar essa medição e inputá-la para que a curva seja calculada.

Este dispositivo coleta dados de vibração através de sensores conectados às máquinas e realiza análises FFT (*Fast Fourier Transform*) em tempo real, convertendo os dados de vibração em espectros de frequência. Essa conversão permite a identificação de problemas como desbalanceamento ou falhas em rolamentos. Além disso, o SKF Microlog GX permite a configuração de rotas de coleta para o monitoramento sistemático de equipamentos, oferecendo também funcionalidades de balanceamento e alinhamento de máquinas (*spindle test*) conforme Figura 25.

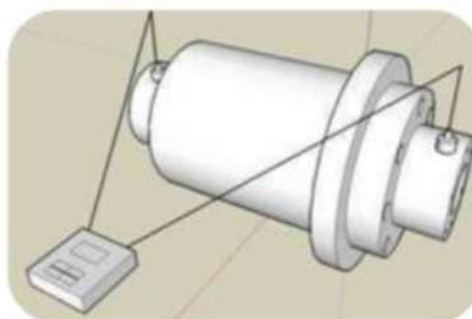


Figura 25 - Teste de desbalanceamento - Spindle Test

A Figura 25 é o diagrama que posicionamento dos sensores para teste de balanceamento de um eixo. Essa configuração de cabos, juntamente com o RPM do eixo e a seleção do programa adequado no analisador SKF Microlog GX, fornecem esses dados.

Os dados adquiridos do equipamento, alimenta uma lista de dados preparada para o relatório de visita, contendo a análise de todos os equipamentos medidos, discriminando por criticidade e severidade do alarme. Sistemas SCE em alarme tem seus dados discriminados em subseções que detalham a observação do técnico, será mais detalhado da seção seguinte deste estudo.

3.2.2 Anatomia do Relatório de Serviço

O relatório de vibração é um documento de serviço das ordens de trabalho que foram realizadas a bordo. Nele contém todos os equipamentos medidos, e os status de severidade da medição. Quanto mais severa é a medição, mais

detalhamento tem-se no relatório. Seguindo essa lógica, tem-se o “Controle de Programação”, Figura 26, a “Condição dos Equipamentos”, Figura 27, a “Classificação dos Equipamentos por Criticidade”, Figura 28, “Diagnósticos”, Figura 29, “Ordens de Trabalho”, Figura 30, e “Análise Detalhada – Laudo”, Figura 31 e Figura 32.

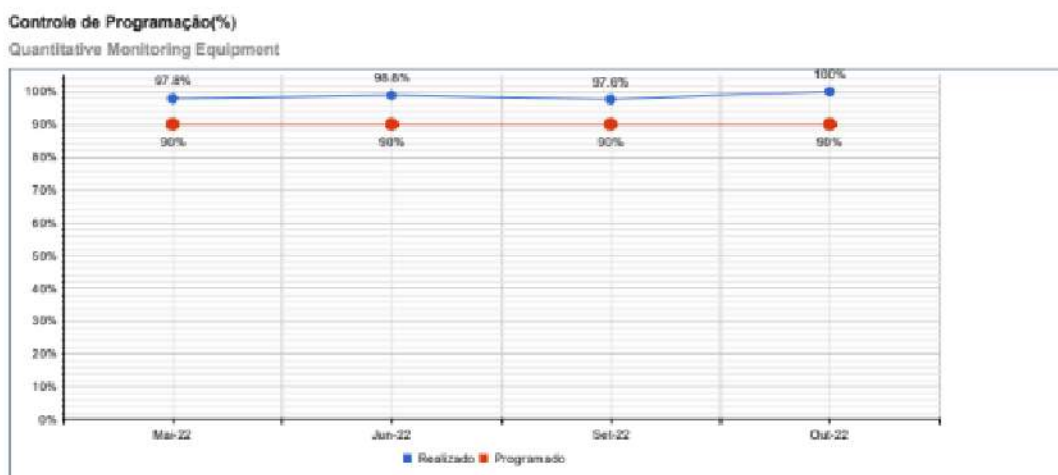


Figura 26 - Controle de Programação

A Figura 26 representa o controle da programação das atividades do mês de outubro de 2022. As atividades são planejadas conforme plano de manutenção e as atividades extras são realizadas a partir da indicação do engenheiro de manutenção responsável para controle da saúde do equipamento.

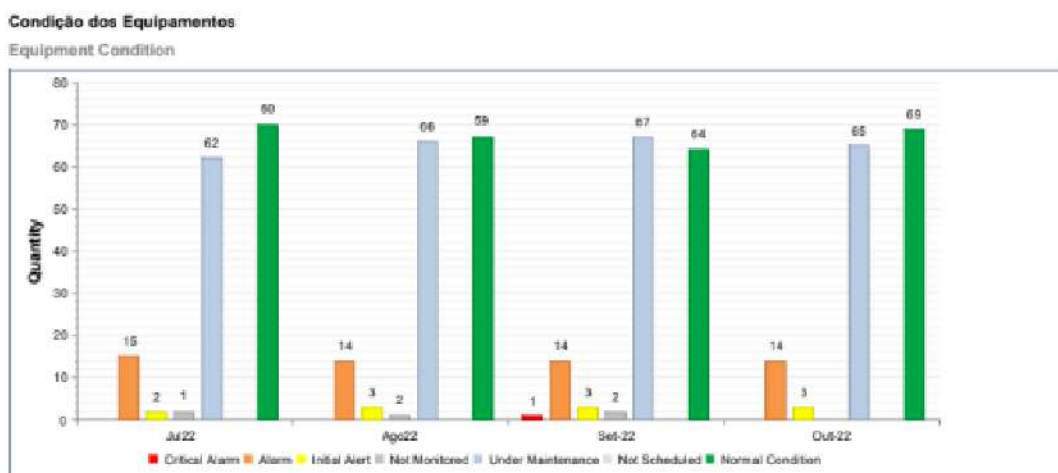


Figura 27 - Condição dos Equipamentos

A Figura 27 representa a quantidade de equipamentos para cada condição pré-estabelecida. Equipamentos que estão em “Alarme”, cor laranja no gráfico, e “Alerta Inicial”, cor amarela no gráfico, são acompanhados com maior detalhamento. E equipamentos em “Alarme Crítico” apresentam um risco eminente de falha e necessitam interferência.

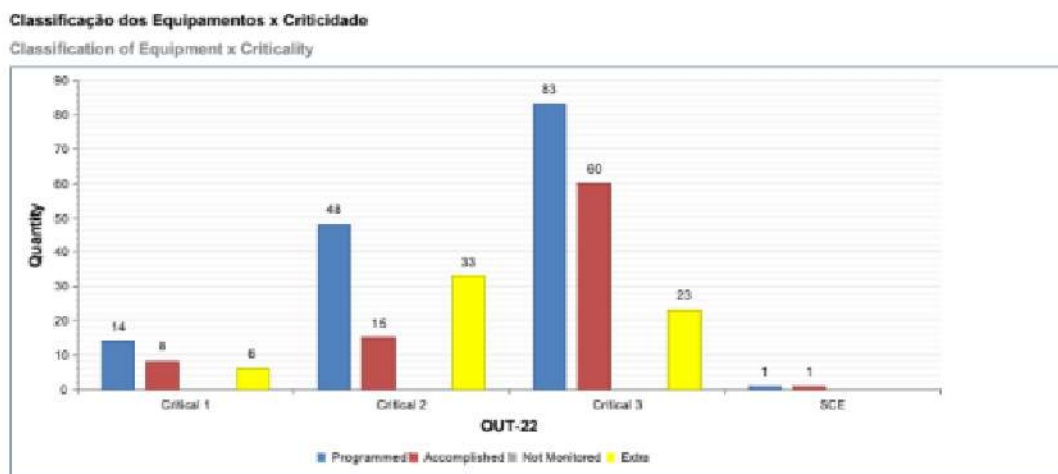


Figura 28 - Classificação dos equipamentos por criticidade

A Figura 28, relaciona a quantidade de equipamentos monitorados com a Criticidade deles, feita pela análise de *Bowtie* e pelo SGSO.

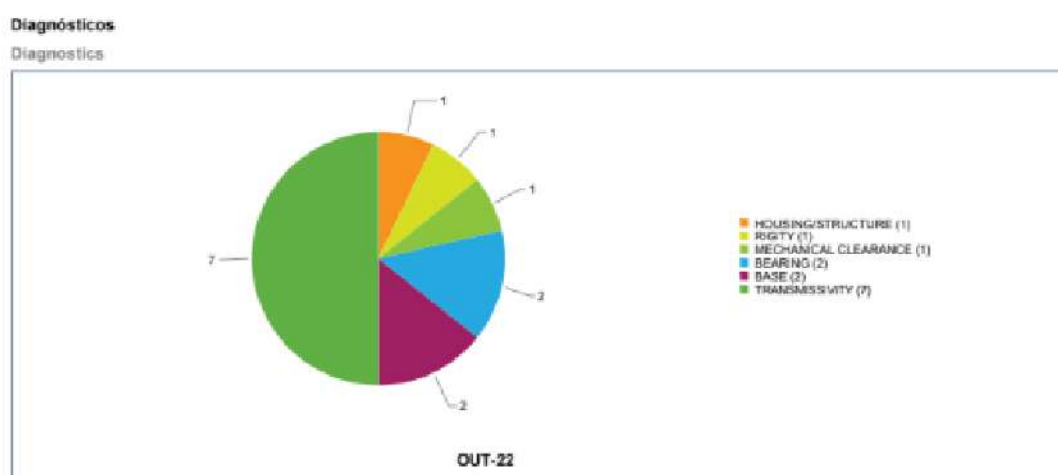


Figura 29 - Diagnósticos

A Figura 29, apresenta o gráfico com os diagnósticos do mês de outubro e traz uma visão estatística dos diagnósticos que exigem atenção e o tipo deles.

Status	Parent	Asset	Description	Criticality	Opened Date	Diagnostic	Note
	INSTR.AIR.COMP	MFLU-M9- PBE-3710B	INSTR.AIR COMPRESSOR MOTOR B	2	Oct 4, 2020	BEARING	10219641
	MDO PUMP #2	MFLU-ER- EMP-4636B	MDO Supply Pump No.2 Motor	2	Oct 4, 2020	BASE	10571651
	MDO PUMP #2	MFLU-ER- PBB-4636B	MDO Supply Pump No.2	2	Dec 15, 2020	MECHANICAL CLEARANCE	10642129
	LUB OIL 1 GTG_C1	MFLU-M6- PBE-6035C-1	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10219626
	LUB OIL 1 GTG_D1	MFLU-M6- PBE-6035D-1	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10235482
	LUB OIL 2 GTG_C2	MFLU-M6- PBE-6035C-2	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10219627

Figura 30 – Ordens de Trabalho

A Figura 30 é um recorte da lista das ordens de trabalho que apresentaram alarmes no mês de outubro e precisam de acompanhamento. Nesta tabela, tem-se indicado o nome do equipamento abreviado, a tag do ativo no sistema (código de indicação do ativo), a descrição do equipamento, a criticidade do alarme, a data de identificação do alarme, o diagnóstico do alarme, e a nota que identifica o alarme. Note que os alarmes, presentes neste corte, surgiram em 2020, e por não apresentarem risco à integridade da operação, cabe somente o acompanhamento pelo engenheiro responsável.

TAG: MFLU-M9-EMC-3710B

Description: INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR B

Criticality: 2

Area: Hierarquia/TOP-SIDE/Modulo M9/INSTR.AIR.COMPR.B

Status: **ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 04/10/2022	Analysis Date: 11/10/2022	Responsibility: GIL SIMAR SILVA
CMMS Note: 10219641	Note Date: 04/10/2020	Re Work?: No

Diagnostic: **BEARING**

Equipamento apresenta defeito nos rolamentos DE Equipment is defective in DE and NDE bearings

Service:

Recomendamos a instalação de um novo pino graxeiro no ponto DE e a lubrificação do mancal. We recommend installing a new grease fitting at the DE e NDE point and lubricating the bearings.

History:

A104/10/2022

A101/09/2022

A101/08/2022

A109/07/2022

A108/06/2022

A105/04/2022

Figura 31 - Laudo Técnico
Fonte: Anexo A (2025)

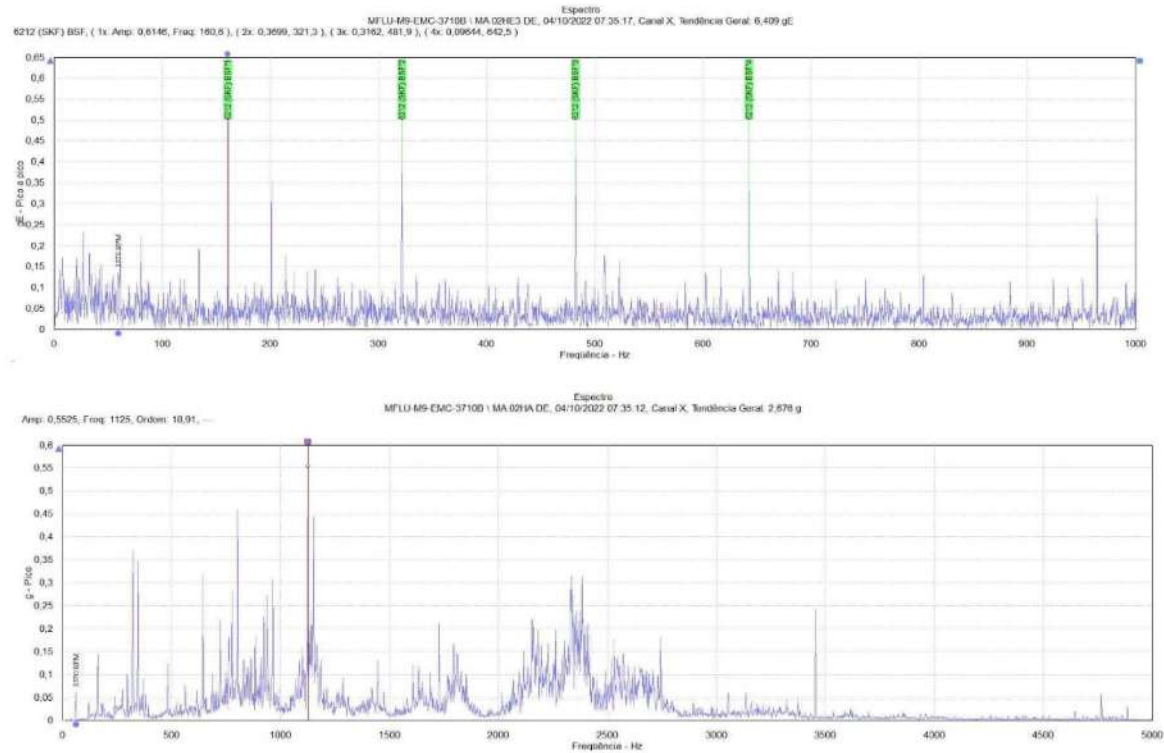


Figura 32 - Espectros de Vibração
Fonte: Anexo A (2025)

O técnico faz o laudo, Figura 31, a partir dos espectros, Figura 32. Observa-se dois espectros de vibração, o primeiro para frequências de 0 a 1000 e o segundo para frequências de 0 a 5000.

O laudo da Figura 31 é referente ao motor do compressor de ar de instrumento B. Pela análise do espectro de vibração de alta frequência, é observado picos nos pontos harmônicos de frequência dos rolamentos, indicando que o elemento está em alarme.

Com a anatomia do relatório discriminada, é possível realizar uma interpretação crítica do relatório de serviço e agir com rapidez e eficácia.

3.2.3 Equipamento e Seus Elementos

Como já previamente indicado, o presente estudo avalia uma análise de vibração de uma manutenção preditiva numa bomba centrífuga. A bomba centrífuga em questão é do tipo OHH (Figura 2), e os rolamentos são SKF 6412 e SKF 7311 BECBP, que são rolamentos de esfera, comumente utilizados em bombas centrífugas pela alta velocidade de rotação e pela baixa carga radial requisitada. Em particular, esses são os rolamentos utilizados pelo fabricante na construção do equipamento.

Pelo site do fabricante, consegue-se adquirir os valores de frequência de falha dos rolamentos, dada a rotação em RPM, Figura 33 e Figura 34.

Propriedades do rolamento 6412										
SKF		Dimensões principais			Capacidades de carga básica			Classificação de velocidade		
Designação		Furo	Diâmetro externo	Largura	Dinâmico	Estática	Carga limite de fadiga	Referência	Limitante	Catalogue
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	P _H (kN)	n _{ref} (1/min)	n _{lim} (1/min)	
6412	Rolamento rígido de esferas	60	150	35	108	69.5	2.9	10000	6300	Open in catalogue

Frequências							
SKF		Frequência rotacional				Frequência de sobrerolagem	
Designação	Anel interno	Anel externo	Conjunto de elementos rolantes e gaiola	Elemento rolante em seu eixo	Ponto no anel interno	Ponto no anel externo	Elemento rolante
	f _i (Hz)	f _e (Hz)	f _G (Hz)	f _r (Hz)	f _{ip} (Hz)	f _{ep} (Hz)	f _{rp} (Hz)
6412	29.75	0	10.827	50.611	132.462	75.788	101.221

Figura 33 - Calculadora de Frequência de Falha - SKF 6412
Fonte: SKF (2024)

A Figura 33, mostra a calculadora de frequências de falha de um rolamento 6412 a uma rotação de 1800 RPM. Rolamento esse localizado no Lado Acoplado (DE - *Drive End*).

Propriedades do rolamento 7311 BECBP

Designação	Tipo de rolamento	Dimensões principais			Capacidades de carga básica			Classificação de velocidade		
		Furo	Diâmetro externo	Largura	Dinâmica	Estática	Carga limite de fadiga	Referência	Limitante	Catalogue
		d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	P ₀ (kN)	n _{ref} (1/min)	n _{lim} (1/min)	
■ 7311 BECBP	Rolamento de contato angular de esferas	55	120	29	85	60	2.55	7000	7000	Open in catalogue

Frequências

Designação	Frequência rotacional				Frequência de sobrerolagem		
	Anel interno	Anel externo	Conjunto de elementos rolantes e gaiola	Elemento rolante em seu eixo	Ponto no anel interno	Ponto no anel externo	Elemento rolante
	f _i (1/s)	f _a (1/s)	f _s (1/s)	f _r (1/s)	f _{ip} (1/s)	f _{ep} (1/s)	f _{rp} (1/s)
■ 7311 BECBP	30	0	12.189	59.16	195.923	134.077	118.319

Figura 34 - Calculadora de Frequência de Falha - SKF 7311 BECBP
Fonte: SKF (2024)

A Figura 34, mostra mesma calculadora, fornecida pela SKF, porém com os as frequências de falha para o rolamento 7311 BECBP. Rolamento localizado no Lado Oposto ao Acoplado (NDE - *No Drive End*).

3.3 RESULTADOS

Nesta sessão do estudo, serão analisados os espectros de vibração da *Sea Water Service Pump B*, as ações para a solução do problema identificado, realização da interferência e imagens dos rolamentos, confirmando os dados interpretados pelo espectro de vibração.

3.2.1 Identificação do Alarme

No relatório de novembro de 2022 (Anexo A), foram observados picos de aceleração na faixa de baixa frequência, conforme mostrado na Figura 35 da *Sea Water Service Pump Bravo*. Além disso, picos de aceleração na faixa de alta frequência foram observados, conforme a Figura 36.

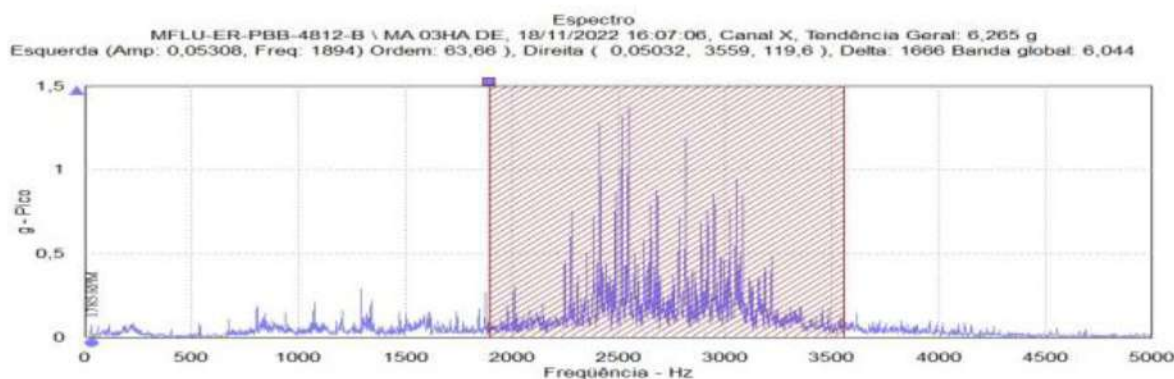


Figura 35 - Espectro de baixa frequência - nov./22

Pode ser observado, na Figura 35, um conjunto de picos de aceleração nas frequências entre 2000Hz e 3500Hz que indicam falha na pista interna do rolamento SKF 6412. Esses picos de representam uma leitura característica de falha por lubrificação, resultado do atrito entre as peças.

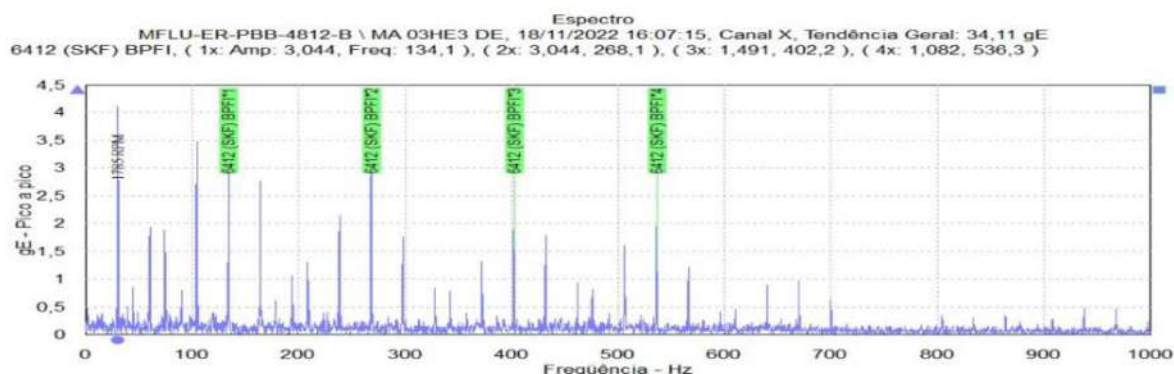


Figura 36 - Espectro baixa frequência - nov./22
Fonte: Anexo A (2025)

Com a falha por lubrificação identificada, é importante buscar possíveis falhas que uma lubrificação falha pode causar. Dessa maneira, ao interpretar o espectro de baixa frequência, Figura 36, é observados picos de aceleração nos harmônicos correspondentes a frequência de falha de pista interna do rolamento SKF 6412, conforme mostrado na Figura 33.

Como pode ser observado na Figura 33 e Figura 34, a frequência de falha de pista interna do rolamento 6412, é muito próxima com a frequência de falha de pista externa do rolamento 7311 BECBP. Essa sobreposição de frequência de falha

interfere na interpretação do espectro, mostrando a importância na atenção aos detalhes.

Apesar de não estar documentado nos primeiros relatórios, o rolamento de NDE, SKF 7311 BECBP, também foi identificado como um elemento em estado crítico. Após a identificação da ausência desse dado, somente em maio de 2023, que esse dado oficial foi adicionado no relatório, porém as ações iniciais já haviam sido tomadas em novembro do ano anterior, que será discutido mais à frente do estudo.

No relatório de maio de 2023 (Anexo B), conforme acima expressado, houve a adição do espectro do rolamento de NDE, Figura 37.

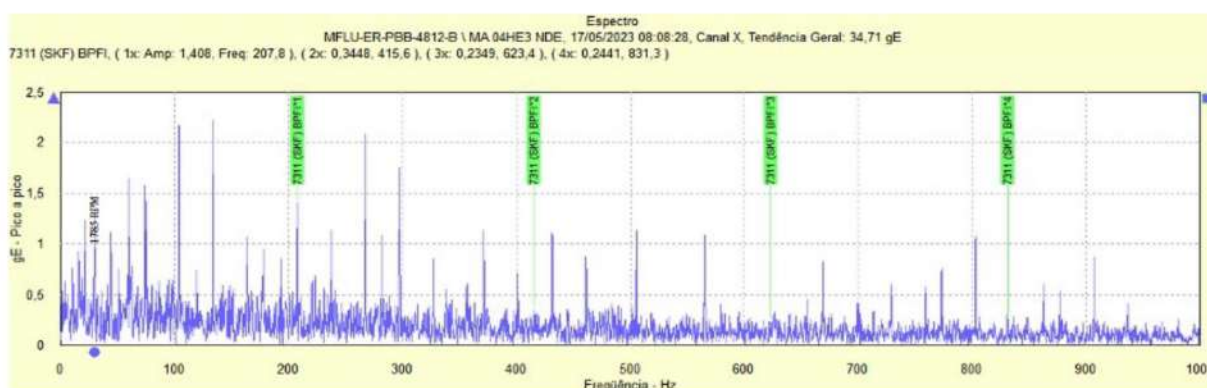


Figura 37 - Espectro de baixa Frequência - SKF 7311BECBP
Fonte: Anexo 2 (2025)

Apesar da Figura 37 possuir o espectro com sinalizações de falha de pista interna do rolamento SKF 7311 BECBP, pode-se observar que, nos pontos de harmônico da frequência de falha de pista externa desse rolamento, nos múltiplos de 134 Hz, existem picos de aceleração, caracterizando a falha de Pista Externa (BPFE) do rolamento NDE.

3.2.2 Planejamento da Intervenção

A partir da identificação do alarme de falha é necessário um planejamento da atividade para que o embarque do técnico seja realizado pouco depois da chegada do material para a realização do serviço.

Em primeiro lugar a compra dos elementos que apresentam falha e os elementos para a remontagem da bomba, como gaxetas e juntas de vedação.

A fim de manter a qualidade e confiabilidade do equipamento, as peças compradas para substituição são da mesma marca da usada pelo fabricante. Os rolamentos são importados da SKF, o que está sujeito a imprevistos operacionais e logísticos, tais como problemas do fabricante com seu fornecedor até greves e paralizações de órgãos estatais. O tempo total de chegada do material, do vendedor, SKF, até a plataforma, foram 11 meses, contando com o processo de aprovação pelo time de *supply chain* e gerência, logística, e problemas inesperados como 2 meses de greve na receita, bloqueando a entrada de itens importados .

Como gatilho à chegada do material, foi programada, pelo time de mecânica a bordo, a ordem de trabalho para realização da atividade.

A abertura da bomba foi realizada, seus componentes internos foram limpos, inspecionados visualmente, lubrificados e reinstalados com os novos rolamentos em posição. Documento de finalização do serviço no anexo C.

3.2.3 Inspeção Visual da Falha

Após a substituição dos rolamentos avariados, é possível realizar uma inspeção visual deles, confirmando o laudo das análises de vibração.



Figura 38 - Rolamento SKF 6412: Inspeção Visual 1
Fonte: Autor (2025)

No rolamento SKF 6412, localizado no lado acoplado, foi laudado como falha na pista interna, confirmada pelas Figura 38 e Figura 39.



Figura 39 - Rolamento SKF 6412: Inspeção Visual 2

Analisando as imagens do rolamento, nas Figura 38 e Figura 39, pode ser observado riscos superficiais, desgaste e queimaduras, gerados por lubrificação inadequada, e pontos de corrosão, por exposição a um ambiente corrosivo, para comparação Figura 40. Note que os sintomas estão localizados na pista interna do rolamento, o que condicionou os picos de aceleração observados no espectro de vibração de alta frequência.

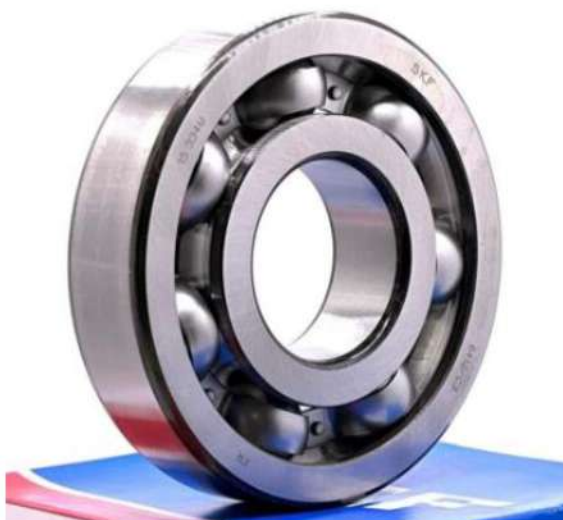


Figura 40 - SKF 6412 Novo
Fonte: E-bay

A Figura 40, representa um rolamento novo, que ,em contraste com o defeituoso, salta aos olhos as falhas previstas pela análise de vibração. Superfície polida e uniforme ao longo das faces, sem manchas.

Essa análise também foi feita para os rolamentos de NDE, de acordo com as Figura 41 e Figura 42.

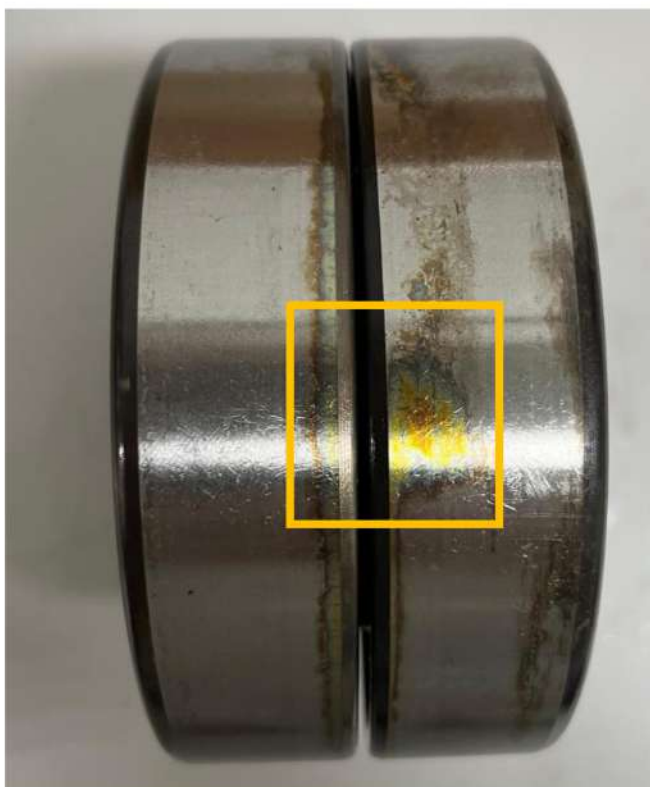


Figura 41 - Rolamento SKF 7311 BECBP: Inspeção Visual

Observando a Figura 41, salta aos olhos a descoloração na pista externa dos rolamentos caracterizado pelo superaquecimento gerado pela lubrificação inadequada.



Figura 42 - Rolamento SKF 7311 BECBP: Detalhe da inspeção visual

A Figura 42 é uma aproximação da inspeção visual para observação dos detalhes da falha.

A partir da inspeção visual, a falha nos rolamentos é comprovada, mostrando a eficiência de um bom plano de manutenção, acompanhamento e execução de uma manutenção preditiva. Os detalhes observados nos rolamentos apresentam características de superaquecimento, comumente relacionados ao contato inadequado com outra superfície, aumentando o atrito, por consequência, afetando o funcionamento do elemento.

3.3 DISCUSSÕES

O estudo demonstra a eficácia da manutenção preditiva utilizando a análise de vibração como método de verificação de saúde do equipamento. Com essa análise, passando por todos os detalhes técnicos da Manutenção Industrial, da Vibração Mecânica e dos equipamentos utilizados nos processos de aquisição de dados, leitura de sensores, análise de espectros de vibração e execução da manutenção corretiva.

O diferencial do projeto é a apresentação desse estudo na visão da operação de um FPSO, ou seja, o foco é Segurança, tanto operacional quanto das pessoas envolvidas, custo e tempo, respectivamente, como foco dessa ação.

No rolamento SKF 6412, apresentado pela Figura 38 e Figura 39, apresentou marcas de falta de lubrificação, conforme foi acusado pela análise de vibração. Consolidando a necessidade da troca.

Nos rolamentos SKF 7311 BECBP, Figura 41, foi identificada a presença de defeito que levaria a falha na pista externa pelas marcas características de aumento de temperatura e escamação, provenientes do aumento de atrito, proveniente da falha na lubrificação. Mais uma vez, confirmando a análise do espectro de vibração.

Devido ao fato da plataforma estar em fase de descomissionamento, não foram feitos estudos para identificar o que realmente ocasionou os defeitos do rolamento. Porém, o plano de ação tomado para mitigar o problema de lubrificação foi observar os bocais de lubrificação de outros equipamentos para realização de preservação e possíveis intervenções ao encontrar não conformidades.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo a aplicação prática da manutenção preditiva em um estudo de caso de uma bomba centrífuga em um FPSO. Por meio da análise de vibração, foi possível identificar alarmes nos rolamentos da bomba, indicando a necessidade de intervenção. A identificação precoce dos defeitos, fundamental para o sucesso da manutenção preditiva, possibilitou o planejamento eficaz das ações corretivas, minimizando o impacto nas operações do FPSO.

Um desafio encontrado durante o projeto foi o longo prazo de entrega dos rolamentos para a manutenção da bomba. Por se tratar de um equipamento antigo, datado de 2003, a importação dos componentes foi necessária, impactando diretamente o tempo de resposta à falha identificada. O processo de compra, logística internacional e os trâmites alfandegários resultaram em um tempo total de espera de aproximadamente 11 meses para a chegada do material.

Apesar do extenso tempo de espera, o monitoramento constante do funcionamento da bomba, realizado através da análise de vibração, possibilitou a intervenção planejada antes da ocorrência da falha, garantindo a continuidade operacional. A manutenção preditiva, nesse contexto, mostrou-se crucial para o aumento do MTBF (Tempo Médio Entre Falhas), mantendo a confiabilidade e segurança do sistema. Além disso, a ação planejada permitiu um MTTR (Tempo Médio de Reparo) otimizado, minimizando o tempo de inatividade da bomba e maximizando sua disponibilidade.

A eficácia da manutenção preditiva foi comprovada pela redução de falhas inesperadas e pela continuidade das operações. Além disso, a manutenção preditiva contribuiu para a economia significativa nos custos de manutenção, uma vez que a substituição dos rolamentos antes da falha total evitou danos maiores e, conseqüentemente, custos mais elevados de reparo.

O estudo também evidenciou como o desenvolvimento de tecnologias e a implementação de conceitos da Indústria 4.0 podem contribuir para a otimização da manutenção preditiva. A utilização de sensores sem fio e sistemas de análise em tempo real, por exemplo, permitiria um acompanhamento mais preciso e ágil das

condições dos equipamentos, reduzindo ainda mais o tempo de resposta a possíveis falhas e otimizando o tempo de equipe técnica alocada para este fim.

Para estudos futuros, recomenda-se investigar o potencial das tecnologias emergentes na manutenção preditiva de equipamentos críticos em plataformas FPSO. A pesquisa pode concentrar-se na adoção de sensores sem fio e sistemas de análise em tempo real, que possibilitem um monitoramento contínuo e mais preciso das condições operacionais dos equipamentos. Essa abordagem pode não apenas aumentar a confiabilidade e eficiência dos sistemas, mas também reduzir a necessidade de intervenção humana para a coleta de dados, permitindo análises mais rápidas e precisas por meio de monitoramento remoto.

Além disso, a análise de *big data* e o uso de inteligência artificial para prever falhas com maior antecedência podem ser áreas promissoras. Outro aspecto a ser considerado é a otimização da cadeia de suprimentos para reduzir os tempos de espera na importação de peças, o que pode incluir a análise de estratégias de estoque compartilhado entre unidades operacionais. Por fim, estudos sobre a eficácia de auditorias nos planos de lubrificação podem fornecer *insights* valiosos para a melhoria contínua dos processos de manutenção e, conseqüentemente, para a redução de falhas futuras.

REFERÊNCIAS

ABECOM. **Termografia em rolamentos para que serve? Quais as vantagens?**, 2021. Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/termografia-em-rolamentos/>> Acesso:11 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional**. Disponível em: <<https://www.anp.gov.br/sistema-de-gerenciamento-de-seguranca-operacional>>. Acesso em: 3 ago. 2024.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI S2.41**: Vibration measurement and evaluation of machine vibration. New York: ANSI, 1984.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STD 610**: Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. 12th ed. Washington, D.C.: API, 2021.

Antoniol, E., **Análise de Vibração**. Curso Tecnologia em Manutenção Preditiva - Infrared Services. Rio de Janeiro, 2008.

Arruda, F. A. Da S.. Arruda Consult. **Análise de risco**: Técnica Bow tie. Disponível em: <<http://www.arrudaconsult.com.br/2020/03/analise-de-risco-tecnica-bow-tie.html>> 2020. Acesso:11 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 15243:2017 – Rolamentos – Danos e falhas – Termos, características e causas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: Gestão de riscos - diretrizes. Rio de Janeiro, 2018.

CORDEIRO, Erick. TRACTIAN. **BPFO: Como usar a análise de vibração em rolamentos para evitar falhas**, 2024. Disponível em: <<https://traction.com/blog/como-usar-analise-de-vibracao-rolamentos-evitar-falhas>> Acesso: 11 dez. 2023

E&P-UO-RIO, **Manutenção Preditiva Por Análise de Vibrações**. Gerência de Engenharia de Manutenção e Inspeção – Petrobras. Rio de Janeiro, 2012.

FM2S. **MTTR, MTBF e MTTF**: O que são esses indicadores?, 2019. Disponível em: <<https://www.fm2s.com.br/blog/mtbf-mttr-mttf>> Acesso: 13 mai. 2024

GUPTA, N. **Oil market and its impact on global economy**. International journal of applied research, 2020.

Heitor. Fiscomp. **FFT**, 2020. < <https://fiscomp.if.ufrgs.br/index.php/FFT>> Acesso: 09/08/2024.

<https://eltgeral.com.br/valor-eficaz-rms-significado-e-formas-de-calcular/> Acesso em: 13/05/2025

IFC Markets. **Valor e Cotação do BRENT**. Disponível em: <<https://www.ifcmarkets.com.br/market-data/commodities-prices/brent>> Acesso: 09 abr. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816**: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Geneva: ISO, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13709**: Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries. 2nd ed. Geneva: ISO, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 20816-1**: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Geneva: ISO, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2372**: Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for specifying evaluation standards. Geneva: ISO, 1974.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31000:2018**: Risk management - Guidelines. 2nd ed. Geneva: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7919**: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Geneva: ISO, 1996.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. São Paulo: Qualitymark, 2009.

KELLY, S.G., **Fundamentals of Mechanical Vibrations**. 2. ed. Singapura: McGraw-Hill Book Co, 2000.

Lean Manufacturing Online. **Mean Time Between Failures (MTBF)**, 2022. Disponível em: <<https://leanmanufacturing.online/mean-time-failures-mtbf/>> Acesso: 10 jan. 2025

MATHER, A. **FPSO Handbook**. 1. ed. Edinburgo: Witherby Seamanship International Ltd, 2009.

MENNA, A. R., **Deteção de Falhas em Mancais de Rolamento por Análise de Vibrações em Banda Larga Um Caso Prático de Aplicação em uma População de Equipamentos Rotativos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Nichterwitz, M. P.. **Estudo comparativo entre os métodos do valor de pico (Peakvue) e da demodulação de sinais de vibração (envelope) na previsão de falhas de rolamentos**. 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

NOWLAN, H.F.; HEAP, F.S., **Reliability Centered Maintenance**. 1 ed. California: U.S. Department of Commerce, 1978.

O'GORMAN, Liz. **Decomposing Fourier transforms — an introduction to time-frequency decomposition**. dibsmethodsmeetings, 2025. Disponível em: [<https://dibsmethodsmeetings.github.io/fourier-transforms/>]. Acesso em: 7/5/2025

Pré Sal Petróleo S/A. **FPSO Guanabara bate recorde de produção no pré-sal**. Disponível em: <<https://www.presalpetroleo.gov.br/noticias/fpso-guanabara-bate-recorde-de-producao-no-pre-sal/>>. Acesso: 09 abr. 2024.

RAO, Singiresu S., **Vibrações mecânicas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011

REHAB, A.; et al. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Ball Bearings Using Vibration Analysis. In: EUROPEAN CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY 2021, Turin.

SANTOS, Virgílio. FM2S Educação e Consultoria. **OEE**, 2017. Disponível em: <<https://www.fm2s.com.br/blog/oee>> Acesso: 13 mai. 2023

Shell Brasil Petróleo Ltda. **Programa de Descomissionamento das Instalações (PDI) Executivo – FPSO Fluminense**. Campos de Bijupirá e Salema (“BJSA”), Revisão 01. Rio de Janeiro: Shell Brasil Petróleo, 19 out. 2022. Número do Documento: BJSA-SHL-000-CR-PLN-0002. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/ppdi/pdi-executivo-bjsa-tarjado.pdf>>. Acesso em: 09/04/2024

SILVA, F.R., **Curso de Vibrações Mecânicas**. Rio de Janeiro: DEPMC-CEFET/RJ, 2016

SIQUEIRA, I. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**: Manual de Implementação. 1. ed. São Paulo: Qualitymark, 2005.

SKF. **SKF Microlog® GX Series - Data Collector/Analyzer Supports the GX Series Microlog System CMXA 75 Firmware Version 4.03**. Revisão D.SKF USA Inc. California, 2015.

SULZER. **Bombas modelo OHH de simples estágio com rotor em balanço**. Disponível em: <<https://www.sulzer.com/pt-br/brazil/shared/products/ohh-overhung-single-stage-pumps>> Acesso: 11 dez. 2023

VERBAND DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 2056**: Vibration of machines; machines of all kinds with rotating parts, recommendations for the measurement and evaluation of vibration severity. Düsseldorf: VDI, 1964.

VIBRAÇÃO. In: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7graus, 2023. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/vibracao/>> Acesso em: 02/12/2023.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. 1. ed. São Paulo: Editora DG, 1998.

ANEXO A - Relatório de Vibração SKF – Novembro de 2022

VIBRATION REPORT

Fluminense

Novembro - 2022

Report	MODEC - Novembro - 2022
Customer	Fluminense
Contact	Eduardo Antoniol: eduardo.antoniol@modec.com
Responsible	Franz Walterfang
Instrumentation	GX 75
Service Manager SKF	Sergio Junior (55 11) 99418-4353 sergio.junior@skf.com



TABLE OF CONTENTS

- 1. **Introdução** Introduction
- 2. **Resumo Executivo** Executive Summary
- 3. **Gráficos Gerenciais** Management Graphics
- 4. **Ordens de Trabalho Pendentes** Pending Work Orders
- 5. **Análise Detalhada dos Equipamentos Monitorados** Detailed Machine Analysis
- 6. **Relatório de Condição Detalhado** Detailed Condition Report
- 7. **Equipamentos Não Monitorados** Non-Monitored Equipment

1. Introdução

1. Introduction

1.1 Informações básicas sobre a técnica

1.1 Basic information about the technique

A manutenção Preditiva se utiliza de algumas técnicas, entre elas a análise de vibrações, termografia, ferrografia, análise de óleo, etc., para realizar uma avaliação segura das condições de funcionamento dos equipamentos, acompanhando a evolução de falhas detectadas nas máquinas. Com isso, é possível fornecer previsões de quebra dos equipamentos, garantindo a operação sem riscos de quebra inesperadas até a execução de uma parada planejada.

A análise de vibrações é a técnica utilizada na manutenção Preditiva para a avaliação de máquinas rotativas que apresenta um melhor custo/benefício, em relação as demais técnicas, fornecendo dados que possibilitam prolongar a vida dos equipamentos, baseando-se nas informações obtidas durante a operação normal do mesmo.

Resultados Previstos

A técnica de análise de vibração permite alcançar alguns dos seguintes benefícios, como:

A. Redução dos custos de manutenção - Com base na análise de vibrações e nas curvas de tendência, pode-se ter uma previsão de quando será necessária uma intervenção de manutenção, e quais os serviços a serem realizados, prolongando-se a vida útil de componentes, substituindo-as apenas o necessário.

B. Aumento da eficiência das intervenções da manutenção - através da indicação antecipada dos elementos com falha e da avaliação dos resultados das intervenções.

C. Aumento da disponibilidade dos equipamentos - A utilização de programas preditivos pode virtualmente eliminar paralisações imprevistas devido a falha de máquinas, bem como reduzir a necessidade de programação de paradas desnecessárias para serviços preventivos.

D. Aumento da confiabilidade operacional - A eliminação de paradas não programadas aumenta a confiabilidade.

Predictive maintenance uses some techniques, including vibration analysis, thermography, ferrography, oil analysis, etc., to carry out a safe evaluation of the equipment's operating conditions, following the evolution of failures detected in the machines. With this, it is possible to provide forecasts of equipment breakage, ensuring the operation without risks of unexpected breakages until the execution of a planned stop.

Vibration analysis is the technique used in Predictive maintenance for the evaluation of rotating machines that presents a better cost/benefit, compared to other techniques, providing data that enable the life of the equipment to be extended, based on the information obtained during the operation. normal of the same.

Expected Results

The vibration analysis technique allows you to achieve some of the following benefits, such as:

A. Reduction of maintenance costs - Based on the analysis of vibrations and trend curves, it is possible to have a forecast of when a maintenance intervention will be necessary, and which services will be performed, extending the service life of components, replacing them only as necessary.

B. Increased efficiency of maintenance interventions - through early indication of faulty elements and evaluation of intervention results.

C. Increased Equipment Availability - The use of predictive programs can virtually eliminate unplanned downtime due to machine failure, as well as reduce the need to schedule unnecessary downtime for preventative services.

D. Increased operational reliability - Eliminating unscheduled downtime increases reliability

1.2 Objetivo

1.2 Objective

O objetivo desse relatório é apresentar a condição dos ativos monitorados por vibração na unidade, indicando se o equipamento está em estado normal, alerta ou crítico. Caso apresente alterações na condição vibracional dos equipamentos, será evidenciado neste relatório o diagnóstico do componente em falha, indicando o diagnóstico e recomendação a serem feitas.

The objective of this report is to present the condition of the assets monitored by vibration in the unit, indicating that the equipment is in normal, warning or critical. If there are changes in the vibrational condition of the equipment, this report will show the diagnosis of the failing component, indicating the diagnosis and recommendation to be made.

1.3 Citação as normas utilizadas

1.3 Reference list

• ISO 20816 MECHANICAL VIBRATION — MEASUREMENT AND EVALUATION OF MACHINE VIBRATION

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2020816>

• ISO 7919-1:1986 MECHANICAL VIBRATION OF NON-RECIPROCATING MACHINES — MEASUREMENTS ON ROTATING SHAFTS AND EVALUATION — PART 1: GENERAL GUIDELINES

https://www.iso.org/search.html?q=ISO%207919%20&hPP=10&idx=all_en&p=1

• ISO 7919-2:1996 MECHANICAL VIBRATION OF NON-RECIPROCATING MACHINES — MEASUREMENTS ON ROTATING SHAFTS AND EVALUATION CRITERIA — PART 2: LARGE LAND-BASED STEAM TURBINE GENERATOR SETS

https://www.iso.org/search.html?q=ISO%207919%20&hPP=10&idx=all_en&p=1

2. *Resumo Executivo*

2. *Executive Summary*

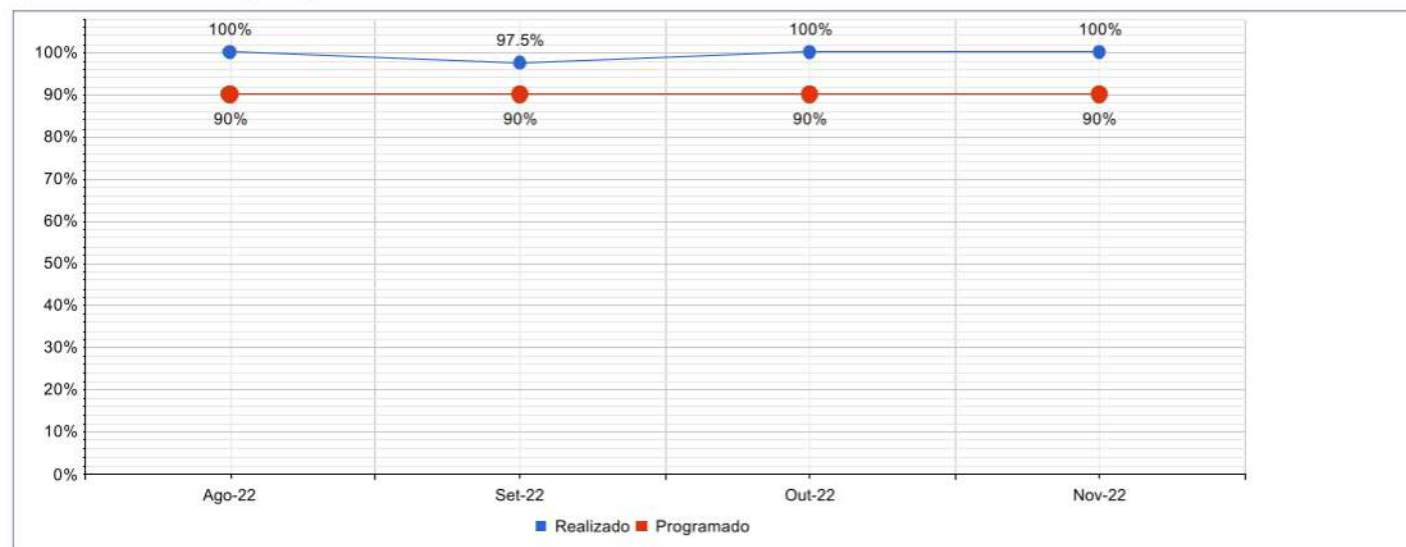
- MODEC: Fluminense
- Data De Embarque: 07-11-2022
Boarding Date: 11-07-2022
- Data De Desembarque: 21-11-2022
Landing Date: 11-21-2022
- Técnico: Franz Walterfang
Responsible: Franz Walterfang
- Instrumentação: GX 75
Instrumentation: GX 75

3. Gráficos Gerenciais

3. Management Graphics

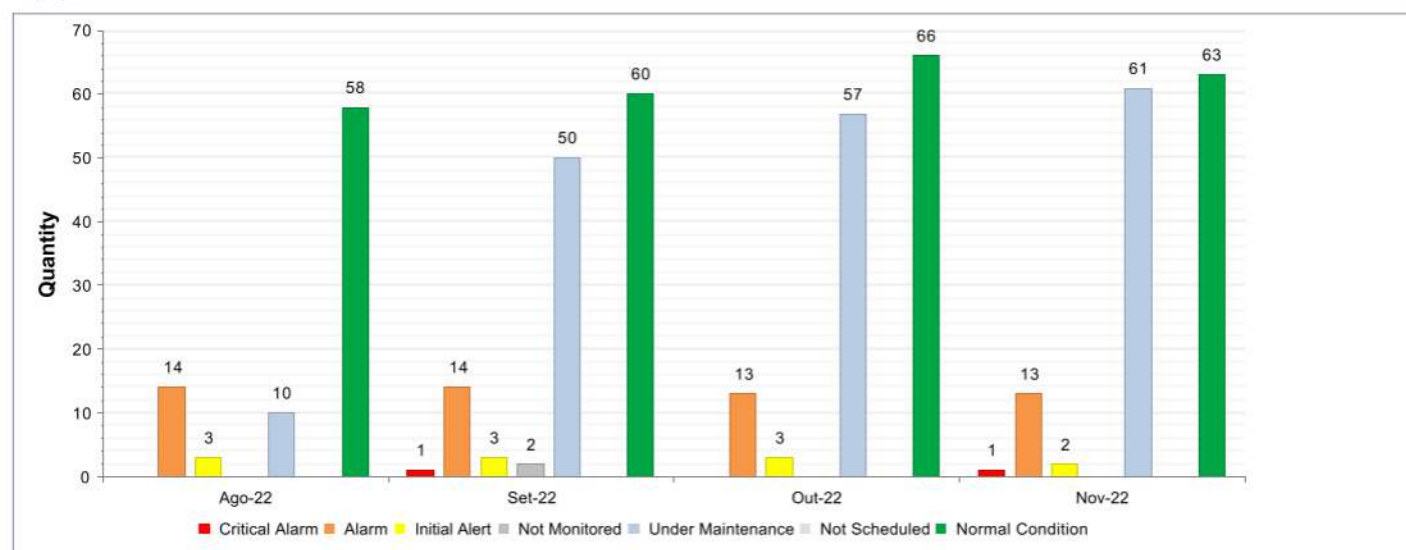
Controle de Programação(%)

Quantitative Monitoring Equipment



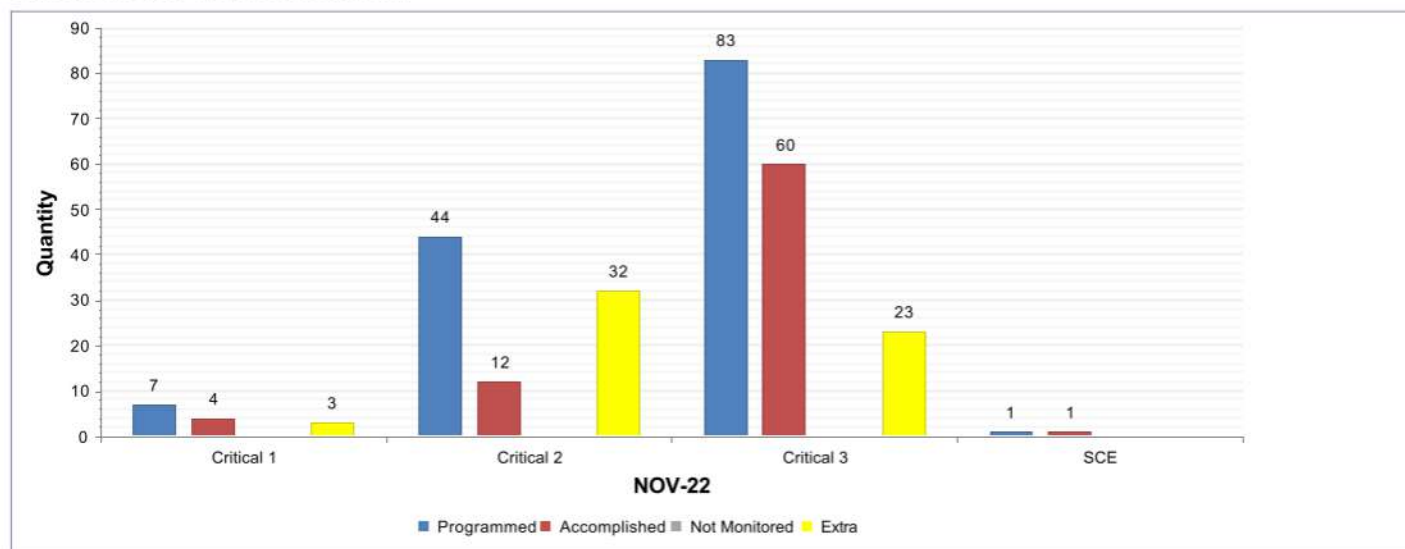
Condição dos Equipamentos

Equipment Condition



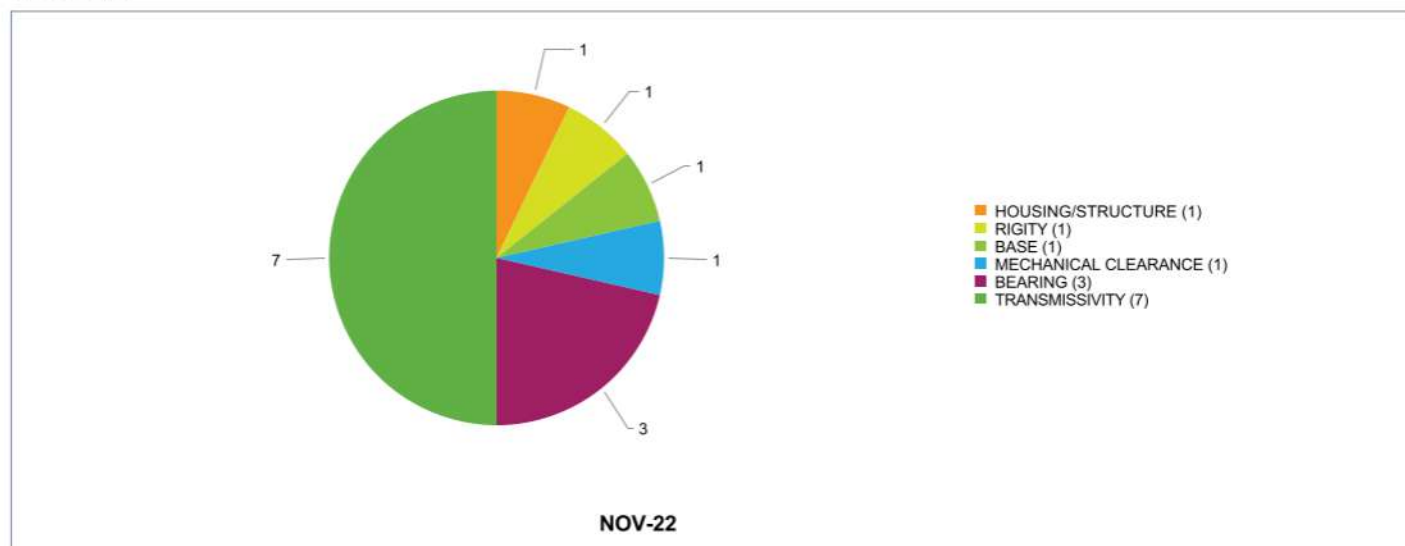
Classificação dos Equipamentos x Criticidade

Classification of Equipment x Criticality



Diagnósticos

Diagnostics



4. Ordens de Trabalho Pendentes

4. Pending Work Orders

Status	Parent	Asset	Description	Criticality	Opened Date	Diagnostic	Note
	SEA WATER PUMP -B	MFLU-ER-PBB-4812-B	Salt Water Service Pump (Existin	3	Nov 25, 2022	BEARING	10930520
	INSTR.AIR.COMPR	MFLU-M9-PBB-3710B	INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR B	2	Oct 4, 2020	BEARING	10219641
	MDO PUMP #2	MFLU-ER-EMP-4636B	MDO Supply Pump No.2 Motor	2	Oct 4, 2020	BASE	10571651
	MDO PUMP #2	MFLU-ER-PBB-4636B	MDO Supply Pump No.2	2	Dec 15, 2020	MECHANICAL CLEARANCE	10642129
	LUB OIL 1 GTG_C1	MFLU-M6-PBE-6035C-1	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10219626
	LUB OIL 1 GTG_D1	MFLU-M6-PBE-6035D-1	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10235482
	LUB OIL 2 GTG_C2	MFLU-M6-PBE-6035C-2	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10219627
	LUB OIL 2 GTG_D2	MFLU-M6-PBE-6035D-2	Main Lube Oil Pump	3	Jan 27, 2020	TRANSMISSIVITY	10235483
	LUB OIL 1 GTG_B1	MFLU-M5-PBE-6035B-1	Main Lube Oil Pump	3	Oct 4, 2020	TRANSMISSIVITY	10219624
	LUB OIL 1 GTG_A1	MFLU-M5-PBE-6035A-1	Main Lube Oil Pump 1	3	Oct 4, 2020	TRANSMISSIVITY	10642142
	LUB OIL 2 GTG_B2	MFLU-M5-PBE-6035B-2	Main Lube Oil Pump	3	Oct 4, 2020	TRANSMISSIVITY	10219625
	LUB OIL COOLER GTG_C	MFLU-M6-HAL-6020C	Lube Oil Cooler	3	Oct 4, 2020	RIGITY	10219356
	LUB OIL COOLER GTG_B	MFLU-M5-HAL-6020B	Lube Oil Cooler	3	Dec 15, 2020	HOUSING/STRUCTURE	10219666
	SERVICE AIR COMP #2	MFLU-ER-EMC-9148	Compressor Motor	3	Feb 22, 2022	BEARING	10627880
	MDO PUMP #2	4637_Gearbox	MDO PUMP GEARBOX #2	2	May 24, 2022	MECHANICAL CLEARANCE	
	MDO PUMP #1	MFLU-ER-PBB-4636A	MDO Supply Pump No.1	2	May 25, 2022	MECHANICAL CLEARANCE	

Status	Parent	Asset	Description	Criticality	Openned Date	Diagnostic	Note
	INSTR.AIR.COMP-BMC-	MFLU-M9-3710A	INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR A	2	Jun 20, 2022	MISALIGNMENT	

5. Análise detalhada - Laudos

5. Detailed Analysis - Report

TAG: MFLU-ER-PBB-4812-B

Description: Salt Water Service Pump (Existin

Criticality: 3

Area: Hierarquia/SHIPSIDE/SEA WATER PUMP -B

Status: **CRITICAL ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 10/11/2022

Analysis Date: 25/11/2022

Responsible: VICTOR.TEIXEIRA

CMMS Note: 10930520

Note Date: 25/11/2022

Re Work?: No

Diagnostic: **BEARING**

Equipamento apresenta frequência de falha na pista interna (BPFI) do rolamento DE. Foi reportado para o líder da mecanica sobre a falha . Equipment has a frequency of failure in the inner race (BPFI) of the DE bearing. It was reported to the mechanic lead about the failure. OBS: Foi observado excesso de graxa no equipamento. NOTE: An excess of grease was observed in the equipment.

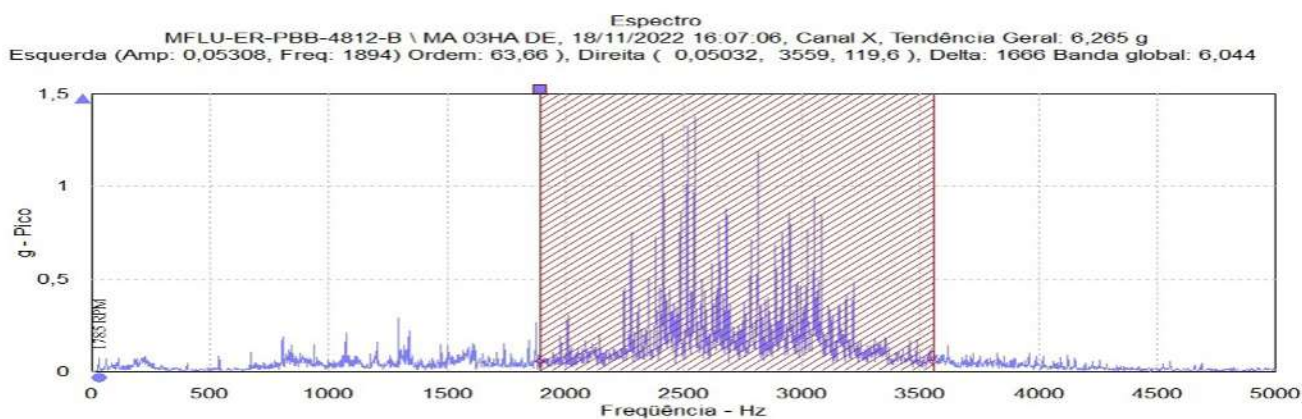
Service:

Recomendamos a troca do rolamento e inserir quantidade de graxa informada pelo o fabricante. We recommend changing the bearing and inserting the amount of grease informed by the manufacturer

History:

A2 10/11/2022**N** 06/10/2022**N** 03/09/2022**N** 03/08/2022**N** 13/07/2022**N** 15/06/2022

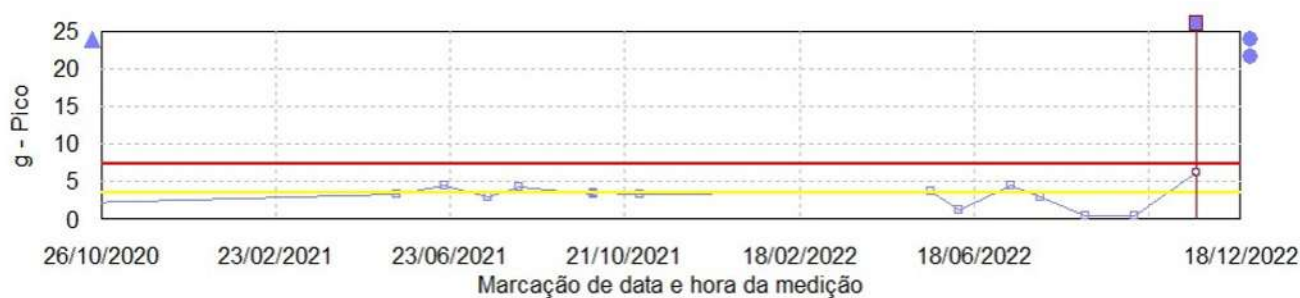
Images:



Tendência

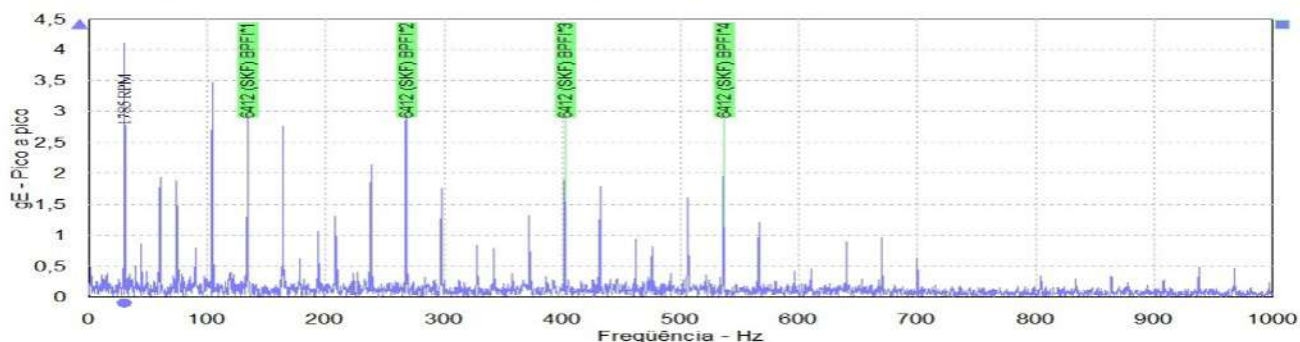
MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HA DE, Canal X

MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HA DE, Amp: 6,265, Data/Hora: 18/11/2022 16:07:06



Espectro

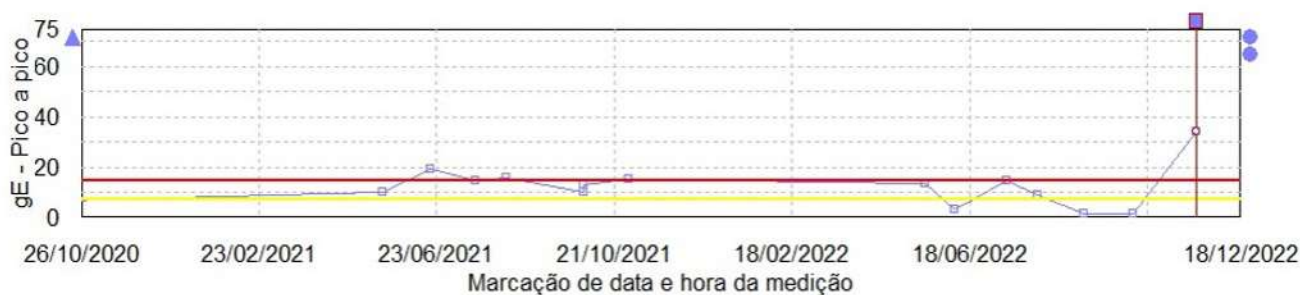
MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HE3 DE, 18/11/2022 16:07:15, Canal X, Tendência Geral: 34,11 gE
6412 (SKF) BPFI, (1x: Amp: 3,044, Freq: 134,1), (2x: 3,044, 268,1), (3x: 1,491, 402,2), (4x: 1,082, 536,3)



Tendência

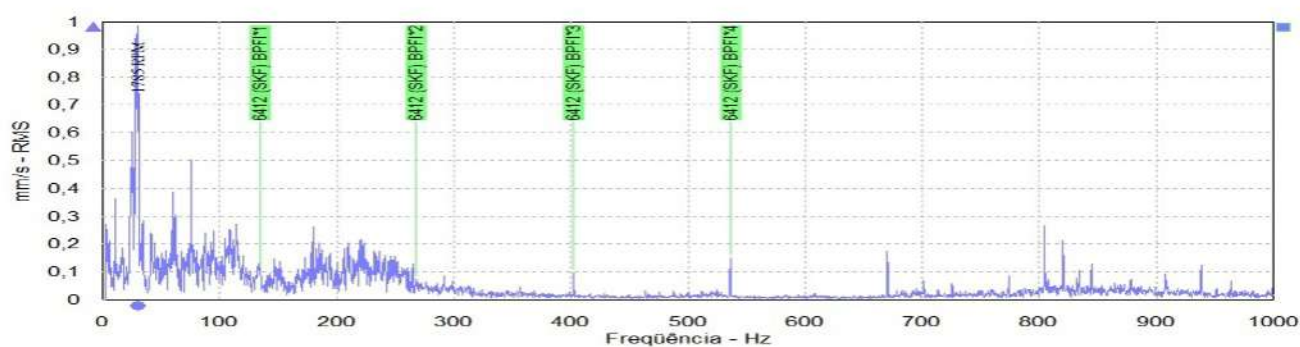
MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HE3 DE, Canal X

MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HE3 DE, Amp: 34,11, Data/Hora: 18/11/2022 16:07:15



Espectro

MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HV DE, 18/11/2022 16:07:23, Canal X, Tendência Geral: 3,975 mm/s
6412 (SKF) BPFI, (1x: Amp: 0,1071, Freq: 134,1), (2x: 0,07217, 268,1), (3x: 0,09612, 402,2), (4x: 0,1485, 536,3)



Tendência

MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HV DE, Canal X

MFLU-ER-PBB-4812-B \ MA 03HV DE, Amp: 3,975, Data/Hora: 18/11/2022 16:07:23



TAG: MFLU-M9-EMC-3710B

Description: INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR B

Criticality: 2

Area: Hierarquia/TOP SIDE/Modulo M9/INSTR.AIR.COMPR.B

Status: **ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 18/11/2022

Analysis Date: 21/11/2022

Responsible: VICTOR.TEIXEIRA

CMMS Note: 10219641

Note Date: 04/10/2020

Re Work?: No

Diagnostic: **BEARING**

Equipamento apresenta defeito nos rolamentos DE Equipment is defective in DE and NDE bearings

Service:

Recomendamos a instalação de um novo pino graxeiro no ponto DE e a lubrificação do mancal. We recommend installing a new grease fitting at the DE e NDE point and lubricating the bearings.

History:

A1 18/11/2022

A1 04/10/2022

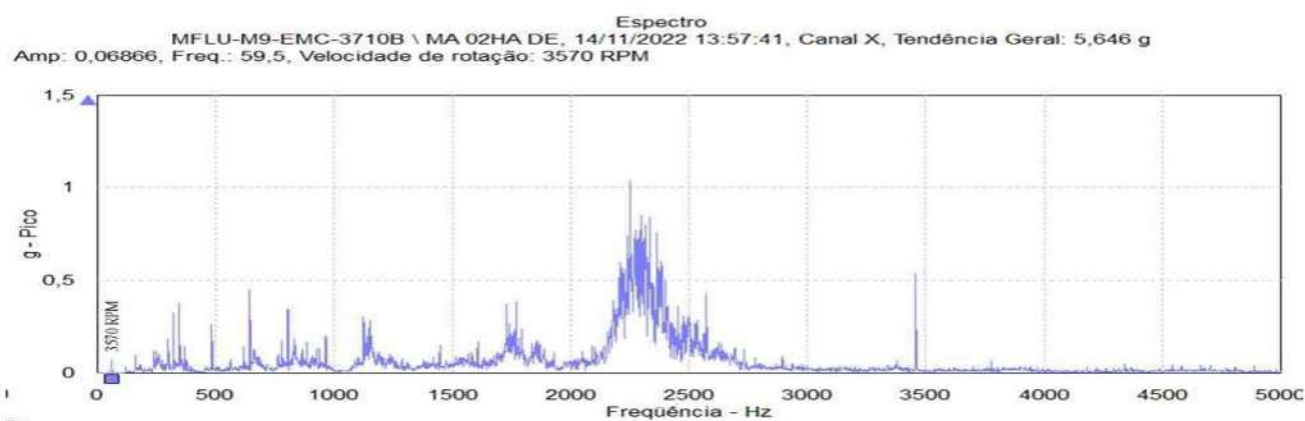
A1 01/09/2022

A1 01/08/2022

A1 09/07/2022

A1 08/06/2022

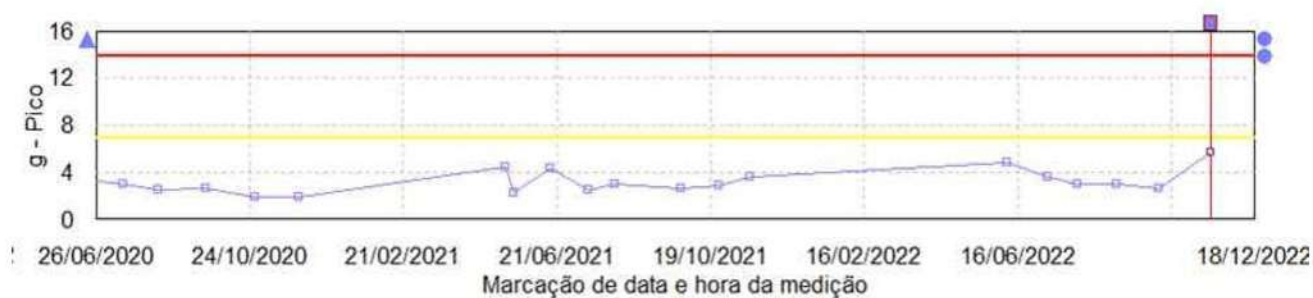
Images:



Tendência

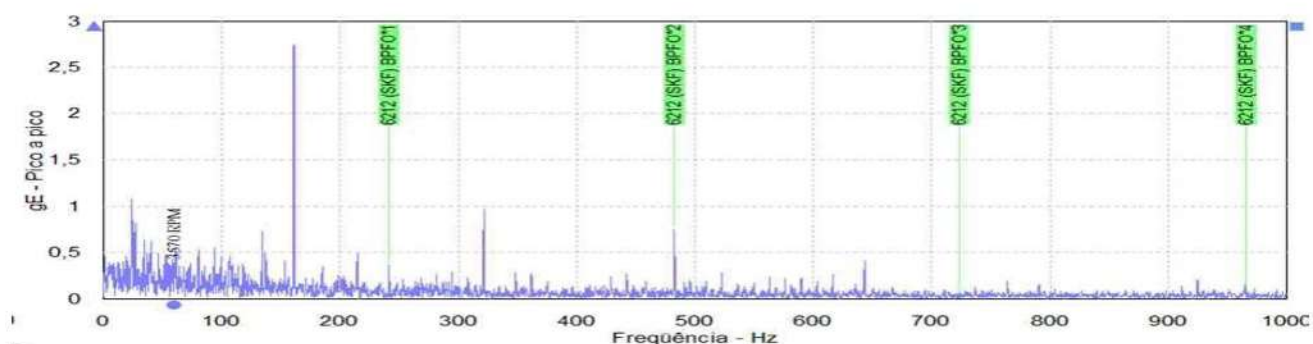
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HA DE, Canal X

MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HA DE, Amp: 5,646, Data/Hora: 14/11/2022 13:57:41



Espectro

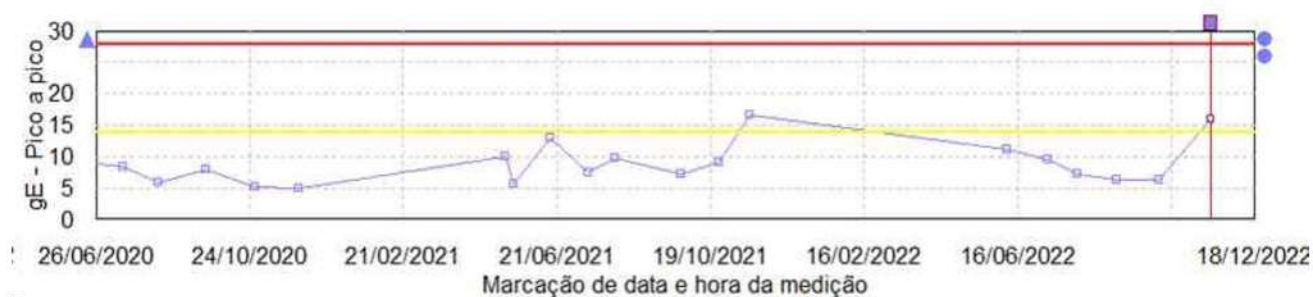
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HE3 DE, 14/11/2022 13:57:46, Canal X, Tendência Geral: 15,96 gE
6212 (SKF) BPFO, (1x: Amp: 0,3649, Freq: 241,3), (2x: 0,7464, 482,5), (3x: 0,03295, 723,8), (4x: 0,07929, 965)



Tendência

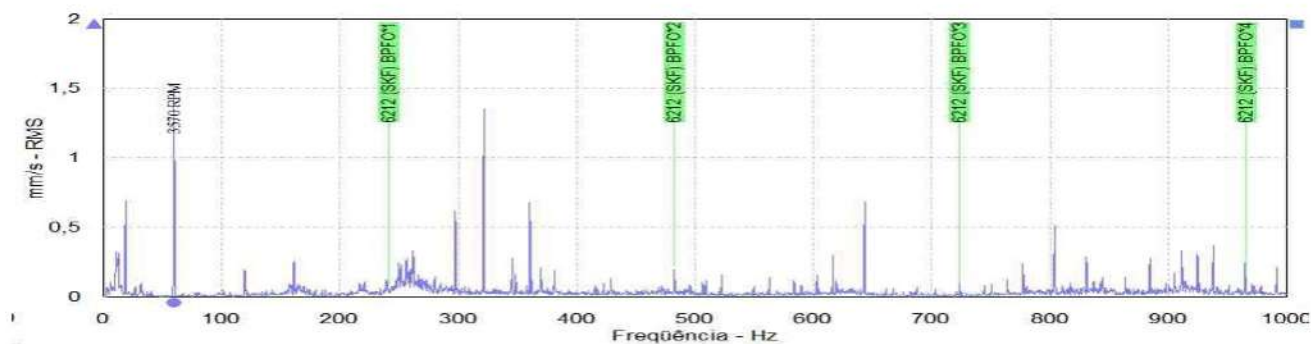
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HE3 DE, Canal X

MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HE3 DE, Amp: 15,96, Data/Hora: 14/11/2022 13:57:46



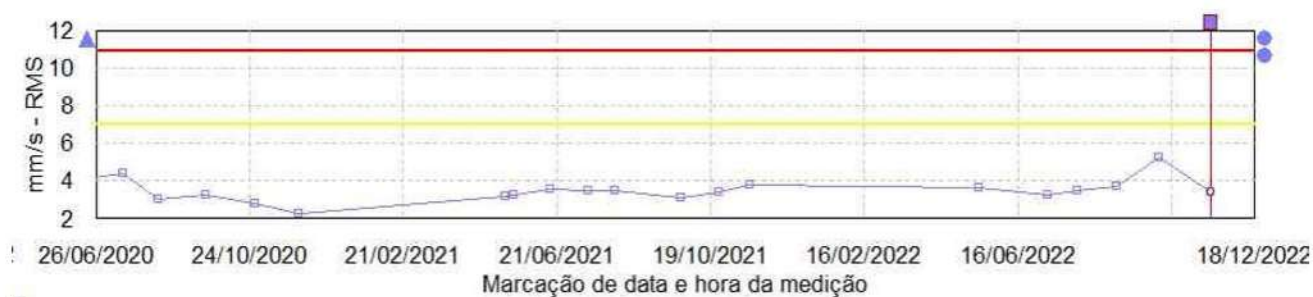
Espectro

MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02VV DE, 14/11/2022 13:58:11, Canal X, Tendência Geral: 3,412 mm/s
6212 (SKF) BPFO, (1x: Amp: 0,05673, Freq: 241,3), (2x: 0,1933, 482,5), (3x: 0,08202, 723,8), (4x: 0,1222, 965)



Tendência

MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02VV DE, Canal X
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02VV DE, Amp: 3,412, Data/Hora: 14/11/2022 13:58:11



TAG: MFLU-ER-EMP-4636B
Area: Hierarquia/SHIPSIDE/MDO PUMP #2

Description: MDO Supply Pump No.2 Motor

Criticality: 2

Status: **ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 17/11/2022	Analysis Date: 21/11/2022	Responsible: VICTOR.TEIXEIRA
CMMS Note: 10571651	Note Date: 04/10/2020	Re Work?: No

Diagnostic: **BASE**

Equipamento apresenta elevados níveis de vibração com características de baixa rigidez Equipment has high vibration levels with low stiffness characteristics

Service:

Melhorar rigidez estrutural da base, checar aperto dos parafusos nas bases do motor, gear box e bomba. Improve structural rigidity of the base, check tightness of the screws on the bases of the engine, gear box and pump.

History:

A1 17/11/2022

A1 06/10/2022

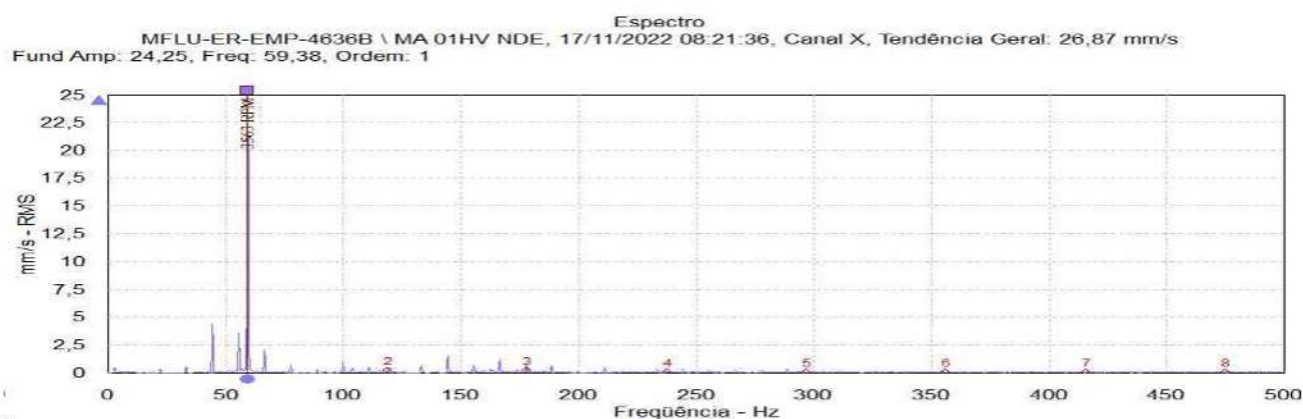
A1 03/09/2022

A1 03/08/2022

A1 13/07/2022

A1 08/06/2022

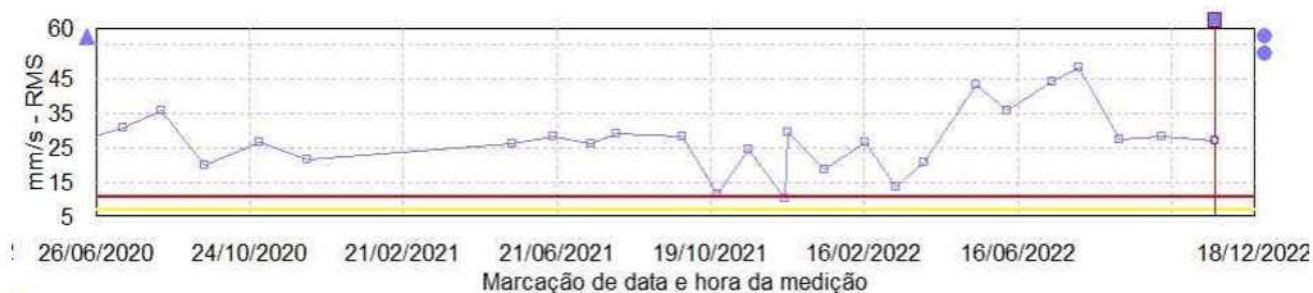
Images:



Tendência

MFLU-ER-EMP-4636B \ MA 01HV NDE, Canal X

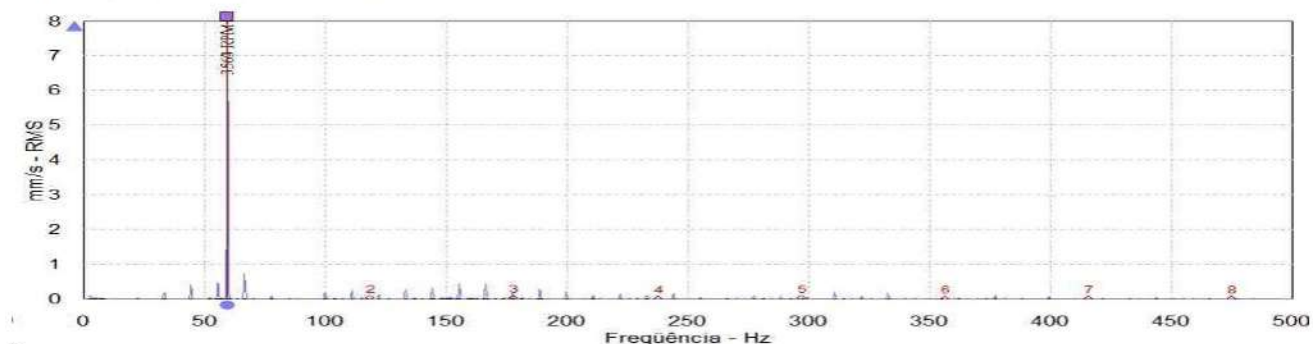
MFLU-ER-EMP-4636B \ MA 01HV NDE, Amp: 26,87, Data/Hora: 17/11/2022 08:21:36



Espectro

MFLU-ER-EMP-4636B \ MA 02VV DE, 06/10/2022 14:42:14, Canal X, Tendência Geral: 7,347 mm/s

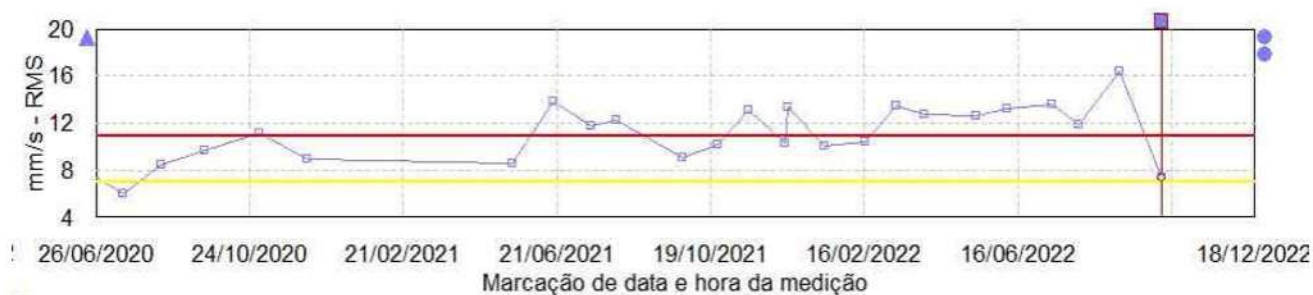
Fund Amp: 7, Freq: 59,38, Ordem: 1



Tendência

MFLU-ER-EMP-4636B \ MA 02VV DE, Canal X

MFLU-ER-EMP-4636B \ MA 02VV DE, Amp: 7,347, Data/Hora: 06/10/2022 14:42:14



ANEXO B - Relatório de Vibração SKF – Maio de 2023

VIBRATION REPORT

Fluminense

Maio - 2023

Report	MODEC - Maio - 2023
Customer	Fluminense
Contact	Eduardo Antoniol: eduardo.antoniol@modec.com
Responsible	Franz Wylly Gomes Walterfang
Instrumentation	CMXA75
Service Manager SKF	Sergio Junior (55 11) 99418-4353 sergio.junior@skf.com



TABLE OF CONTENTS

- 1. **Introdução** Introduction
- 2. **Resumo Executivo** Executive Summary
- 3. **Gráficos Gerenciais** Management Graphics
- 4. **Ordens de Trabalho Pendentes** Pending Work Orders
- 5. **Análise Detalhada dos Equipamentos Monitorados** Detailed Machine Analysis
- 6. **Relatório de Condição Detalhado** Detailed Condition Report
- 7. **Equipamentos Não Monitorados** Non-Monitored Equipment

1. Introdução

1. Introduction

1.1 Informações básicas sobre a técnica

1.1 Basic information about the technique

A manutenção Preditiva se utiliza de algumas técnicas, entre elas a análise de vibrações, termografia, ferrografia, análise de óleo, etc., para realizar uma avaliação segura das condições de funcionamento dos equipamentos, acompanhando a evolução de falhas detectadas nas máquinas. Com isso, é possível fornecer previsões de quebra dos equipamentos, garantindo a operação sem riscos de quebra inesperadas até a execução de uma parada planejada.

A análise de vibrações é a técnica utilizada na manutenção Preditiva para a avaliação de máquinas rotativas que apresenta um melhor custo/benefício, em relação as demais técnicas, fornecendo dados que possibilitam prolongar a vida dos equipamentos, baseando-se nas informações obtidas durante a operação normal do mesmo.

Resultados Previstos

A técnica de análise de vibração permite alcançar alguns dos seguintes benefícios, como:

A. Redução dos custos de manutenção - Com base na análise de vibrações e nas curvas de tendência, pode-se ter uma previsão de quando será necessária uma intervenção de manutenção, e quais os serviços a serem realizados, prolongando-se a vida útil de componentes, substituindo-as apenas o necessário.

B. Aumento da eficiência das intervenções da manutenção - através da indicação antecipada dos elementos com falha e da avaliação dos resultados das intervenções.

C. Aumento da disponibilidade dos equipamentos - A utilização de programas preditivos pode virtualmente eliminar paralisações imprevistas devido a falha de máquinas, bem como reduzir a necessidade de programação de paradas desnecessárias para serviços preventivos.

D. Aumento da confiabilidade operacional - A eliminação de paradas não programadas aumenta a confiabilidade.

Predictive maintenance uses some techniques, including vibration analysis, thermography, ferrography, oil analysis, etc., to carry out a safe evaluation of the equipment's operating conditions, following the evolution of failures detected in the machines. With this, it is possible to provide forecasts of equipment breakage, ensuring the operation without risks of unexpected breakages until the execution of a planned stop.

Vibration analysis is the technique used in Predictive maintenance for the evaluation of rotating machines that presents a better cost/benefit, compared to other techniques, providing data that enable the life of the equipment to be extended, based on the information obtained during the operation. normal of the same.

Expected Results

The vibration analysis technique allows you to achieve some of the following benefits, such as:

A. Reduction of maintenance costs - Based on the analysis of vibrations and trend curves, it is possible to have a forecast of when a maintenance intervention will be necessary, and which services will be performed, extending the service life of components, replacing them only as necessary.

B. Increased efficiency of maintenance interventions - through early indication of faulty elements and evaluation of intervention results.

C. Increased Equipment Availability - The use of predictive programs can virtually eliminate unplanned downtime due to machine failure, as well as reduce the need to schedule unnecessary downtime for preventative services.

D. Increased operational reliability - Eliminating unscheduled downtime increases reliability

1.2 Objetivo

1.2 Objective

O objetivo desse relatório é apresentar a condição dos ativos monitorados por vibração na unidade, indicando se o equipamento está em estado normal, alerta ou crítico. Caso apresente alterações na condição vibracional dos equipamentos, será evidenciado neste relatório o diagnóstico do componente em falha, indicando o diagnóstico e recomendação a serem feitas.

The objective of this report is to present the condition of the assets monitored by vibration in the unit, indicating that the equipment is in normal, warning or critical. If there are changes in the vibrational condition of the equipment, this report will show the diagnosis of the failing component, indicating the diagnosis and recommendation to be made.

1.3 Citação as normas utilizadas

1.3 Reference list

• ISO 20816 MECHANICAL VIBRATION — MEASUREMENT AND EVALUATION OF MACHINE VIBRATION

<https://www.iso.org/search.html?q=ISO%2020816>

• ISO 7919-1:1986 MECHANICAL VIBRATION OF NON-RECIPROCATING MACHINES — MEASUREMENTS ON ROTATING SHAFTS AND EVALUATION — PART 1: GENERAL GUIDELINES

https://www.iso.org/search.html?q=ISO%207919%20&hPP=10&idx=all_en&p=1

• ISO 7919-2:1996 MECHANICAL VIBRATION OF NON-RECIPROCATING MACHINES — MEASUREMENTS ON ROTATING SHAFTS AND EVALUATION CRITERIA — PART 2: LARGE LAND-BASED STEAM TURBINE GENERATOR SETS

https://www.iso.org/search.html?q=ISO%207919%20&hPP=10&idx=all_en&p=1

2. *Resumo Executivo*

2. *Executive Summary*

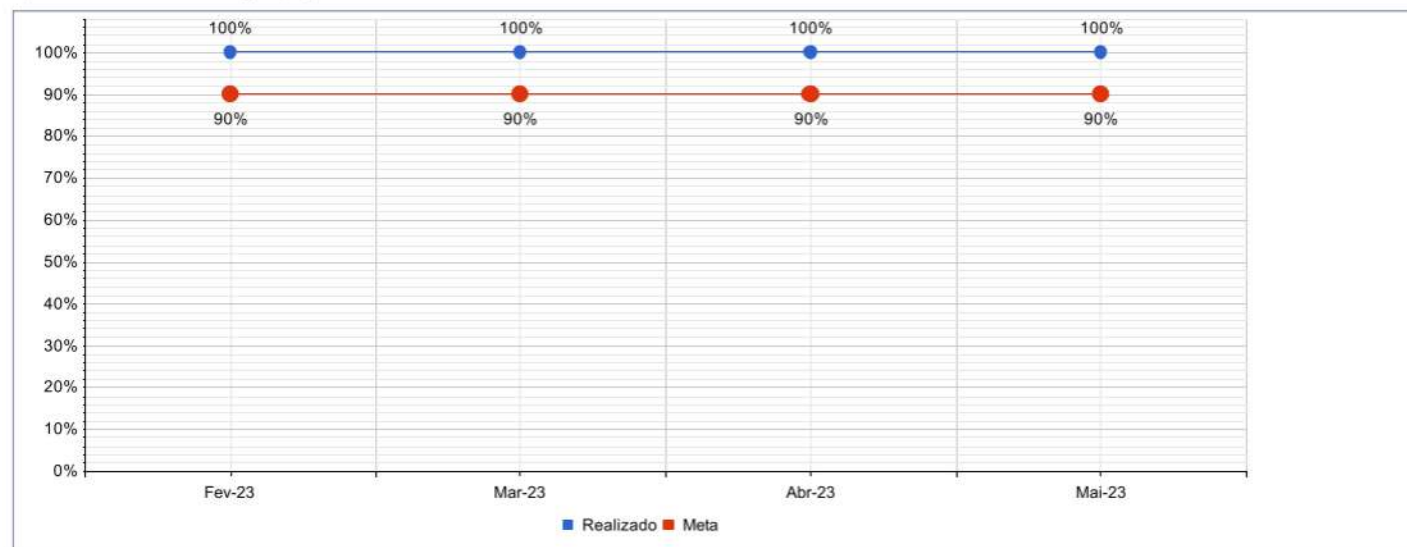
- **MODEC:** Fluminense
- **Data De Embarque:** 05-05-2023
Boarding Date: 05-05-2023
- **Data De Desembarque:** 17-05-2023
Landing Date: 05-17-2023
- **Técnico:** Franz Wylly Gomes Walterfang
Responsible: Franz Wylly Gomes Walterfang
- **Instrumentação:** CMXA75
Instrumentation: CMXA75

3. Gráficos Gerenciais

3. Management Graphics

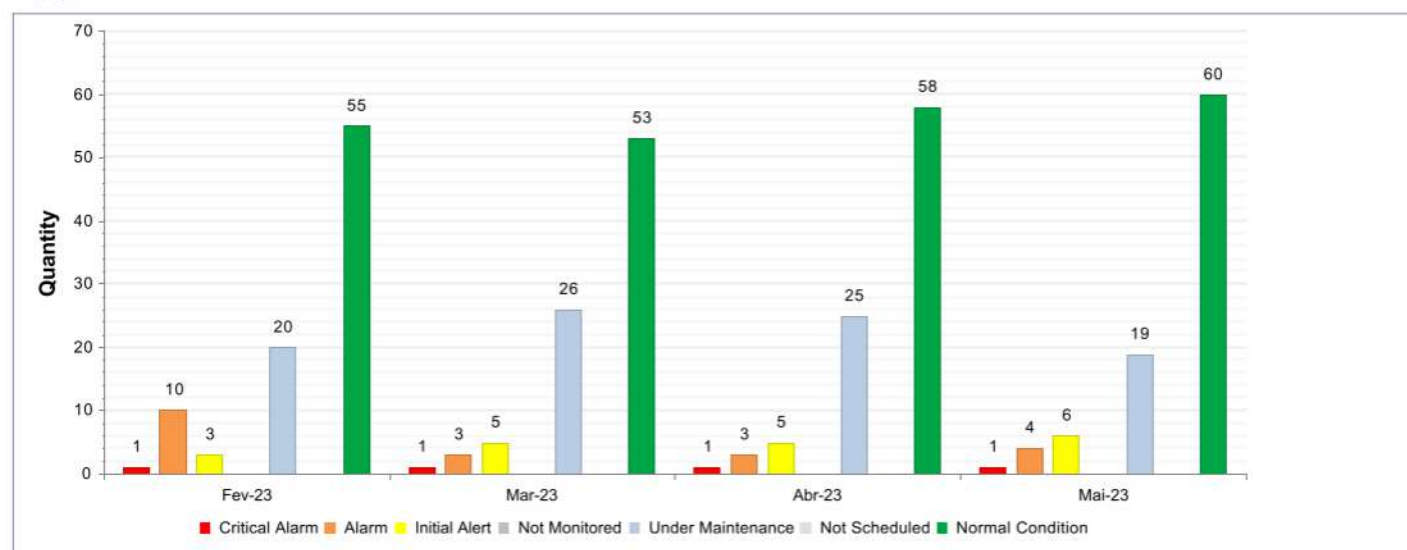
Controle de Programação(%)

Quantitative Monitoring Equipment



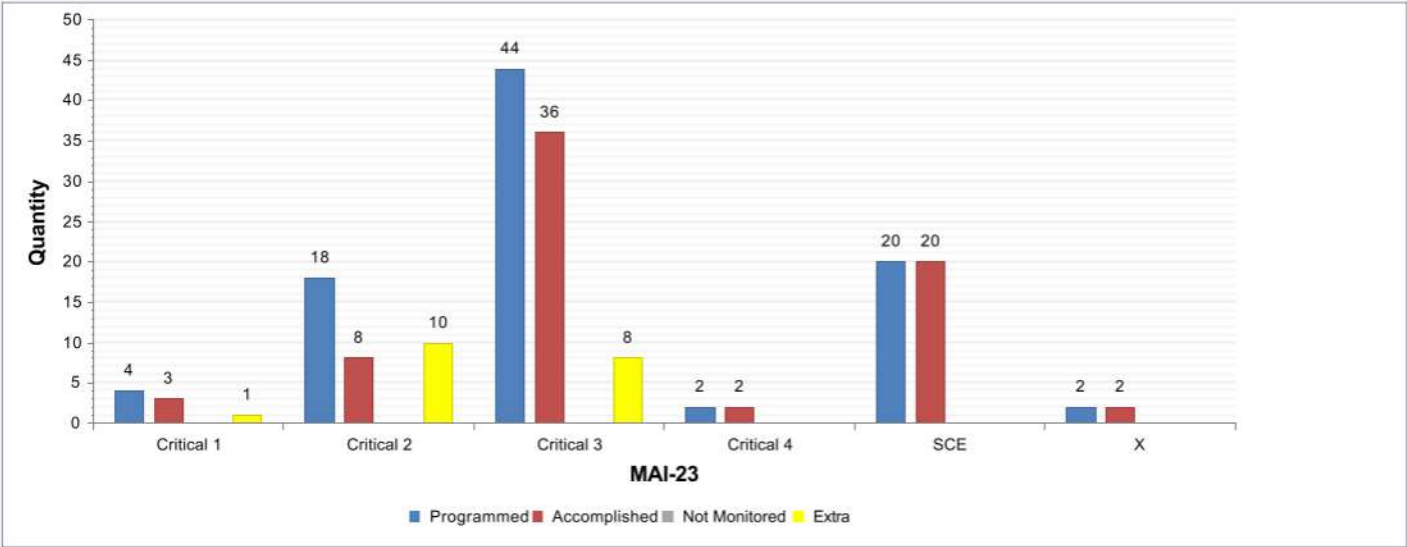
Condição dos Equipamentos

Equipment Condition



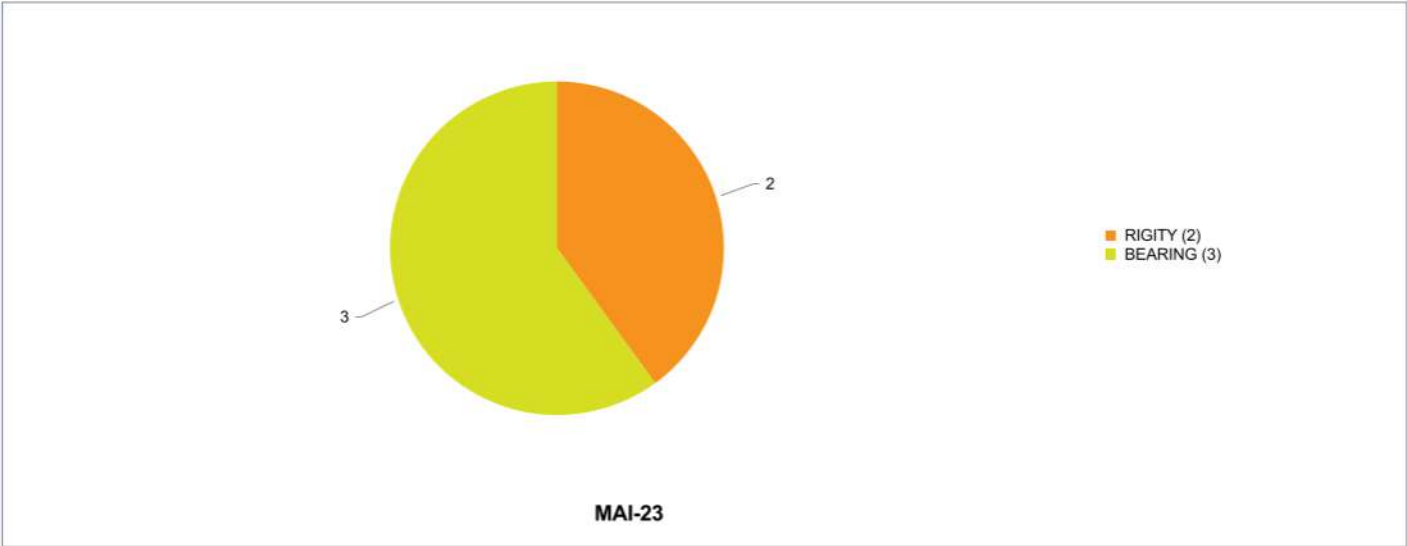
Classificação dos Equipamentos x Criticidade

Classification of Equipment x Criticality



Diagnósticos

Diagnostics



4. Ordens de Trabalho Pendentes

4. Pending Work Orders

Status	Parent	Asset	Description	Criticality	Opened Date	Diagnostic	Note
	SEA WATER PUMP -B	MFLU-ER-PBB-4812-B	Salt Water Service Pump (Existin	1 SCE	Nov 25, 2022	BEARING	10930520
	INSTR.AIR.COMP	MFLU-M9-PBE-3710B	INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR B	2	Oct 4, 2020	BEARING	10219641
	LUB OIL COOLER GTG_C	MFLU-M6-HAL-6020C	Lube Oil Cooler	3	Oct 4, 2020	RIGITY	10219356
	LUB OIL COOLER GTG_B	MFLU-M5-HAL-6020B	Lube Oil Cooler	3	Dec 15, 2020	RIGITY	10219666
	SERVICE AIR COMP #2	MFLU-ER-EMC-9148	Compressor Motor	3	Feb 22, 2022	BEARING	10627880
	MDO PUMP #1	MFLU-ER-PBB-4636A	MDO Supply Pump No.1	2	May 25, 2022	MECHANICAL CLEARANCE	
	LUB OIL 1 GTG_B1	MFLU-M5-PBE-6035B-1	Main Lube Oil Pump	3	Mar 22, 2023	RIGITY	
	LUB OIL 1 GTG_D1	MFLU-M6-PBE-6035D-1	Main Lube Oil Pump	3	Mar 22, 2023	RIGITY	
	LUB OIL 2 GTG_D2	MFLU-M6-PBE-6035D-2	Main Lube Oil Pump	3	Mar 22, 2023	RIGITY	
	LUB OIL 1 GTG_C1	MFLU-M6-PBE-6035C-1	Main Lube Oil Pump	3	May 20, 2023	RIGITY	
	LUB OIL 2 GTG_C2	MFLU-M6-PBE-6035C-2	Main Lube Oil Pump	3	May 20, 2023	RIGITY	
	LUB OIL 1 GTG_A1	MFLU-M5-PBE-6035A-1	Main Lube Oil Pump 1	3	Oct 4, 2020	UNDER MAINTENANCE	10642142
	LUB OIL COOLER GTG_A	MFLU-M5-HAL-6020A	Lube Oil Cooler	3	Aug 6, 2022	UNDER MAINTENANCE	
	LUB OIL 2 GTG_B2	MFLU-M5-PBE-6035B-2	Main Lube Oil Pump	3	Mar 22, 2023	UNDER MAINTENANCE	

5. Análise detalhada - Laudos

5. Detailed Analysis - Report

TAG: MFLU-ER-PBB-4812-B

Description: Salt Water Service Pump (Existin

Criticality: **SCE**

Area: Hierarquia/SHIPSIDE/SEA WATER PUMP -B

Status: **CRITICAL ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 16/05/2023

Analysis Date: 24/05/2023

Responsible: SERGIO JUNIOR

CMMS Note: 10930520

Note Date: 25/11/2022

Re Work?: No

Diagnostic: **BEARING**

Equipamento apresenta frequência de falha na pista interna (BPFI) do rolamento DE e NDE. Foi reportado para o líder da mecânica sobre a falha. Equipment has a frequency of failure in the inner race (BPFI) of the DE and NDE bearing. It was reported to the mechanic lead about the failure. OBS: Foi observado excesso de graxa no equipamento. NOTE: An excess of grease was observed in the equipment.

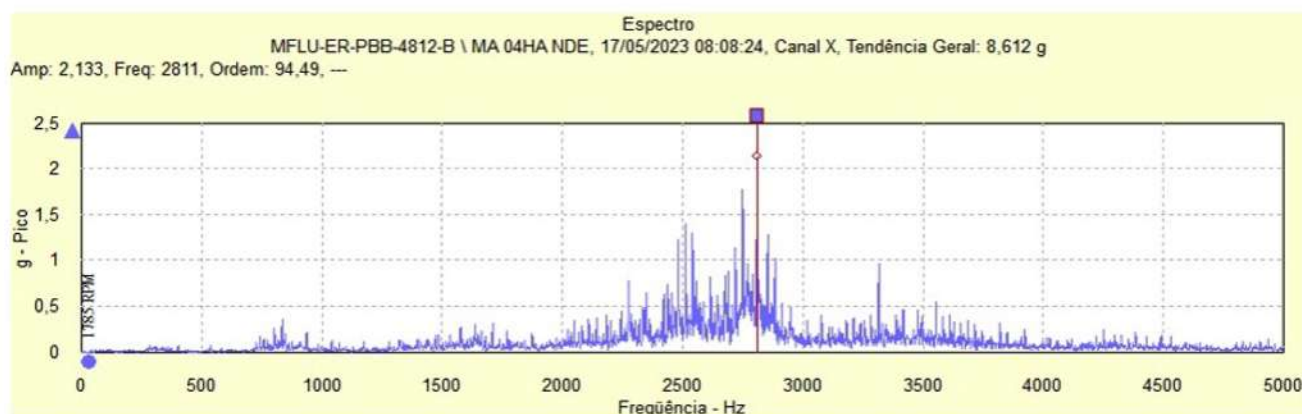
Service:

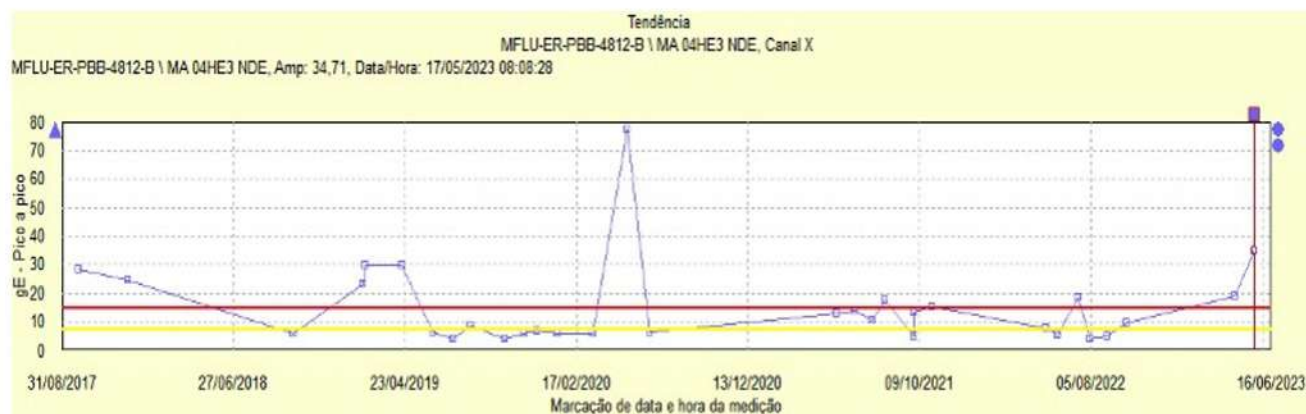
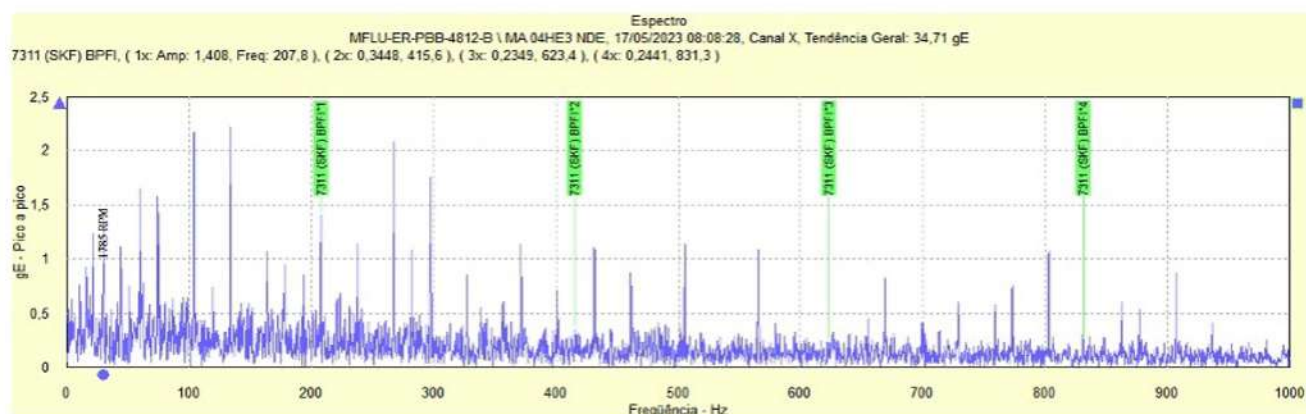
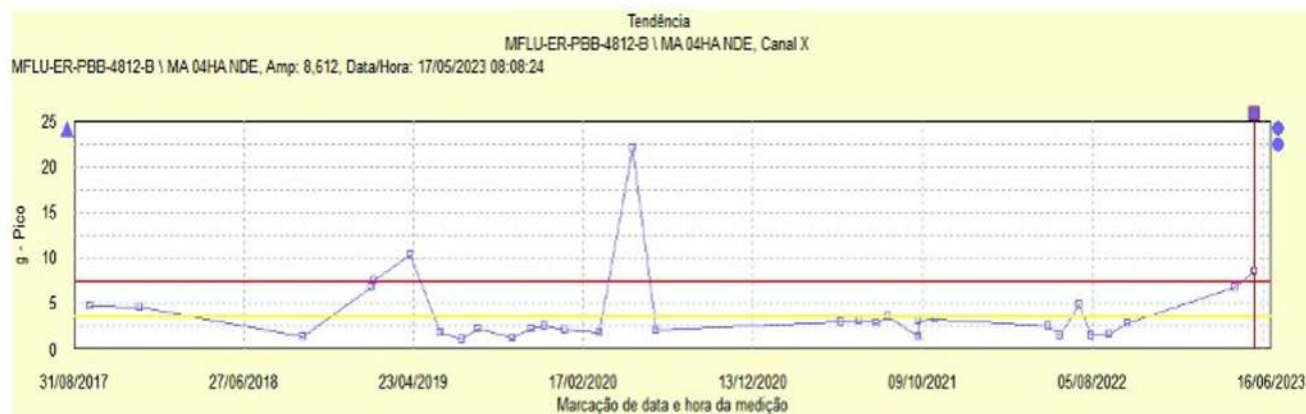
Recomendamos a troca dos rolamentos, realizar a relubrificação conforme plano e orientações do fabricante. We recommend changing the bearing and inserting the amount of grease informed by the manufacturer

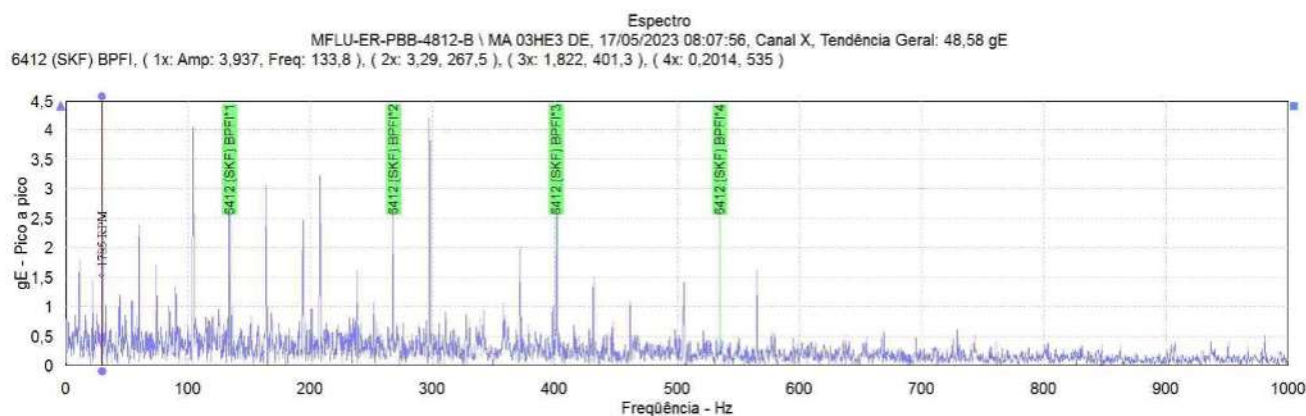
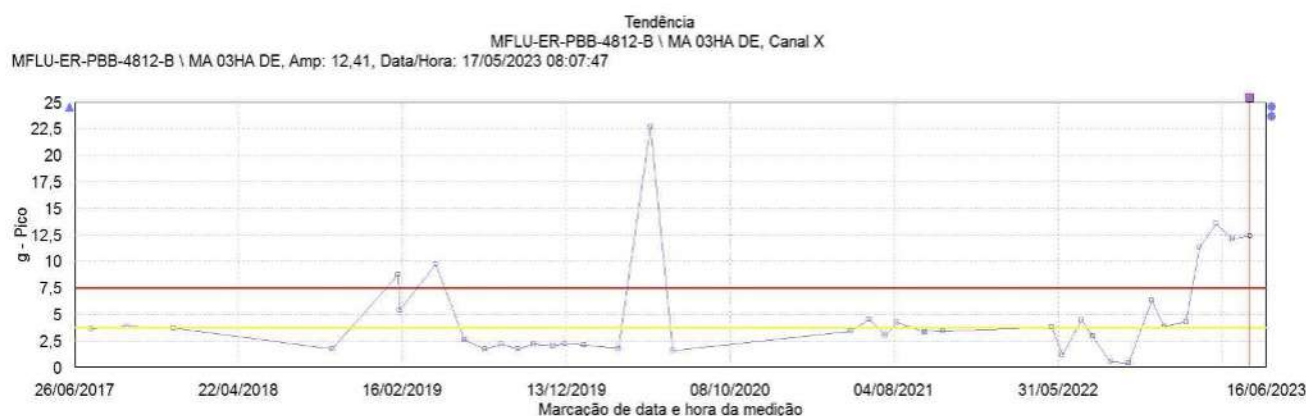
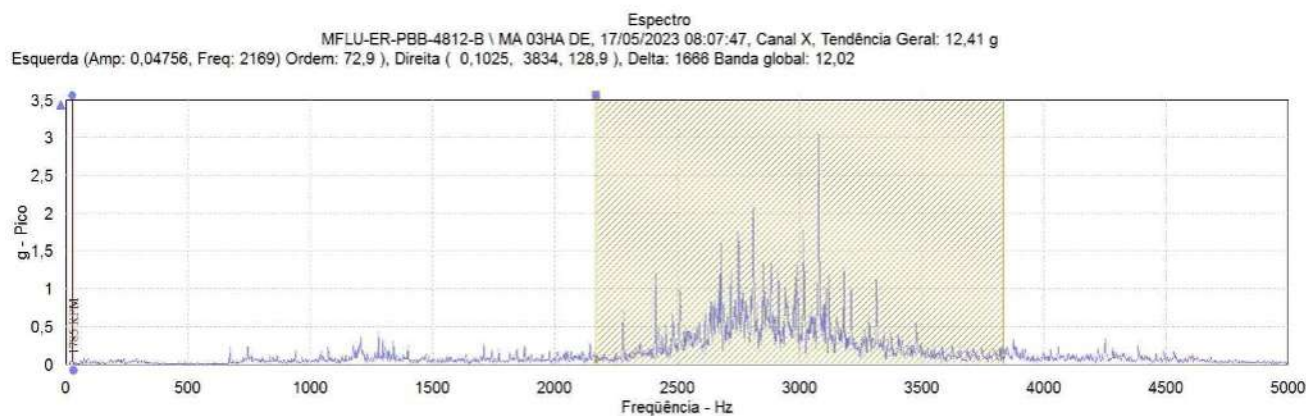
History:

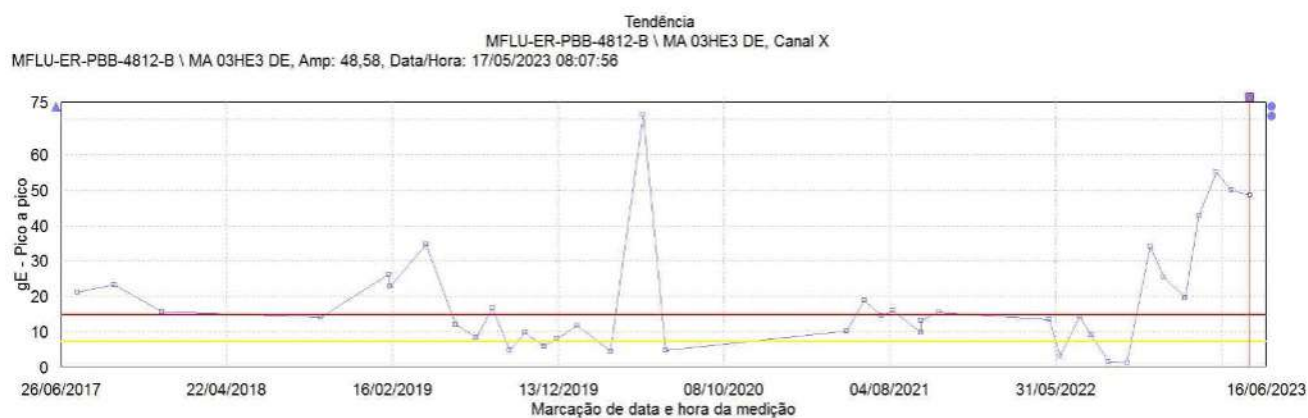
A2 16/05/2023**A2** 14/04/2023**A2** 16/03/2023**A2** 14/02/2023**A2** 20/01/2023**A2** 12/12/2022

Images:









TAG: MFLU-M9-EMC-3710B

Description: INSTR AIR COMPRESSOR MOTOR B

Criticality: 2

Area: Hierarquia/TOP SIDE/Modulo M9/INSTR.AIR.COMPR.B

Status: **ALARM**

Data analysis:

Collect Date: 11/05/2023

Analysis Date: 20/05/2023

Responsible: FRANZ.WALTERFANG

CMMS Note: 10219641

Note Date: 04/10/2020

Re Work?: No

Diagnostic: **BEARING**

Equipamento apresenta defeito nos rolamentos NDE e DE Equipment is defective in DE and NDE bearings

Service:

Recomendamos a substituição dos rolamentos DE e NDE. Lubrificação realizada nos mancais do equipamento. We recommend replacing the DE and NDE bearings. Lubrication performed on the equipment bearings.

History:

A1 11/05/2023

A1 08/04/2023

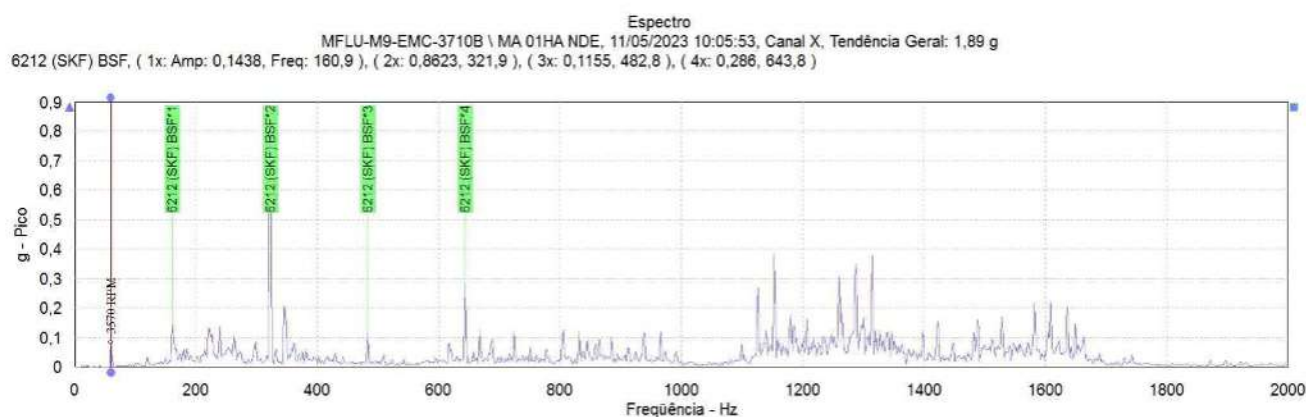
A1 14/03/2023

A1 12/02/2023

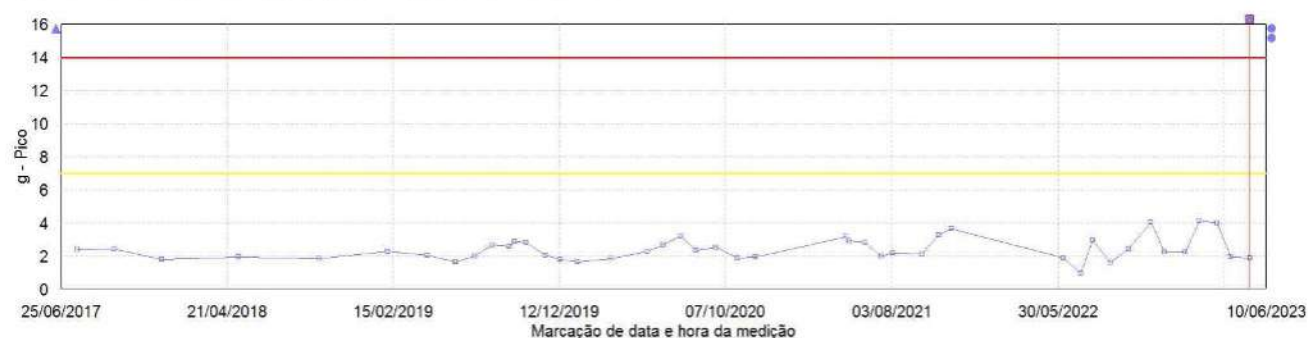
A1 14/01/2023

A1 09/12/2022

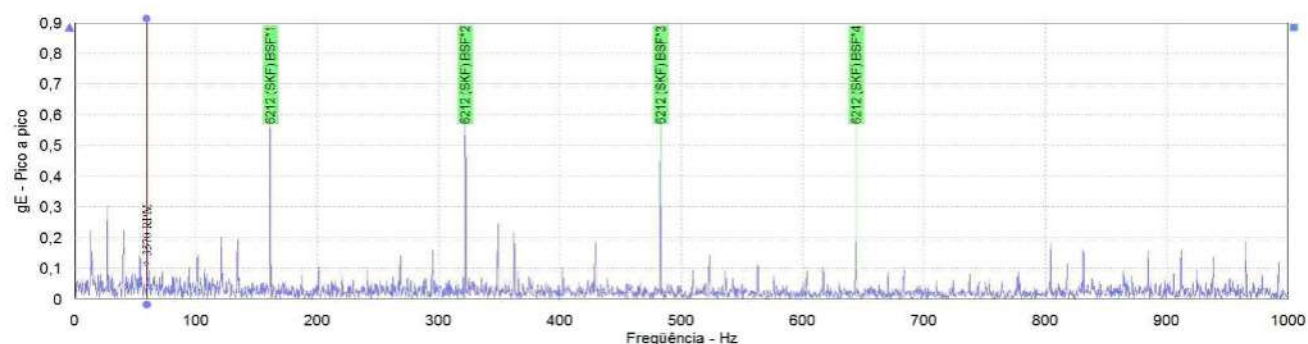
Images:



Tendência
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 01HA NDE, Amp: 1,89, Data/Hora: 11/05/2023 10:05:53



Espectro
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 01HE3 NDE, 11/05/2023 10:06:09, Canal X, Tendência Geral: 4,981 gE
6212 (SKF) BSF, (1x: Amp: 0,639, Freq: 160,9), (2x: 0,7861, 321,9), (3x: 0,2989, 482,8), (4x: 0,09001, 643,8)



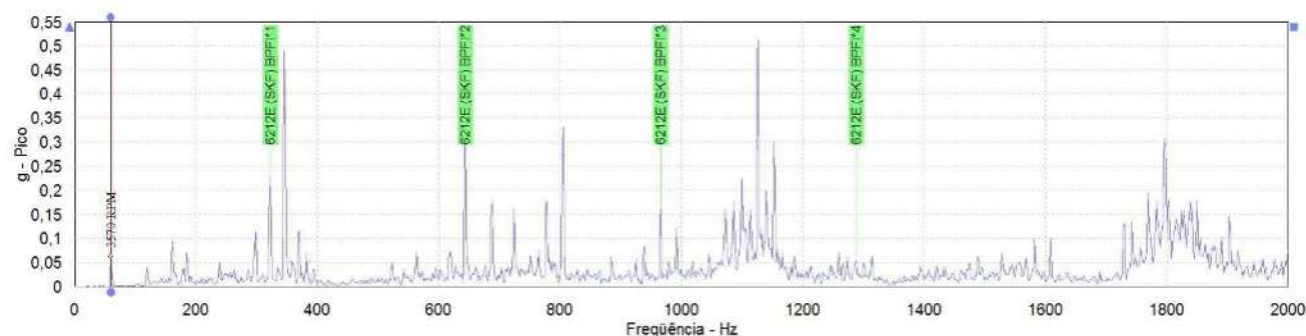
Tendência
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 01HE3 NDE, Amp: 4,981, Data/Hora: 11/05/2023 10:06:09



Espectro

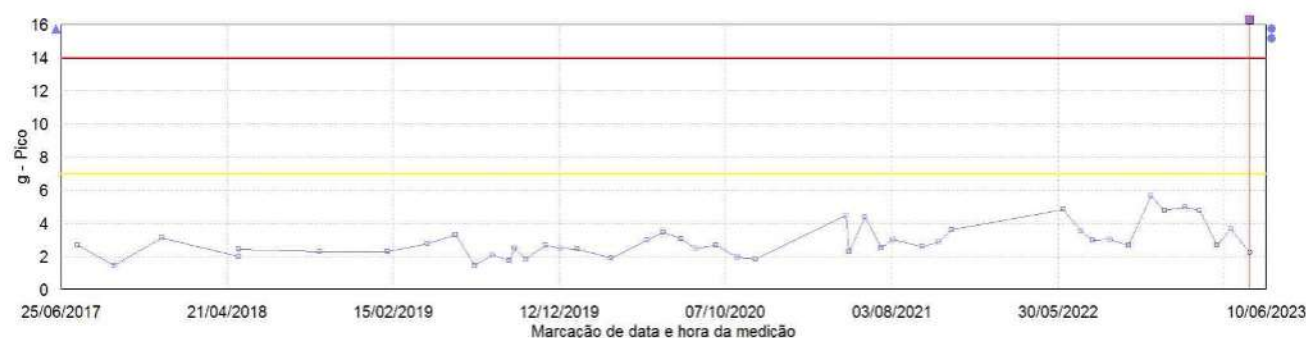
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HA DE, 11/05/2023 10:06:50, Canal X, Tendência Geral: 2,235 g

6212E (SKF) BPFI, (1x: Amp: 0,2293, Freq: 321,9), (2x: 0,3795, 643,8), (3x: 0,1625, 965,6), (4x: 0,05294, 1288)



Tendência

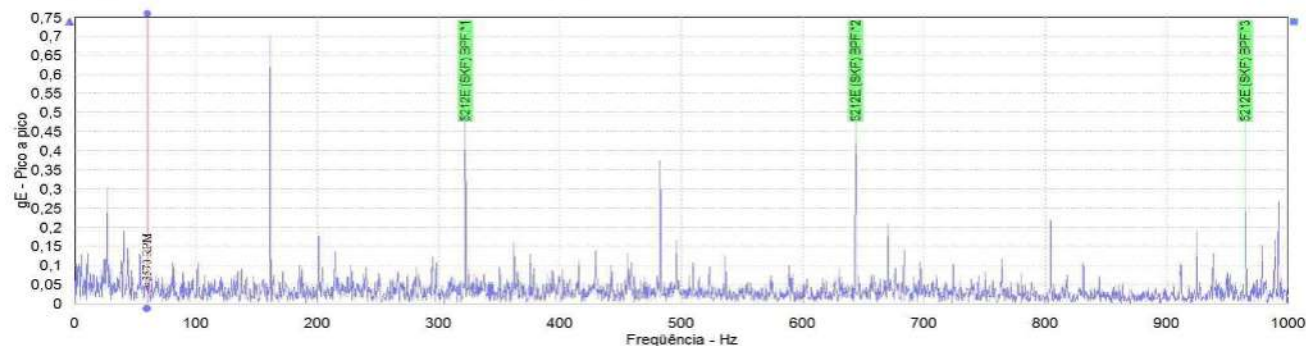
MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HA DE, Amp: 2,235, Data/Hora: 11/05/2023 10:06:50

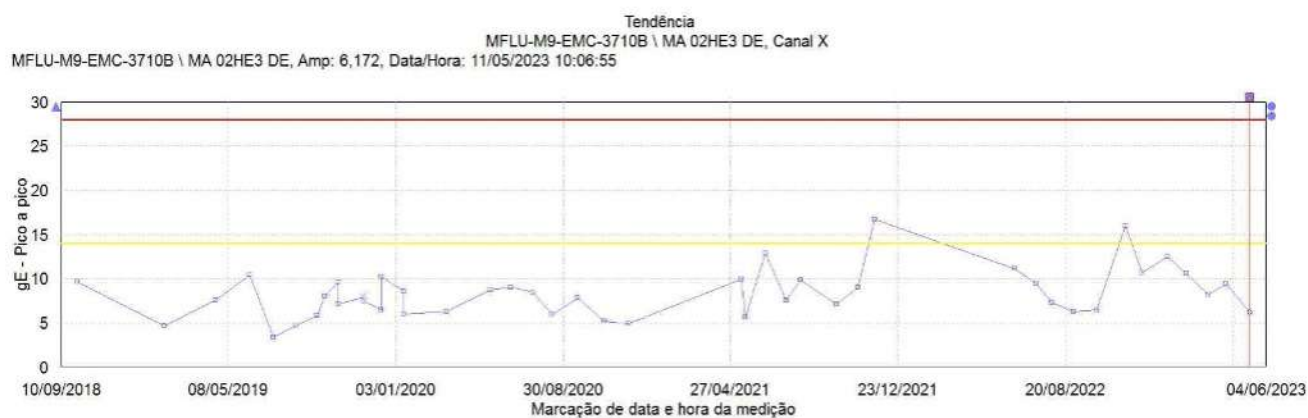


Espectro

MFLU-M9-EMC-3710B \ MA 02HE3 DE, 11/05/2023 10:06:55, Canal X, Tendência Geral: 6,172 gE

6212E (SKF) BPFI, (1x: Amp: 0,6635, Freq: 321,6), (2x: 0,412, 643,1), (3x: 0,07477, 964,7)





ANEXO C - Relatório de Manutenção – *Sea Water Service Pump Bravo*
Notificação 10930520

FORMULÁRIO GERAL DE MANUTENÇÃO GENERAL FORM FOR MAINTENANCE				Código do Template:		MAINT-01		
				Template Code:				
				Revisão:		8		
				Revision:				
				Data:		9-Jan-23		
				Date:				
Embarcação / Vessel:		FLU	Nota:	10930520	Duração da atividade (Horas):	8	Modelo:	Z12-256
			Notification:		Task Time Duration (hours):		Model:	
TAG:		MFLU-ER-PBB-4812-B	Criticidade do TAG:	1-SCE	Data de Término da Tarefa:	10-Apr-23	Fabricante:	JMW
			TAG Criticality:		Task Finish Date:		Manufacturer:	
Anexos (Documentos, Imagens, etc.) / Attachments (Documents, Images, etc.)								
								

ANEXO D - Datasheet Sulzer Bombas tipo OHH

OHH and OHHL (API 610) type OH2 single stage end suction process pumps



Main industries and applications

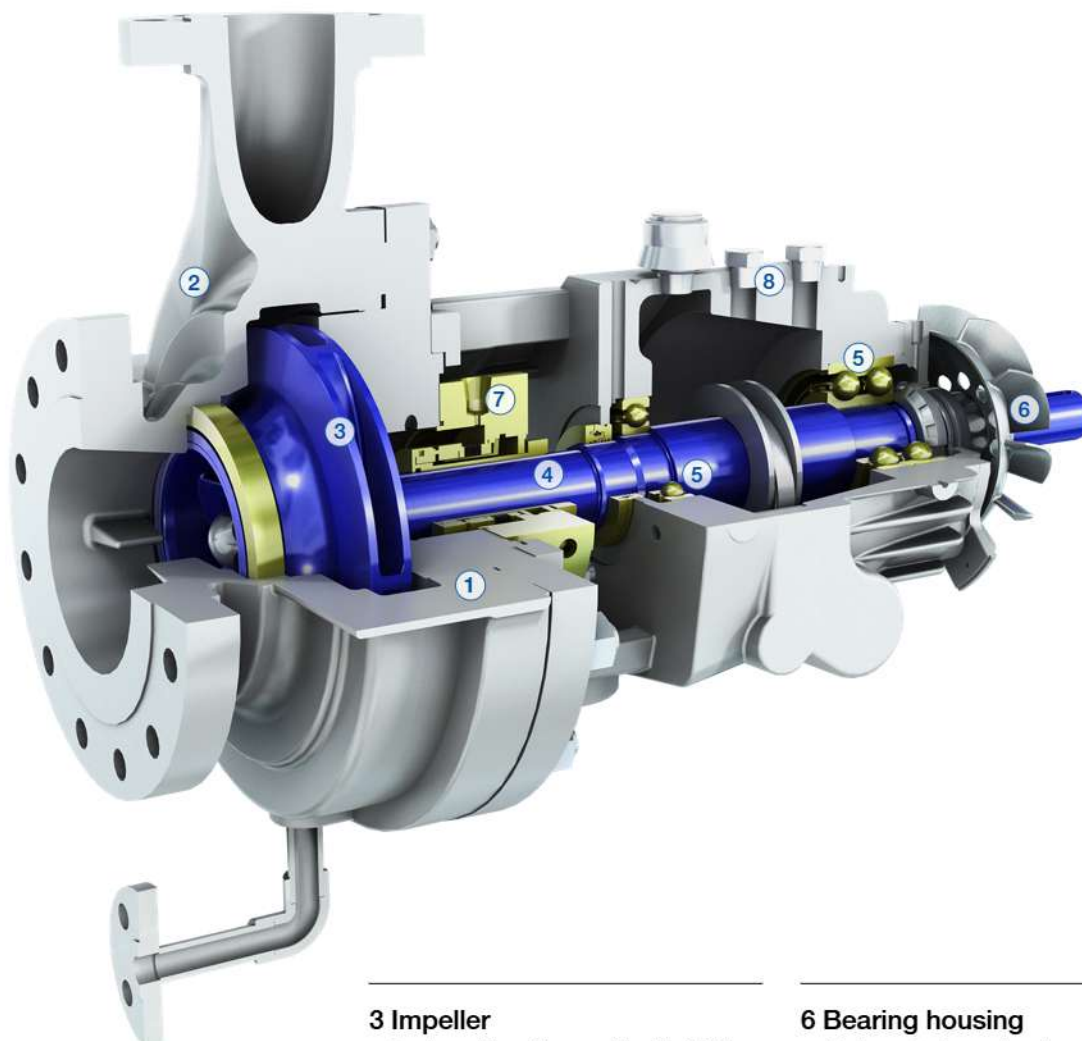
The OHH and OHHL are designed to API 610 for heavy duty process flows and heads. The OHH utilizes a conventional enclosed, high efficiency impeller. The OHHL impeller is semi-open which is required for its unique low flow capability. Both pumps utilize the same mechanical seals, bearings, bearing isolators, bearing housing, and fan. Larger sizes of OHHL are available with an inducer for lower NPSH3.

OHH and OHHL pumps are commonly found in

- Synfuels
- Refining
- Gas processing
- Petrochemicals
- Nitrogenous fertilizer



Features and benefits



1 Casing feet and baseplate

- With the bearing housing foot prohibited by API 610, casing feet and baseplate are heavily reinforced to carry nozzle loads while maintaining alignment to API 610 requirements

2 Pressure casing

- Designed to 20% of tensile strength plus 3 mm corrosion allowance for long life
- 300# RF flanges are standard. 600# RF with optional high pressure casing

3 Impeller

- Enclosed impeller provided in OHH for efficiency
- OHHL utilizes unique semi-open impeller for low flow and high head

4 Extra heavy duty, large diameter shaft

- Provides minimal shaft deflection and long seal and wear ring life

5 Bearings

- Opposed 40 degrees angular contact thrust bearings with machined brass cage for long term reliability
- C3 ball radial bearing
- Optional triple row thrust bearing and roller radial bearing

6 Bearing housing

- Carbon steel construction with cooling fins for improved heat dissipation

7 API 682 mechanical seal and API 610 seal chamber

- Fully cartridge seals in API 610 seal chamber for improved seal environment and life

8 Bearing assembly

- Four sizes of bearing housing cover the product range for maximum interchangeability
 - Low noise fan added for high ambient or high product temperatures
 - Ring oil, purge mist or pure mist lubrication
-

Specifications OHH

Material options

API 610 material codes:
S-4, S-5, S-6, S-8, S-9, C-6, A-8, D-1, D-2, 317L

Common alloys available:
625, 825, 254, 20, hastelloy C276, titanium Gr.3 & Gr.12

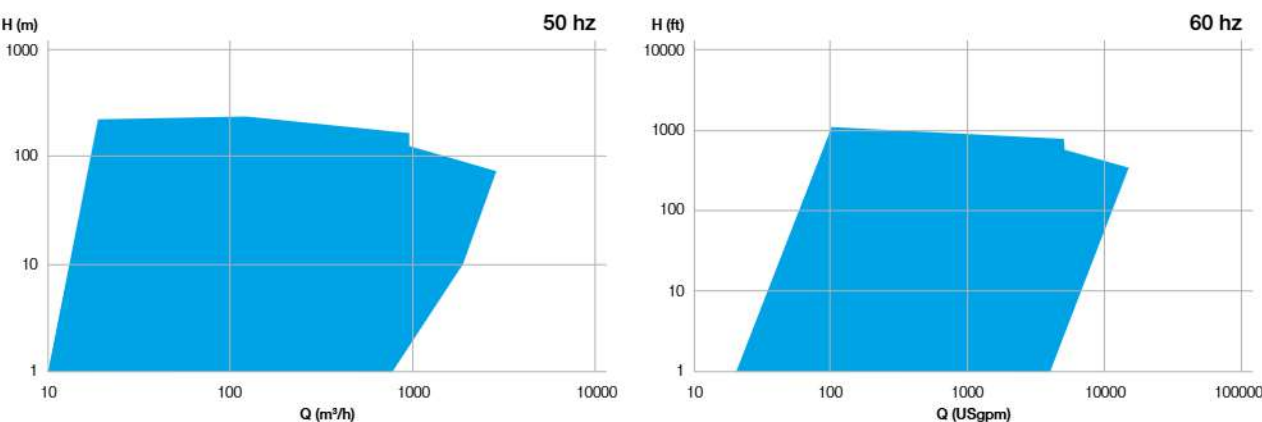
Other special materials are available on request



Operating data

	50 Hz	60 Hz
Pump sizes	25 to 400 mm	1 to 16 in.
Capacities	up to 2'250 m³/h	up to 10'000 USgpm
Heads	up to 370 m	up to 1'200 ft.
Pressures	up to 75 bar	up to 1'100 psi
Temperatures	-75 to 425°C	-100 to 800°F

Performance range



Specifications OHHL

Material options

API 610 material codes:
S-4, S-5, S-6, S-8, S-9, C-6, A-8, D-1, D-2, 317L

Common alloys available:
625, 825, 254, 20, hastelloy C276, titanium Gr.3 & Gr.12

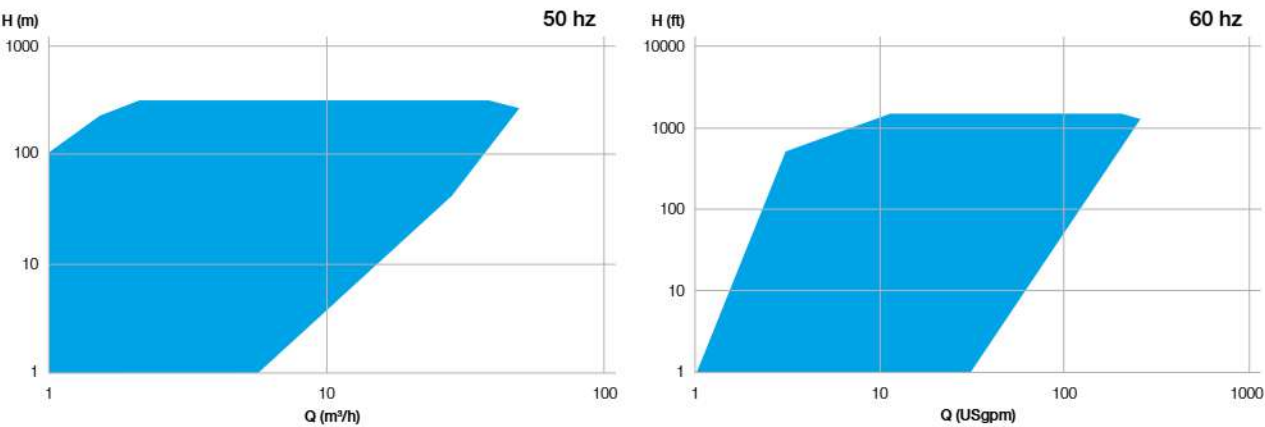
Other special materials are available on request



Operating data

	50 Hz	60 Hz
Pump sizes	25 to 50 mm	1 to 2 in.
Capacities	1 to 60 m³/h	4 to 260 USgpm
Heads	up to 450 m	up to 1'500 ft.
Pressures	up to 51 bar	up to 740 psi
Temperatures	-75 to 425°C	-100 to 800°F

Performance range



The Sulzer Flow division keeps your processes flowing. Wherever fluids are treated, pumped, or mixed, we deliver highly innovative and reliable solutions for the most demanding applications.

The Flow division specializes in pumping solutions specifically engineered for the processes of our customers. We provide pumps, agitators, compressors, grinders, screens and filters developed through intensive research and development in fluid dynamics and advanced materials. We are a market leader in pumping solutions for water, oil and gas, power, chemicals and most industrial segments.

E00697 en 11.2024, Copyright © Sulzer Ltd 2024

This brochure is a general presentation. It does not provide any warranty or guarantee of any kind. Please, contact us for a description of the warranties and guarantees offered with our products. Directions for use and safety will be given separately. All information herein is subject to change without notice.

