

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

NÍCOLAS GENESINI RAMPON

**IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUM
EXAUSTOR DE CABINE DE PINTURA**

CAXIAS DO SUL

2024

NÍCOLAS GENESINI RAMPON

**IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUM
EXAUSTOR DE CABINE DE PINTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

CAXIAS DO SUL

2024

NÍCOLAS GENESINI RAMPON

**IMPLEMENTAÇÃO DE TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA NUM
EXAUSTOR DE CABINE DE PINTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier

Aprovado em

Banca Examinadora

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Elton Fabro
Universidade de Caxias do Sul

RESUMO

Há uma premissa indispensável para todas as fábricas que almejam se manter competitivas no mercado globalizado do século XXI: evitar paradas não programadas de máquinas, principalmente das que possuem alta criticidade no processo produtivo. Este trabalho tem o objetivo de implementar técnicas de manutenção preditiva num exaustor de cabine de pintura, processo fundamental numa empresa de semirreboques. Foi implementado um sistema especializado capaz de interpretar dados automaticamente, a partir dos espectros de vibração, e prover o diagnóstico de falhas. Com isso, coletas feitas com alta periodicidade permitiram um avanço significativo em direção à manutenção preditiva. Após a instalação, ensaios e procedimentos foram realizados com a finalidade de compreender as principais causas de vibrações mecânicas no sistema. A partir dos espectros de vibração disponibilizados pelos sensores, observou-se que a desuniformidade de massa no rotor é o principal motivo de desbalanceamento no sistema e, conseqüentemente, um grande causador de vibrações mecânicas.

Palavras-chave: exaustor; pintura; vibração; manutenção preditiva

ABSTRACT

There is an indispensable premise for all factories that aim to remain competitive in the globalized market of the 21st century: avoiding unscheduled machine downtime, especially those that are highly critical in the production process. This work aims to implement predictive maintenance techniques in a paint booth exhaust, a fundamental process in a semi-trailer company. A specialized system capable of automatically interpreting data from vibration spectra and providing fault diagnosis was implemented. As a result, collections carried out at high periodicity allowed significant progress towards predictive maintenance. After installation, tests and procedures were carried out to understand the main causes of mechanical vibrations in the system. From the vibration spectra provided by the sensors, it was observed that the mass non-uniformity in the rotor is the main reason for unbalance in the system and, consequently, a major cause of mechanical vibrations.

Keywords: exhauster; painting; vibration; predictive maintenance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Histórico de manutenção preventiva no exaustor	13
Figura 2	Relação entre tempo e frequência de medições	19
Figura 3	Analogia da medicina com manutenção preditiva	21
Figura 4	Ilustração de sinais de vibração em função do tempo.....	28
Figura 5	Demonstração da Transformada Rápida de Fourier.....	29
Figura 6	Aplicação da Transformada Rápida de Fourier	29
Figura 7	Desbalanceamento Estático.....	33
Figura 8	Desbalanceamento Dinâmico.....	33
Figura 9	Desbalanceamento Conjugado	34
Figura 10	Comportamento da vibração em casos de desbalanceamento.....	34
Figura 11	Comportamento da vibração em casos de eixos empenados	35
Figura 12	Comportamento da vibração em casos de desalinhamento angular.....	36
Figura 13	Comportamento da vibração em casos de desalinhamento angular.....	37
Figura 14	Perda de ponto de fixação	38
Figura 15	Comportamento da vibração em casos de folga mecânica.....	38
Figura 16	Ilustração de massa desbalanceada no sistema	39
Figura 17	Técnica de balanceamento de equipamentos	40
Figura 18	Conjunto que compõe o sistema de exaustão da cabine de pintura	41
Figura 19	Variação da força centrífuga em função da massa desbalanceada.....	42
Figura 20	Material retirado das palhetas do rotor do exaustor	43
Figura 21	Ponto de instalação do sensor (mancal)	45
Figura 22	Ponto de instalação do sensor (motor)	45
Figura 23	Rolamento 22216 K C3 (SKF).....	46
Figura 24	Instalação de sensores de manutenção preditiva.....	47
Figura 25	Velocidades de vibração antes e depois da limpeza do rotor.....	49
Figura 26	Acelerações de vibração antes e depois da limpeza do rotor	49
Figura 27	Medição da massa 1 e inserção no rotor	51
Figura 28	Velocidades de vibração antes e depois da inserção da massa	52
Figura 29	Acelerações de vibração antes e depois da inserção da massa.....	52
Figura 30	Velocidades de vibração antes e depois da troca do rolamento	54
Figura 31	Acelerações de vibração antes e depois da troca do rolamento	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Diretrizes da ISO 2372 para determinação da severidade da vibração	30
Quadro 2	Variação das velocidades de vibração antes e depois da limpeza	50
Quadro 3	Variação das acelerações de vibração antes e depois da limpeza.....	50
Quadro 4	Variação das velocidades de vibração antes e depois da inserção da massa 1	53
Quadro 5	Variação das acelerações de vibração antes e depois da inserção da massa 1	53
Quadro 6	Variação das velocidades de vibração antes e depois da troca do rolamento.....	55
Quadro 7	Variação das acelerações de vibração antes e depois da troca do rolamento	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FFT	Fast Fourier Transform
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	SISTEMAS DE MANUTENÇÃO	15
2.1.1	Manutenção corretiva	15
2.1.2	Manutenção corretiva não planejada	16
2.1.3	Manutenção corretiva planejada	16
2.1.4	Manutenção preventiva.....	16
2.1.5	Manutenção preditiva	17
2.1.6	Manutenção proativa	19
2.1.7	Manutenção prescritiva	20
2.2	PRINCÍPIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	20
2.3	PARÂMETROS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA	21
2.3.1	Temperatura	22
2.3.2	Óleos lubrificantes	23
2.3.3	Ruídos	23
2.3.4	Pressão	23
2.3.5	Ensaio não destrutivos	23

2.3.6 Vibrações	24
2.4 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO POR ENSAIO DE VIBRAÇÕES	25
2.4.1 Sinal de vibração no domínio do tempo	27
2.4.2 Sinal de vibração no domínio da frequência	28
2.5 DIRETRIZ PARA DETERMINAR GRAU DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO	30
2.6 CORRELACIONAMENTO DE RESPOSTA VIBRATÓRIA COM DEFEITOS ESPECÍFICOS	31
2.6.1 Desbalanceamento	32
2.6.2 Desbalanceamento estático	32
2.6.3 Desbalanceamento dinâmico	33
2.6.4 Desbalanceamento conjugado	33
2.6.5 Eixos empenados	34
2.6.6 Desalinhamento angular	35
2.6.7 Desalinhamento paralelo	36
2.6.8 Folga mecânica	37
2.7 CÁLCULOS DE VIBRAÇÃO	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 CENÁRIO ATUAL	41
3.2 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO	43
3.2.1 Instalação de sensores	43
3.2.2 Pontos de instalação	44
3.2.3 Realização de ensaios	45

4	RESULTADOS	47
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES	47
4.2	ENSAIOS	47
4.2.1	Limpeza do rotor do exaustor	48
4.2.2	Inserção de massa no rotor	50
4.2.3	Troca de rolamento em mancal do sistema	53
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

Segundo a NBR-5462 (1994, p.6),

“manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Item é definido como qualquer parte, conjunto, dispositivo, subsistema, unidade funcional, equipamento ou sistema que possa ser considerado individualmente”.

A manutenção de máquinas na indústria evoluiu da manutenção corretiva para a manutenção preventiva baseada no tempo. Atualmente, as filosofias de manutenção preditiva e proativa são as mais populares.

A manutenção corretiva, caracterizada por ser de natureza reativa, existe desde os primeiros dias da tecnologia de produção, com suas raízes remontando à Revolução Industrial. Neste método, ela acontece somente quando o problema já se manifestou. Segundo Girdhar e Scheffer (2004), uma das consequências maléficas é que danos secundários são frequentemente observados juntamente com falhas primárias. Conforme a explicação dos autores, essa problemática fez com que ocorresse uma evolução para a manutenção preventiva, a qual é executada baseada em períodos específicos. Nesse caso, o equipamento é retirado de produção para revisão após completar determinado número de horas de funcionamento, mesmo que não haja indícios de falha funcional. A principal desvantagem desse sistema é que pode haver gastos com peças e serviços antes de serem realmente necessários, aumentando o custo de manutenção sem trazer benefícios reais.

Devido aos elevados custos de manutenção ao utilizar a manutenção preventiva, foi necessário o desenvolvimento de uma abordagem para programar a manutenção ou revisão do equipamento com base exclusivamente em suas condições de trabalho. Esta proposta trilhou os caminhos para o surgimento da manutenção preditiva e de suas técnicas subjacentes. Esta metodologia visa antecipar falhas antes que elas ocorram, utilizando tecnologias de monitoramento e análise de dados para avaliar continuamente a condição dos equipamentos.

De acordo com Girdhar e Scheffer (2004), atualmente, a manutenção preditiva atingiu um nível sofisticado na indústria. Até o início da década de 1980, planilhas de justificativa eram utilizadas para obter aprovações para programas de manutenção baseados em condições.

Felizmente, este não é mais o caso. As vantagens da manutenção preditiva são atualmente aceitas na indústria, porque os benefícios tangíveis em termos de avisos precoces sobre problemas mecânicos e estruturais nas máquinas são claros. O método é agora visto como uma ferramenta essencial de detecção e diagnóstico que tem um certo impacto na redução de custos de manutenção, tempo de inatividade operacional e retenção de estoque. Os autores esclarecem que esta evolução na filosofia de manutenção trouxe maior vida útil aos equipamentos, maiores níveis de segurança, melhor qualidade do produto, menores custos do ciclo de vida e redução de emergências por falhas mecânicas críticas, porém imprevisas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os requisitos atuais para maior confiabilidade de equipamentos são mais críticos do que nunca. Usando a análise de vibração, a condição de uma máquina pode ser monitorada constantemente. Análises detalhadas podem ser feitas para determinar o estado de uma máquina e identificar quaisquer falhas que possam estar surgindo ou que já existam. Alguns dos defeitos que podem ser captados utilizando análise de vibração incluem desbalanceamento e desalinhamento, além de defeitos nos rolamentos ou nas engrenagens.

Diante desta perspectiva, inúmeros são os benefícios que surgem a partir da implementação da manutenção preditiva em equipamentos. Um estudo realizado pela Plant Performance Group, uma divisão da Technology for Energy Corporation, quantificou o impacto da inclusão de técnicas preditivas em diferentes indústrias nos Estados Unidos, Canadá, Grã-Bretanha, França e Austrália. Como resultado, comprovaram-se ganhos como:

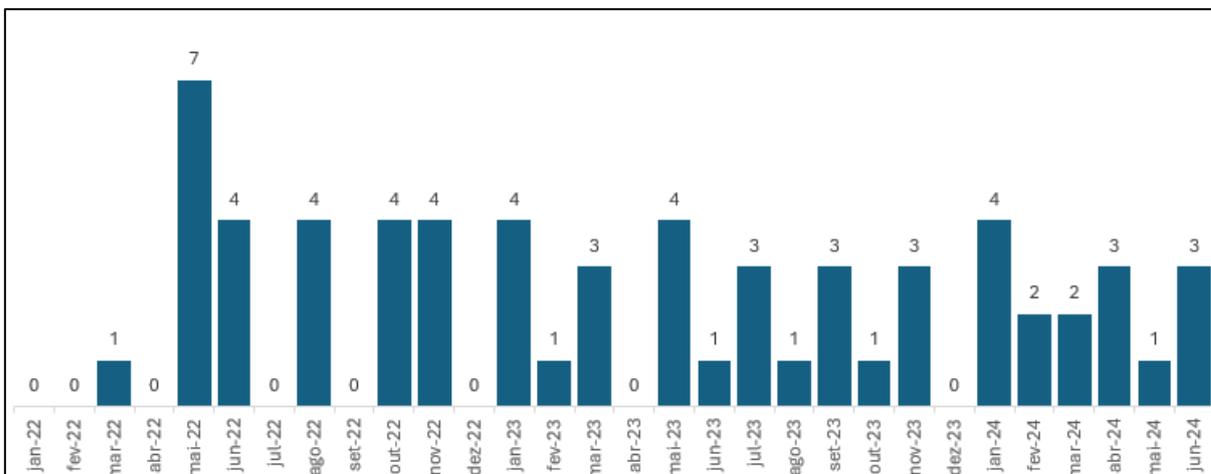
- (a) 50% a 80% de redução nos custos de manutenção;
- (b) 50% a 60% de redução de falhas nas máquinas;
- (c) 20% a 30% de redução de estoque de peças sobressalentes;
- (d) 20% a 50% de redução de horas extras para manutenção;
- (e) 50% a 80% de redução do tempo de parada das máquinas;
- (f) 20% a 40% de aumento no tempo de vida das máquinas;
- (g) 20% a 30% de aumento na produtividade e
- (h) 25% a 60% de aumento nos lucros.

Neste trabalho, o foco está orientado para a transformação das práticas de manutenção num equipamento que integra um dos processos mais importantes na fabricação de semirreboques: a pintura líquida da caixa de carga. Neste processo, o bom funcionamento do

exaustor é fundamental para que a operação possa continuar e, conseqüentemente, não gerar prejuízos devido a perdas de produção. Além disso, por este processo ser restritivo, é inquestionável a atenção redobrada nos cuidados de manutenção que este equipamento deve receber. A melhor maneira de se obter resultados satisfatórios neste controle é a partir da migração de técnicas de manutenção preventivas e proativas para a manutenção preditiva. A partir dela, o acompanhamento das máquinas torna-se em tempo real, propiciando um maior domínio da situação aos técnicos responsáveis.

No cenário atual, as necessidades de intervenções no exaustor, apesar de serem programadas a partir de um cronograma de manutenção preventiva, variam diretamente em função da demanda de produção de segmentos como basculantes e tanques, os quais possuem a cabine de pintura líquida como parte do roteiro fabril. Ou seja, conforme a demanda do mercado destas famílias de produtos varia, há menor estabilidade nos processos produtivos e, conseqüentemente, a taxa com que são feitas intervenções no exaustor deveria acompanhar estas tendências para tornar as técnicas de manutenção mais eficientes. Entretanto, esta não é a realidade. Comumente, as paradas são sugeridas a partir dos sentimentos dos técnicos que, por muitas vezes possuírem vasta experiência, conseguem decifrar os sinais da máquina e identificar a necessidade de intervenção. A Figura 1 demonstra o histórico de intervenções realizadas no exaustor entre janeiro de 2022 e junho de 2024.

Figura 1 – Histórico de manutenção preventiva no exaustor



Fonte: O Autor (2024)

Diante destes fatos, para tornar uma empresa mais competitiva, cada área deve buscar inovações e melhorias em seus respectivos processos. Enquanto manutenção, é crucial a expansão do uso das técnicas de manutenção preditiva em busca de uma maior precisão nas

ações que são tomadas diariamente. Por isso, este trabalho tem como alicerce a busca por melhoria contínua nas estratégias de manutenção em um dos processos mais importantes da empresa onde está sendo realizado o estudo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Implementar técnicas de manutenção preditiva no exaustor da cabine de pintura.

1.2.2 Objetivos específicos

a) Estudar comportamento do rotor e os motivos que o levam a apresentar desbalanceamento;

b) Instalar sensores de manutenção preditiva em pontos estratégicos, de forma a identificar de forma prévia as anomalias do sistema.

c) Realizar ensaios para validar a instalação dos sensores e para mensurar o impacto de como algumas variáveis interferem no desbalanceamento do rotor e, conseqüentemente, no aumento das vibrações mecânicas.

d) Mensurar os ganhos após implementação da manutenção preditiva.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE MANUTENÇÃO

Segundo Gomes e Boroni (1990), existe três formas de se fazer a manutenção em equipamentos: deixar quebrar para consertar; fazer revisões e trocas após tempo predeterminado; ou fazer medições com instrumentos apropriados, a fim de descobrir qual o momento exato em que será necessário um reparo. Além desses métodos, há também a manutenção proativa, a qual consiste não apenas na atuação sobre a falha apresentada pelo sistema, mas principalmente em estudos da causa raiz do problema para que se possa prevenir o maior número de anomalias possíveis.

2.1.1 Manutenção corretiva

“A manutenção corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.” (NBR-5462, 1994, p.7). Esta metodologia “representou o princípio, em que os mecânicos simplesmente consertavam o que estava quebrado, não se preocupando com as causas ou efeitos que ocasionaram o defeito.” (SANTOS, 2007, p.13)

Tem-se a ideia de que tal tipo de manutenção é menos onerosa. Entretanto, de acordo com Antonioli (1999), as perdas de produção originadas pela falha, a elevada probabilidade de rupturas e avarias secundárias decorrentes, o tempo excessivo demandado para sanar problemas que inevitavelmente ocorrem nos momentos menos adequados, contribuem apreciavelmente para aumentar os custos. Sabendo-se disso, a manutenção corretiva é mais apropriada para equipamentos em série, quando existem em estoque as peças de reposição, ou em instalações de baixo custo.

Logo, Girdhar e Scheffer (2004) confirmam que esta abordagem funciona bem se as paradas de equipamento não afetarem a produção e se os custos de mão de obra e de materiais não serem de grande relevância. A desvantagem é que o departamento de manutenção opera perpetuamente num modo de “gestão de crises”. Além disso, a manutenção corretiva pode exigir um grande estoque de peças, especialmente em ambientes onde os equipamentos são essenciais para a operação contínua e onde a parada de máquinas pode causar grandes prejuízos. Apesar dos muitos avanços técnicos da era moderna, algumas fábricas, especialmente em

indústrias mais antigas ou aquelas com orçamento limitado, podem operar predominantemente com este tipo de manutenção.

2.1.2 Manutenção corretiva não planejada

Segundo Rodrigues (2009), a manutenção corretiva não planejada é a forma mais reativa que a manutenção pode ter. Uma planta industrial usando este modelo de gerência em sua manutenção corretiva não gasta qualquer valor com manutenção, até que uma máquina ou sistema pare de operar. Essa metodologia consiste na elevação do custo final, pois quando ocorre uma falha inesperada, além dos danos com o próprio equipamento que falhou, ainda é necessário avaliar os danos causados em outras partes da máquina, que possivelmente foram afetadas. Dessa forma, Kardec e Nascif (2009) afirmam que, normalmente, a manutenção corretiva não planejada implica altos custos, pois a quebra inesperada pode acarretar perdas na produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção.

2.1.3 Manutenção corretiva planejada

Segundo Rodrigues (2009), a manutenção corretiva planejada é realizada quando o equipamento apresentou um defeito que foi identificado pelas práticas de preventivas ou preditivas. Em outras palavras, esta técnica possui custos significativamente inferiores se comparada com a técnica não planejada, justamente em decorrência do planejamento. Kardec e Nascif (2009) descrevem que um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido, mais seguro e de melhor qualidade do que um trabalho não planejado.

2.1.4 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é “a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.” (NBR-5462, 1994, p.7). Segundo Gomes e Baroni (1990), a manutenção preventiva surgiu em meados do século XX, como solução para aumentar a produção, impedindo que ocorressem falhas em momentos de maior necessidade da máquina. Este conceito baseia-se no fato de que a vida útil dos componentes pode ser estimada a partir de registros prolongados de ocorrências na própria máquina ou em sistemas semelhantes.

De acordo com Antonioli (1999), essa definição contempla os três objetivos da manutenção preventiva: prevenir a deterioração e falha do equipamento, detectar falhas incipientes e descobrir falhas ocultas em condições de espera antes que ocorra a necessidade de

entrar em operação. A manutenção preventiva se baseia em tempo médio de falha (vida útil) muitas vezes fornecidos pelo fabricante do componente. Girdhar e Scheffer (2004) comentam que esta é uma boa abordagem para equipamentos que não funcionam continuamente e quando há profissionais capacitados para realizar os trabalhos de manutenção preventiva. A principal desvantagem é que esta metodologia pode resultar na execução de tarefas de manutenção muito cedo ou muito tarde. Isso pode resultar em custos recorrentes, que, a longo prazo, podem ser mais altos do que a manutenção corretiva, especialmente em sistemas que não apresentam falhas com frequência. Portanto, é bem possível que ocorra redução da produção devido a manutenção desnecessária. Em muitos casos, existe também a possibilidade de queda de produtividade devido a métodos de reparo incorretos. Quando os reparos preventivos não são feitos corretamente, seja por falta de qualificação ou por falta de informações precisas sobre o estado do equipamento, podem ocorrer falhas subsequentes.

“Evidentemente, ao longo da vida útil do equipamento, não pode ser descartada a falha entre duas intervenções preventivas, o que, obviamente, implicará uma ação corretiva.” (KARDEC E NASCIF, 2009, p.43). Apesar disso, os autores afirmam que, em comparação com a manutenção corretiva, as técnicas de manutenção preventiva oferecem um número notavelmente maior de benefícios, tanto para os equipamentos, quanto para a produção e para a equipe de manutenção.

2.1.5 Manutenção preditiva

A proposta da manutenção preditiva é fazer o monitoramento regular das condições mecânicas, eletroeletrônicos, eletropneumáticas, eletro hidráulicas e elétricas dos equipamentos e instalações e monitora o rendimento operativo de equipamentos e instalações quanto a seus processos.

Como resultado desse monitoramento, temos a maximização dos intervalos entre reparos por quebras (manutenção corretiva) e reparos programados (manutenção preventiva), bem como maximização de rendimento no processo produtivo, visto que, estaremos com equipamentos e instalações disponíveis o maior tempo possível para operação.

Segundo a NBR-5462 (1994, p.7),

“a manutenção preditiva é o tipo de manutenção que garante uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de medições e análise, utilizando-se de meios de supervisão ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Segundo Yacubsohn (1983), a manutenção preditiva consiste no controle das condições de funcionamento de máquinas em serviço, com a finalidade de prever falhas e detectar as anomalias no sistema. Esta característica possibilita com que os serviços de manutenção possam ser programados com antecedência, diminuindo os riscos de quebras ou estragos maiores. De acordo com Weber et al. (2009), a manutenção preditiva possui os seguintes objetivos:

- (a) Determinar antecipadamente quando será necessário realizar serviços de manutenção numa peça específica de um equipamento;
- (b) Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- (c) Aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- (d) Minimizar trabalhos de emergência ou não planejados;
- (e) Impedir a propagação dos danos;
- (f) Aproveitamento da vida útil total dos componentes ou linha de produção;
- (g) Aumentar a confiabilidade de um equipamento ou linha de produção e
- (h) Determinar previamente uma interrupção de fabricação e quais os equipamentos que precisam de manutenção.

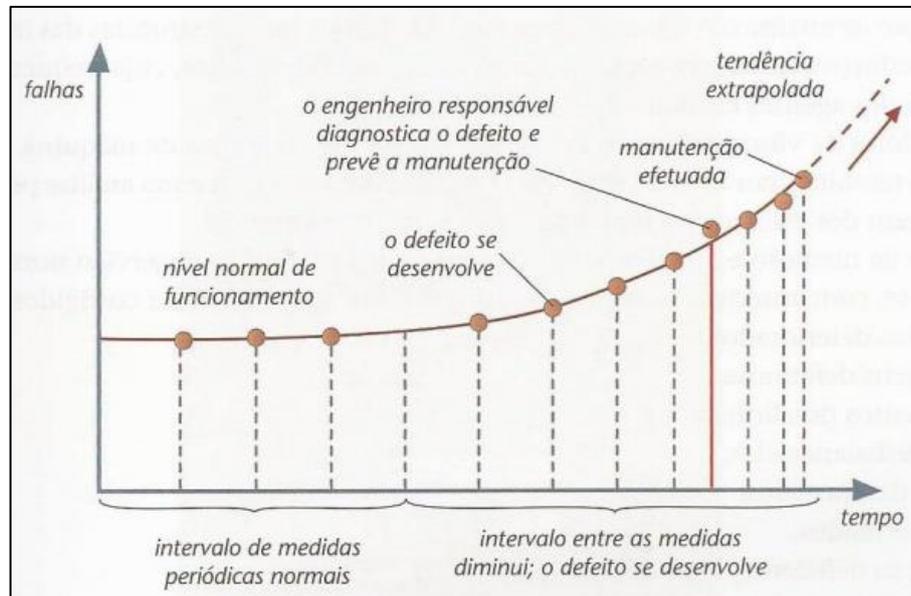
Quanto mais rápida for a ação tomada a partir da detecção de mudança nos parâmetros observados na máquina, maiores serão as chances de o serviço de manutenção ser finalizado com êxito.

Nepomuceno (1989) defende que a manutenção preditiva consiste na coleta de dados e posteriormente comparação destes dados em função do tempo de funcionamento. A partir disso, torna-se necessário a identificação de variações de forma a intervir no momento certo. Rodrigues (2009) destaca que uma grande vantagem da manutenção preditiva é a sua característica de não necessitar com que o equipamento submetido ao serviço de manutenção seja paralisado. Ao contrário, esta metodologia só se faz útil a partir do momento em que os sistemas estejam em pleno funcionamento.

“A manutenção preditiva, após a análise dos fenômenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências.” (WEBER ET AL., 2009). Weber et al. (2009) afirmam que, na parte de diagnóstico, ter clareza da origem e da gravidade do defeito é fundamental para que se possa programar o reparo do equipamento. Já a etapa da análise da tendência da falha consiste no monitoramento contínuo das condições do sistema, viabilizando uma previsão assertiva de quanto poderá ocorrer algum

defeito. A Figura 2 demonstra que conforme o passar do tempo, os defeitos se desenvolvem e, com isso, naturalmente a frequência das medições dos parâmetros observados deve aumentar com o intuito de controlar os defeitos e minimizar as falhas.

Figura 2 - Relação entre tempo e frequência de medições



Fonte: Weber et al. (2009)

Girdhar e Scheffer (2004) concluem que uma das vantagens da abordagem preditiva é que os eventos de manutenção podem ser agendados de forma ordenada. Isso permite algum tempo de compra de peças para os reparos necessários, reduzindo assim a necessidade de um grande estoque de peças sobressalentes.

Os autores ainda afirmam que uma possível desvantagem é que os trabalhos de manutenção podem aumentar devido a uma avaliação incorreta da deterioração das máquinas. Para combater as tendências prejudiciais ao funcionamento em termos de vibração, temperatura ou lubrificação, é necessário que a organização adquira equipamentos especializados para monitorar esses parâmetros e forneça treinamento ao pessoal ou contrate pessoal qualificado.

2.1.6 Manutenção proativa

A manutenção proativa é uma filosofia que dá ênfase ao rastreamento de todas as falhas até sua causa raiz. Cada falha é analisada e medidas proativas são tomadas para garantir que não se repitam. Nesse cenário, ela utiliza todas as técnicas de manutenção preditiva e preventiva discutidas nas seções anteriores em conjunto com a análise de causa raiz de falhas.

Esta metodologia detecta e identifica os problemas que causam defeitos. Ela garante que técnicas apropriadas de instalação e reparo sejam adotadas e implementadas. Além disso, pode-se também destacar a necessidade de redesenho ou modificação de equipamentos para evitar a recorrência de tais problemas. Esforços adicionais são feitos para investigar minuciosamente a causa da falha e determinar formas de melhorar a confiabilidade da máquina.

Girdhar e Scheffer (2004) salientam que a desvantagem é que são necessários funcionários extremamente conhecedores em práticas de manutenção preventiva, preditiva e proativa. Além disso, é possível que o trabalho exija a terceirização para técnicos experientes que terão de trabalhar em estreita colaboração com o pessoal de manutenção na fase de análise da causa raiz. A manutenção proativa também requer a aquisição de equipamentos especializados e pessoas devidamente treinadas para executar todas essas tarefas.

2.1.7 Manutenção prescritiva

A manutenção prescritiva é uma abordagem avançada de manutenção que utiliza dados em tempo real e análise preditiva para sugerir o momento ideal para a intervenção, com base nas condições reais dos ativos. Diferente da manutenção preventiva, que segue um calendário fixo, e da manutenção corretiva, que ocorre após a falha, a manutenção prescritiva foca em evitar falhas antes que elas ocorram, recomendando ações específicas de manutenção com base em dados coletados, como temperatura, vibração, e outros indicadores operacionais.

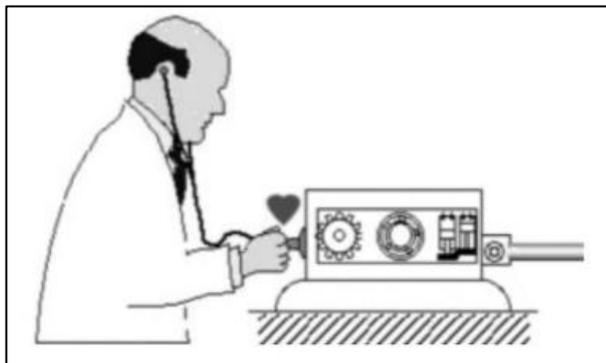
Recentemente, a aplicação da manutenção prescritiva tem mostrado resultados significativos em setores como o de manufatura e energia. Além disso, Kogut (2022) destaca que esta abordagem mais proativa exerce papel fundamental na resolução de problemas complexos, como a identificação de modos de falha múltiplos ou a detecção de deterioração gradual e quase imperceptível dos ativos ao longo do tempo. A manutenção prescritiva, ao integrar dados históricos e operacionais, representa uma evolução significativa na gestão de ativos, sendo crucial para manter a eficiência operacional em patamares elevados, assim como para garantir a sustentabilidade dos processos industriais.

2.2 PRINCÍPIOS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

As técnicas de manutenção preditiva, na verdade, têm uma analogia muito próxima com as técnicas de diagnóstico médico. Sempre que um corpo humano tem um problema, ele apresenta um sintoma. O sistema nervoso fornece a informação – esta é a fase de detecção.

Além disso, se necessário, são feitos exames patológicos para diagnosticar o problema. Nesta base, recomenda-se um tratamento adequado. A Figura 3 simboliza esta semelhança entre os cuidados médicos com os cuidados empregados nas máquinas.

Figura 3 – Analogia da medicina com manutenção preditiva



Fonte: Girdhar e Scheffer (2004)

Girdhar e Scheffer (2004) exemplificam que, de forma semelhante, defeitos que ocorrem em uma máquina sempre apresentam um sintoma na forma de vibração ou algum outro parâmetro. No entanto, isto pode ou não ser facilmente detectado em sistemas de máquinas com percepções humanas.

É aqui que as técnicas de manutenção preditiva vêm em socorro. Essas técnicas detectam sintomas dos defeitos que ocorrem nas máquinas e auxiliam no diagnóstico das anomalias exatas que ocorreram. Em muitos casos, também é possível estimar a gravidade dos defeitos.

Os autores esclarecem que as técnicas específicas utilizadas dependem do tipo de equipamento da planta, do seu impacto na produção ou de outros parâmetros-chave da operação da planta.

2.3 PARÂMETROS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

Girdhar e Scheffer (2004) detalham inúmeras técnicas da manutenção preditiva, incluindo:

(a) Monitoramento de vibração: Sem dúvida a técnica mais eficaz para detectar defeitos mecânicos em máquinas rotativas.

(b) Emissão acústica: Pode ser usada para detectar, localizar e continuamente monitorar rachaduras em estruturas e tubulações.

(c) Análise de óleo: O óleo lubrificante é analisado e a ocorrência de certas partículas microscópicas nele contidas podem estar relacionadas à condição de rolamentos e engrenagens.

(d) Análise de partículas: Componentes de máquinas desgastados, seja em máquinas, caixas de engrenagens ou sistemas hidráulicos, liberam detritos. A coleta e análise desses detritos fornecem informações vitais sobre a deterioração desses componentes.

(e) Monitoramento de corrosão: Medições de espessura ultrassônicas são realizadas em tubulações, estruturas offshore e equipamentos de processo para acompanhar a ocorrência de desgaste corrosivo.

(f) Termografia: A termografia é usada para analisar equipamentos elétricos e mecânicos ativos. O método pode detectar defeitos térmicos ou mecânicos em geradores, linhas aéreas, caldeiras, acoplamentos desalinhados e muitos outros defeitos. Ele também pode detectar danos celulares em estruturas de fibra de carbono em aeronaves.

(g) Monitoramento de desempenho: Esta é uma técnica muito eficaz para determinar os problemas operacionais em equipamentos. A eficiência das máquinas fornece uma boa visão sobre suas condições internas.

2.3.1 Temperatura

De acordo com Antonioli (1999), os melhores resultados ocorrem quando há monitoramento contínuo a partir de dispositivos que captam o sobre aquecimento e automaticamente interrompem a operação da máquina ou sistema. Desta forma, esta técnica permite a detecção imediata dos “pontos quentes”, exatamente nos locais onde há maior probabilidade de surgimento de perturbações internas, nem sempre perceptíveis externamente, exceto pela elevação da temperatura.

A análise da temperatura é utilizada em equipamentos ou estruturas complexas (petroquímica, siderurgia etc.). Geralmente, uma irregularidade ou avaria é detectada a partir do aumento da temperatura de um ponto em relação à temperatura referência estabelecida para este mesmo ponto.

2.3.2 Óleos lubrificantes

Segundo Heidrich (1996), esta análise tem seu princípio a partir da retirada de óleo de um ponto de coleta apropriado. A partir disso, geralmente é utilizado um microscópio ótico para examinar este volume de óleo, filtrado através de uma membrana. As partículas são manualmente contadas e comparadas com uma lâmina de microscópio padrão.

Além da contagem de partículas, outras técnicas podem ser empregadas para a análise da condição do óleo: variação da indução do metal, variação da força do campo magnético, ferrografia etc. Para Nepomuceno (1989), o maior desafio envolvido no controle do óleo consiste na análise da viscosidade e umidade do lubrificante.

2.3.3 Ruídos

Antoniolli (1999) explica que o monitoramento de ruídos é o acompanhamento dos sons emitidos por uma vibração mecânica no ar e que estão dentro da faixa de frequência auditiva. Segundo Heidrich (1996), a comparação do ruído produzido por uma máquina ao longo do tempo é análoga a comparação de vários espectros de frequência. Contudo, necessita-se de um operador experiente para se mostrar útil.

2.3.4 Pressão

O controle da pressão de um fluido num equipamento, em qualquer ponto, é um dos parâmetros fundamentais para garantir um bom funcionamento do sistema. Antoniolli (1999) salienta que é importante um monitoramento adequado dos circuitos de lubrificação e/ou refrigeração, com dispositivos que identifiquem eventuais quedas ou aumentos da pressão.

2.3.5 Ensaios não destrutivos

Os ensaios ultrassônicos, radiográficos, partículas magnéticas, correntes parasitas e líquidos penetrantes, usados individualmente ou combinados, combinam técnicas utilizadas para a detecção e caracterização de discontinuidades. Os ensaios são usados para garantir que não haja anomalias presentes em peças críticas para a operação. Ou seja, eles avaliam partes de estruturas com a finalidade de evitar paradas inesperadas, principalmente em equipamentos vitais, além de preservar patrimônio e vidas humanas. Segundo Antoniolli (1999), as inspeções periódicas são as responsáveis por detectar irregularidades nas máquinas, as quais são

originadas majoritariamente pelo tempo de serviço do sistema. Neste cenário, estão inclusas condições como fissuras, corrosão, desgaste, empenos, trincas de fadiga e outros.

2.3.6 Vibrações

Antoniolli (1999) comenta que o monitoramento das vibrações é uma das técnicas mais utilizadas para verificar as condições reais dos equipamentos, sendo que este monitoramento pode acontecer a partir da medição do nível global de vibrações, análise espectral, cepstrum, curtose, fator de crista, envelope e outras. Segundo Lenzi (1991), a análise das vibrações é o melhor parâmetro para avaliar as condições dinâmicas, como balanceamento, estabilidade nos mancais, tensões dinâmicas existentes em componentes, e falhas incipientes em rolamentos e engrenagens, além de identificar desalinhamentos entre eixos e tolerância limite de funcionamento. Segundo Matos (1980), o programa de manutenção preditiva, com base no controle de vibração, parte do princípio de que toda máquina vibra e que quanto maior é o defeito existente tanto maior será a vibração.

Girdhar (2004) afirma que uma grande vantagem é que a análise de vibração pode identificar problemas em desenvolvimento antes que se tornem muito sérios e causem paralisações não programadas. Isto pode ser obtido através da realização de monitoramento regular das vibrações da máquina, de forma contínua ou em intervalos programados. Além disso, no monitoramento pelas técnicas de vibração, as vibrações das máquinas podem ser medidas externamente, sem abrir ou parar as máquinas.

Todas as máquinas estão sujeitas a imperfeições como folgas, desalinhamentos, desbalanceamentos etc., que vão gerar vibrações/ruídos. As vibrações são causadas por movimentos irregulares das partes móveis da máquina e, em muitos casos, podem ser um reflexo de desgaste ou defeitos nos componentes, como rolamentos ou engrenagens.

A tendência dos níveis de vibração pode identificar práticas inadequadas de manutenção, como instalação e substituição inadequada de rolamentos, alinhamento impreciso do eixo ou balanceamento impreciso do rotor. Além disso, também poderá ser possível identificar práticas de produção inadequadas, como o uso de equipamentos além das especificações de projeto (temperaturas, velocidades ou cargas mais altas).

Todas as máquinas rotativas produzem vibrações que são função da dinâmica da máquina, como o alinhamento e equilíbrio das peças rotativas. Girdhar e Scheffer (2004)

mencionam que medir a amplitude da vibração em determinadas frequências pode fornecer informações valiosas sobre a precisão do alinhamento e equilíbrio do eixo, a condição dos rolamentos ou engrenagens e o efeito na máquina devido à ressonância das carcaças, tubulações e outras estruturas. Como quase 80% dos problemas comuns em equipamentos rotativos estão relacionados ao desalinhamento e desequilíbrio, a análise de vibração é uma ferramenta importante que pode ser usada para reduzir ou eliminar problemas recorrentes nas máquinas.

A análise de vibração é amplamente utilizada em equipamentos rotativos, como motores, bombas, ventiladores, compressores e geradores. Um sistema de análise de vibração geralmente consiste em quatro partes básicas:

- (a) Captadores de sinal, também chamados de transdutor;
- (b) Um analisador de sinal;
- (c) Software de análise e
- (d) Um computador para análise e armazenamento de dados.

2.4 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO POR ENSAIO DE VIBRAÇÕES

Para Gerges e Nunes (1996), a medição das vibrações em superfícies de máquinas rotativas permite detectar e diagnosticar falhas destas máquinas. As vibrações são interpretadas a partir da relação de tempo e amplitude, informações que irão possibilitar uma análise das condições reais do equipamento.

O nível geral de vibração de uma máquina é uma medida da amplitude total de vibração em uma ampla faixa de frequências e pode ser expresso em aceleração, velocidade ou deslocamento. Em termos de funcionamento da máquina, a amplitude de vibração é o primeiro indicador que indica quão boa ou má pode ser a condição da máquina. Geralmente, maiores amplitudes de vibração correspondem a níveis mais elevados de defeitos de máquinas.

A relação entre aceleração, velocidade e deslocamento em relação à amplitude de vibração e à condição das máquinas redefine as técnicas de medição e análise de dados que devem ser utilizadas. O movimento abaixo de 10 Hz produz muito pouca vibração em termos de aceleração, vibração moderada em termos de velocidade e vibrações relativamente grandes em termos de deslocamento. Portanto, o deslocamento é usado nesta faixa. Na faixa de alta

frequência, os valores de aceleração produzem valores mais significativos que a velocidade ou o deslocamento. Portanto, para frequências acima de 1.000 Hz ou 1.500 Hz, a unidade de medição preferida para vibração é a aceleração.

É geralmente aceito que entre 10 Hz e 1.000 Hz, a velocidade dá uma boa indicação da gravidade da vibração, e acima de 1.000 Hz, a aceleração é o único bom indicador. Como a maioria das máquinas rotativas em geral (e seus defeitos) operam na faixa de 10 a 1000 Hz, a velocidade é comumente usada para medição e análise de vibração.

Segundo Nepomuceno (1989), os pontos de aplicação dos dispositivos de medida e análise das vibrações constitui uma etapa essencial para o sucesso do trabalho destinado para o monitoramento de vibrações em máquinas. Normalmente, os mancais constituem a localização chave para medida e análise de vibrações, pois é exatamente nestas regiões que se localizam as cargas dinâmicas e forças maiores existentes no equipamento. Klemptow (1998) afirma que os mancais de rolamento são elementos mecânicos que originam a maioria das paradas das máquinas rotativas; diante disso, uma das premissas básicas nos programas de manutenção preditiva é de detectar de forma prévia as falhas desta família de componente. Nepomuceno (1989) detalha que o estudo de vibrações possibilita identificar tanto a gravidade da falha como também o que a originou, a partir da análise conjunta da amplitude, frequência e fase.

- (a) Amplitude: indica o quanto de gravidade uma anomalia apresenta;
- (b) Frequência: indica qual componente ou qual a região do equipamento que está originando a frequência detectada;
- (c) Fase: associada à amplitude e a frequência, permite determinar o como a anomalia se originou. Defeitos que geram vibrações incluem desbalanceamentos, desalinhamentos, defeitos em engrenagens, defeitos em rolamentos, empenamentos de eixos e peças frouxas.

O autor complementa que a identificação dos defeitos presentes no equipamento se torna possível a partir do fato de que cada um deles gera, durante a rotação, forças que vão provocar choques nos mancais, transmitindo-se para todo o equipamento em forma de vibração. Estas forças originam um movimento vibratório com características determinadas pela maneira de como estas forças são geradas. Logo, torna-se possível uma análise de causa e efeito para cada caso particular.

Além disso, Nepomuceno (1989) ressalta a importância da coleta de dados e valores numéricos dos índices de vibração para o equipamento novo ou em boas condições. Somente a partir da comparação do comportamento atual das vibrações com os valores adotados como padrão é que se torna plausível o acompanhamento e a identificação de falhas no sistema.

A análise pode ser feita a partir da demonstração do sinal da vibração em função do tempo ou em função da frequência.

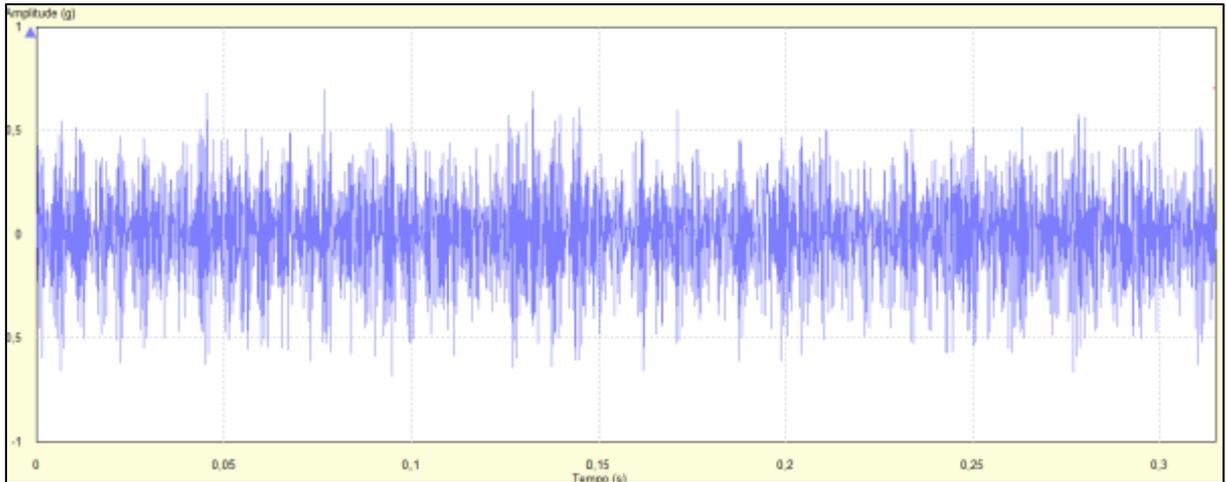
2.4.1 Sinal de vibração no domínio do tempo

Segundo o Instituto de Vibração MTA, 2013, o sinal de vibração no domínio do tempo é a maneira mais simples de avaliação. O resultado retornará valores globais medidos em uma ampla faixa de frequência. O nível de vibração global de um componente ou máquina quando comparado com os valores de referência pode indicar a existência de irregularidades caso haja uma variação perceptível entre estes valores.

O equipamento utilizado para o monitoramento possibilita a alternativa de seleção do intervalo de frequência do qual é retirado o valor global da vibração. Alguns equipamentos coletores de dados permitem ao usuário selecionar o intervalo de frequência, enquanto outros já possuem este intervalo previamente determinado. Por este motivo, quando os dados forem utilizados para comparação, é importante que eles tenham sido obtidos no mesmo intervalo de frequência.

Sinais de vibração reais de máquinas no domínio do tempo, por possuírem vários componentes em seu arranjo, são caracterizados por serem de difícil interpretação e consequentemente pouco útil para a determinação da causa raiz de uma possível anomalia no equipamento, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Ilustração de sinais de vibração em função do tempo



Fonte: de Lima, 2019

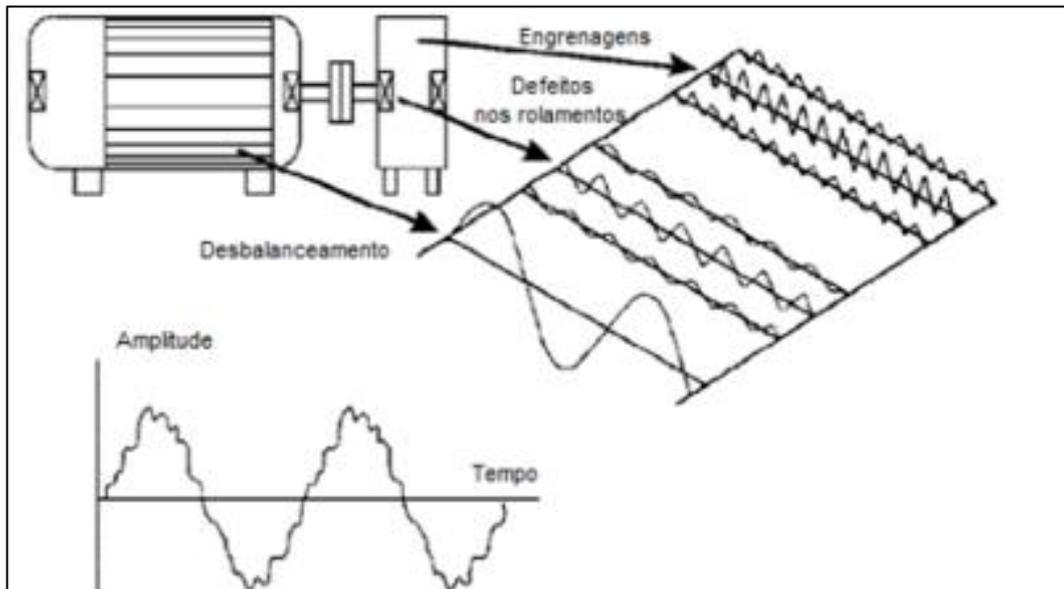
De acordo com Bezerra (2004), a análise da vibração no domínio do tempo é somente capaz de auxiliar na detecção de falhas. Contudo, não é a técnica apropriada para identificar onde a falha ocorreu e a sua causa raiz. Diante desta perspectiva, é necessária a análise dos sinais de vibração em função da frequência.

2.4.2 Sinal de vibração no domínio da frequência

Qualquer sinal em função do tempo pode ser caracterizado em função de seus componentes de frequências. Matematicamente, esta transposição do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência torna-se possível a partir da Transformada Rápida de Fourier.

Conforme Girdhar e Scheffer (2004), o domínio da frequência é o domínio onde as amplitudes são mostradas como séries de ondas senoidais e cosseno. Essas ondas têm uma magnitude e uma fase, as quais variam com a frequência. Em termos não matemáticos, isto significa que o sinal é “quebrado” em amplitudes específicas em vários componentes de frequência, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Demonstração da Transformada Rápida de Fourier

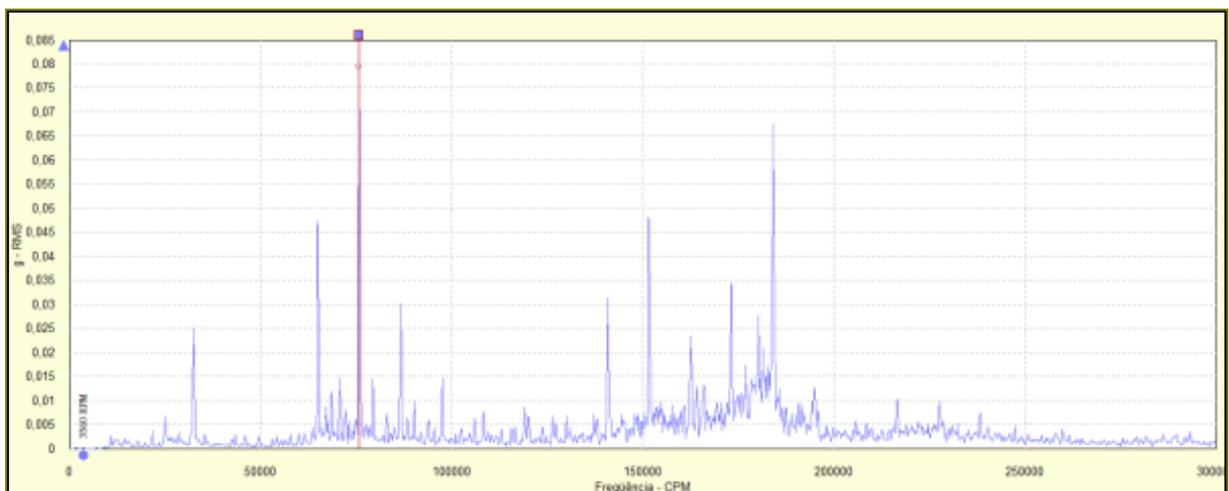


Fonte: de Lima, 2019

A partir da disponibilidade de informações referente às amplitudes para cada frequência, torna-se possível identificar as causas das irregularidades que possam vir a surgir no equipamento. Por isso, a análise do espectro de vibração é uma ferramenta tão influente: se existe um problema na máquina, ele irá fornecer informações para ajudar a determinar a localização desta anomalia e até estipular quando ela pode tornar-se crítica.

A Figura 6, a seguir, mostra o sinal da Figura 4 no domínio da frequência, ou seja, após a aplicação da Transformada Rápida de Fourier.

Figura 6 - Aplicação da Transformada Rápida de Fourier



Fonte: de Lima, 2019

2.5 DIRETRIZ PARA DETERMINAR GRAU DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO

Um dilema comum para analistas de vibração é determinar se as vibrações são aceitáveis para permitir a continuidade de operação da máquina de maneira segura. O objetivo não é determinar quanta vibração uma máquina suportará antes de falhar, mas sim obter uma tendência nas características de vibração que possa alertar sobre problemas iminentes, para que se possa reagir antes que ocorra uma falha.

Segundo Girdhar e Scheffer (2004), a norma mais utilizada como indicador de severidade de vibração é a ISO 2372 (BS 4675). Assim, para utilizar esta norma ISO, é necessário primeiro classificar a máquina de interesse. A partir do Quadro 1, podemos correlacionar a gravidade da condição da máquina com a vibração. Esta norma utiliza o parâmetro *velocidade* para indicar a severidade. É importante ressaltar que a velocidade é o parâmetro mais comum para análise de vibração, como a maioria das máquinas e seus defeitos geram vibrações na faixa de frequências de 10 Hz a 1 kHz. As letras A, B, C e D classificam a gravidade.

Quadro 1 – Diretrizes da ISO 2372 para determinação da severidade da vibração

Faixas de vibração Velocidade (mm/s)	Avaliação de criticidade de acordo com a classe da máquina			
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
0,3				
0,5				
0,7				
1,1				
1,8				
2,8				
4,5				
7,1				
11,2				
18,0				
28,0				
45,0				
71,0				

	Bom
	Aceitável
	Tolerável
	Inaceitável

Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

Os autores detalham as individualidades de cada classe:

- (a) Classe I: Peças individuais de motores e máquinas integralmente conectadas a uma máquina completa em sua condição normal de operação (motores elétricos de produção de até 15 kW são exemplos típicos de máquinas nesta categoria).
- (b) Classe II: Máquinas de médio porte (normalmente motores elétricos com potência de 15 a 75 kW) sem fundações especiais, motores montados rigidamente ou máquinas (até 300 kW) sobre fundações especiais.
- (c) Classe III: Grandes máquinas motrizes e outras máquinas de grande porte com massas rotativas montadas em fundações rígidas e pesadas, que são relativamente rígidas na direção da vibração.
- (d) Classe IV: Grandes máquinas motrizes e outras máquinas de grande porte com massas rotativas montadas em fundações, que são relativamente macias na direção de medição de vibração (por exemplo - grupos turbogeradores, especialmente aqueles com subestruturas leves).

2.6 CORRELACIONAMENTO DE RESPOSTA VIBRATÓRIA COM DEFEITOS ESPECÍFICOS

Com poucas exceções, os defeitos mecânicos em uma máquina causam altos níveis de vibração. Girdhar e Scheffer (2004) citam que os defeitos comuns que causam altos níveis de vibração em máquinas são:

- (a) Desbalanceamento de peças rotativas;
- (b) Desalinhamento de acoplamentos e rolamentos;
- (c) Folgas mecânicas;
- (d) Eixos tortos;
- (e) Engrenagens e rolamentos desgastados ou danificados;
- (f) Correias e correntes de transmissão ruins;
- (g) Variações de torque;
- (h) Forças eletromagnéticas;

- (i) Forças aerodinâmicas;
- (j) Forças hidráulicas;
- (k) Atrito e
- (l) Ressonância.

As vibrações causadas pelos defeitos ocorrem em frequências de vibração específicas, de acordo das características dos componentes, como também de seu funcionamento, montagem e desgaste. As amplitudes de vibração em frequências específicas são indicativas da gravidade dos defeitos.

A análise de vibrações visa correlacionar a resposta vibratória do sistema com defeitos específicos que ocorrem nas máquinas, seus componentes, ou mesmo em estruturas mecânicas.

2.6.1 Desbalanceamento

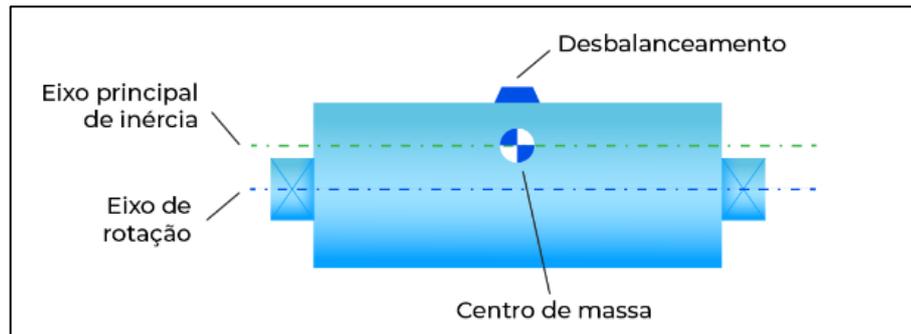
A vibração devido ao desbalanceamento de um rotor é provavelmente o defeito mais comum em máquinas. Felizmente, também é muito fácil de detectar e corrigir. Girdhar e Scheffer (2004) explicam que desbalanceamento é aquela condição que existe em um rotor quando vibração, força ou movimento são transmitidos aos seus rolamentos como resultado de forças centrífugas. Ele também pode ser definido como a distribuição desigual de massa em torno da linha central rotativa de um rotor.

Os três tipos mais comuns de desbalanceamento são o estático, dinâmico e conjugado.

2.6.2 Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático ocorre quando o eixo de massa não coincide com o eixo giratório e é paralelo a ele. Isto também pode ser conhecido como desbalanceamento em um plano. Ou seja, o eixo do centro de massa é deslocado paralelamente ao eixo devido à distribuição não uniforme de massa em torno do eixo de rotação. A Figura 7 detalha este tipo de desbalanceamento.

Figura 7 - Desbalanceamento Estático

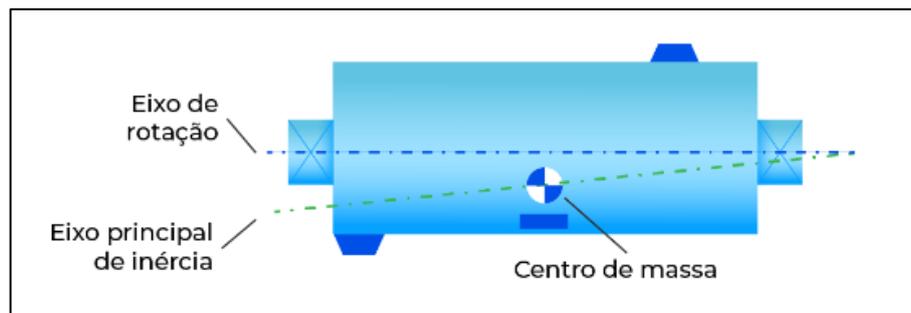


Fonte: Siqueira, 2023

2.6.3 Desbalanceamento dinâmico

O desbalanceamento dinâmico é definido como aquela condição em que o eixo de massa não coincide com o eixo giratório, não é paralelo a ele e não o intersecta. Esta condição também é conhecida como desbalanceamento em dois planos, sendo uma combinação entre o estático e dinâmico. A Figura 8 demonstra este tipo de desbalanceamento.

Figura 8 – Desbalanceamento Dinâmico

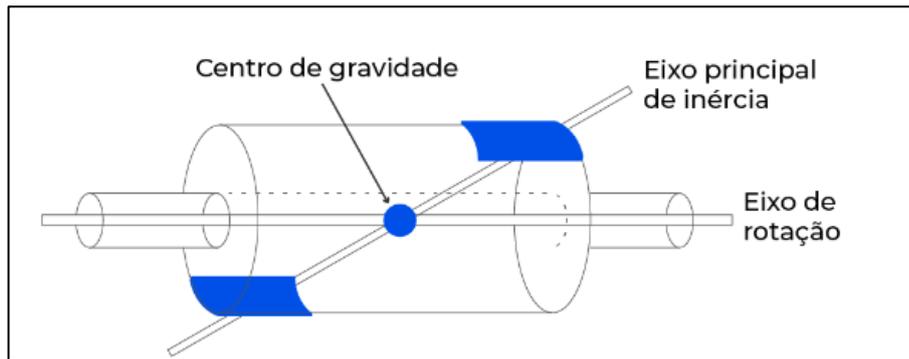


Fonte: Siqueira, 2023

2.6.4 Desbalanceamento conjugado

O desbalanceamento conjugado está presente quando o eixo de massa não coincide com o eixo de rotação, no centro de gravidade do rotor. Porém, os dois se interceptam na diagonal, no centro de gravidade do eixo de rotação. A Figura 9 mostra as características de um desbalanceamento conjugado.

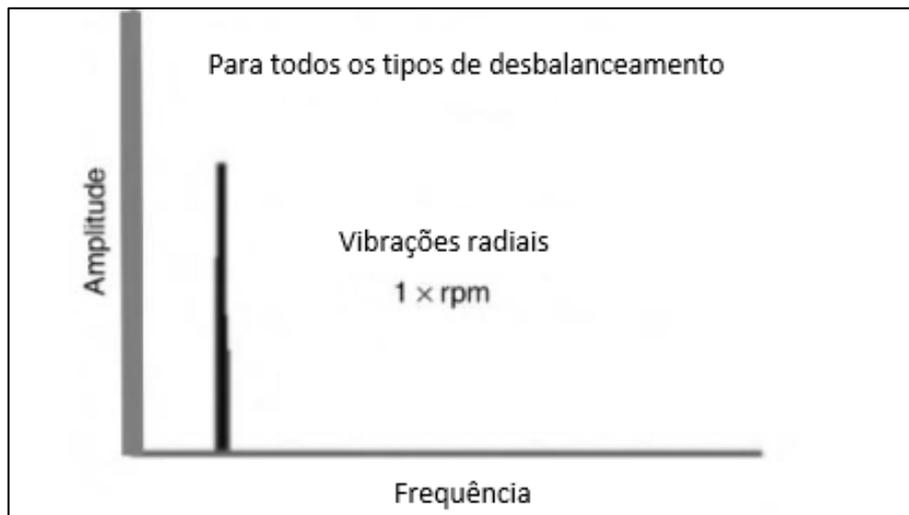
Figura 9 – Desbalanceamento Conjugado



Fonte: Siqueira, 2023

Para todos os tipos de desequilíbrio, o espectro FFT (Transformada Rápida de Fourier) mostrará uma frequência de vibração $1x$ rpm predominante. A amplitude de vibração na frequência $1x$ rpm variará proporcionalmente ao quadrado da velocidade de rotação. Ela está sempre presente e normalmente domina o espectro de vibração. A Figura 10 exemplifica o comportamento do espectro de vibração na presença de desbalanceamento no sistema.

Figura 10 – Comportamento da vibração em casos de desbalanceamento



Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

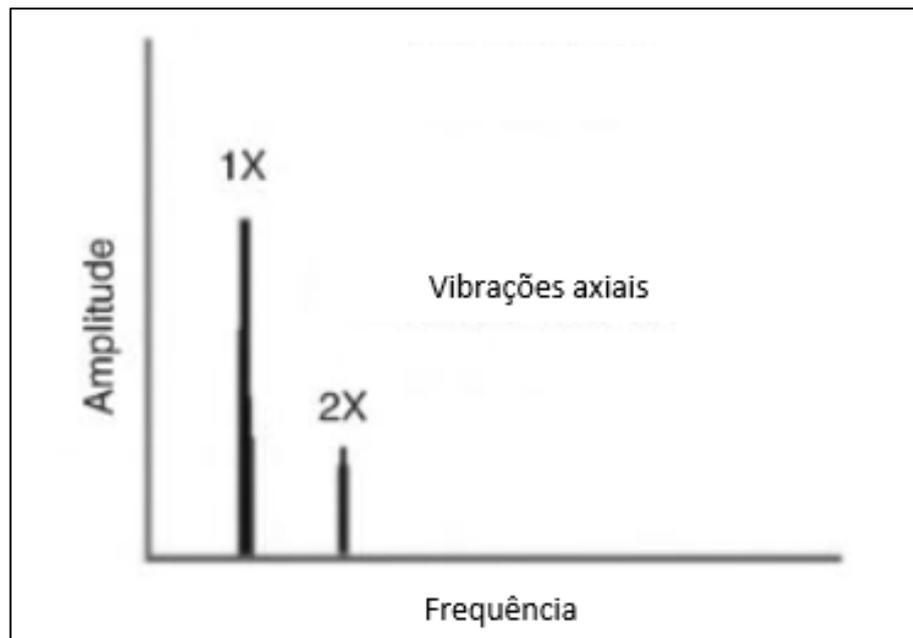
2.6.5 Eixos empenados

Conforme Girdhar e Scheffer (2004), quando um eixo empenado é encontrado, as vibrações tanto na direção radial quanto na direção axial serão altas. As vibrações axiais podem ser maiores que as vibrações radiais. A FFT normalmente terá componentes $1x$ e $2x$. Se a:

- (a) A amplitude de 1x rpm é dominante, então a curvatura está próxima do centro do eixo.
- (b) A amplitude de 2x rpm é dominante, então a curvatura fica próxima à extremidade do eixo.

A Figura 11 modela as vibrações obtidas quando há eixos empenados.

Figura 11 - Comportamento da vibração em casos de eixos empenados

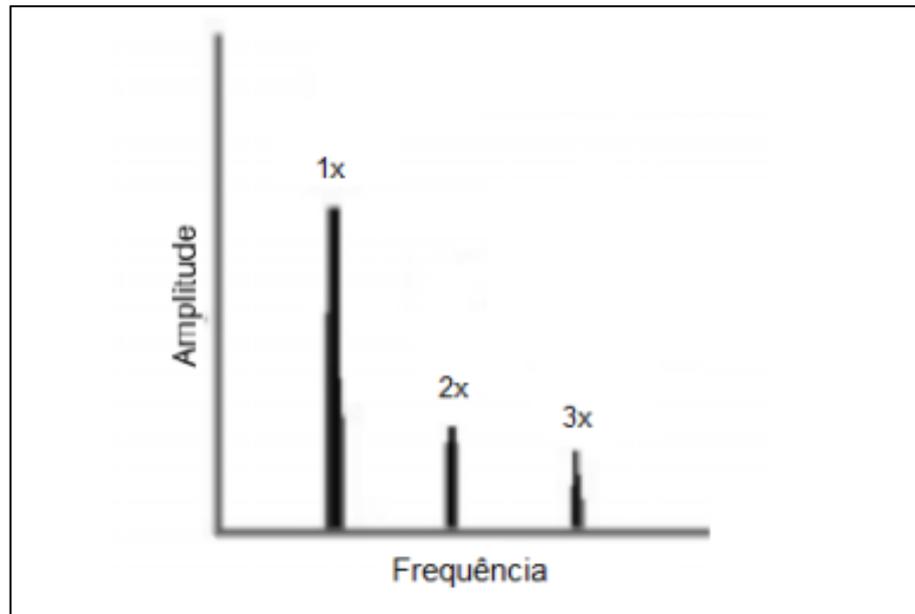


Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

2.6.6 Desalinhamento angular

Girdhar e Scheffer (2004) afirmam que o espectro de vibração para casos em que há desalinhamento angular mostrará picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e em suas 2ª e 3ª harmônicas, conforme demonstra a Figura 12.

Figura 12 - Comportamento da vibração em casos de desalinhamento angular

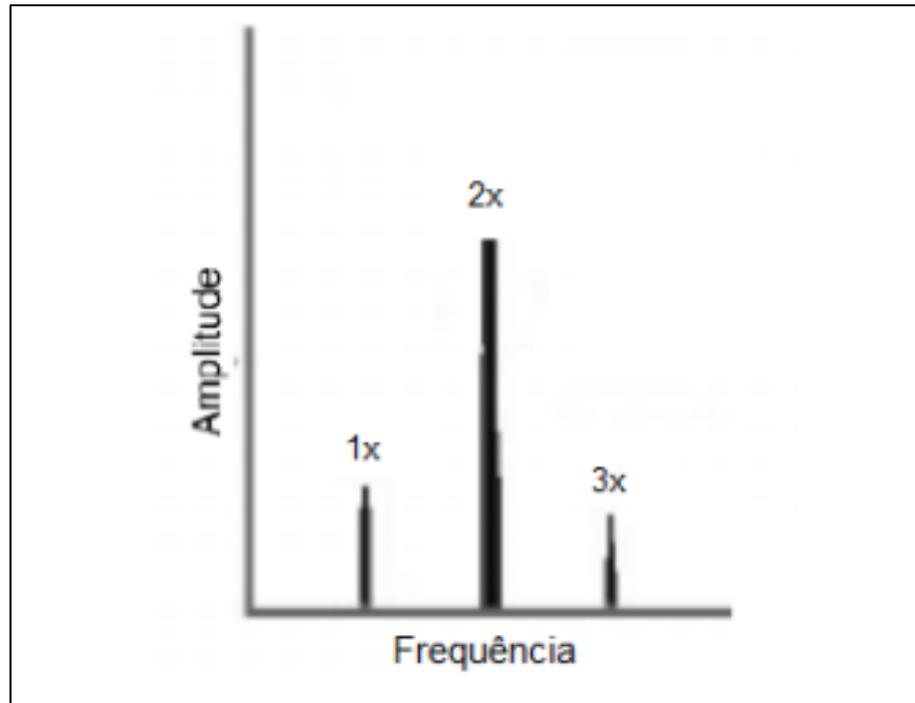


Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

2.6.7 Desalinhamento paralelo

Girdhar e Scheffer (2004) citam que o espectro de vibração para anomalias que consistem no desalinhamento paralelo mostrará picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e em suas 2^a e 3^a harmônicas, sendo o maior pico na segunda harmônica, como pode-se observar na Figura 13.

Figura 13 - Comportamento da vibração em casos de desalinhamento angular

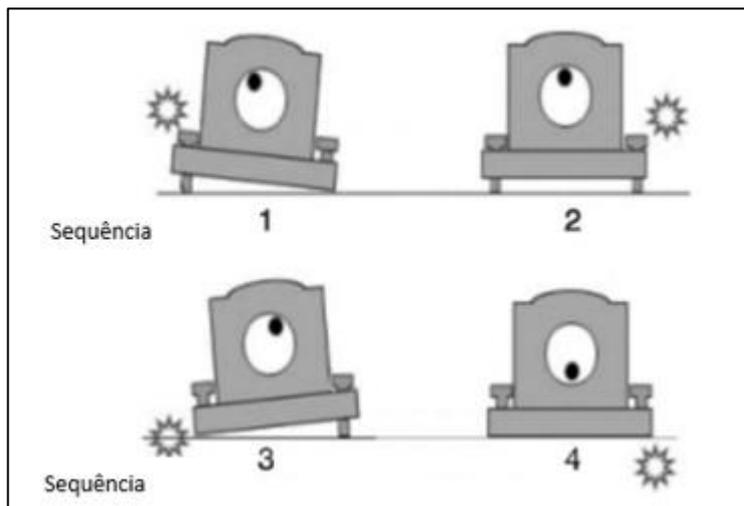


Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

2.6.8 Folga mecânica

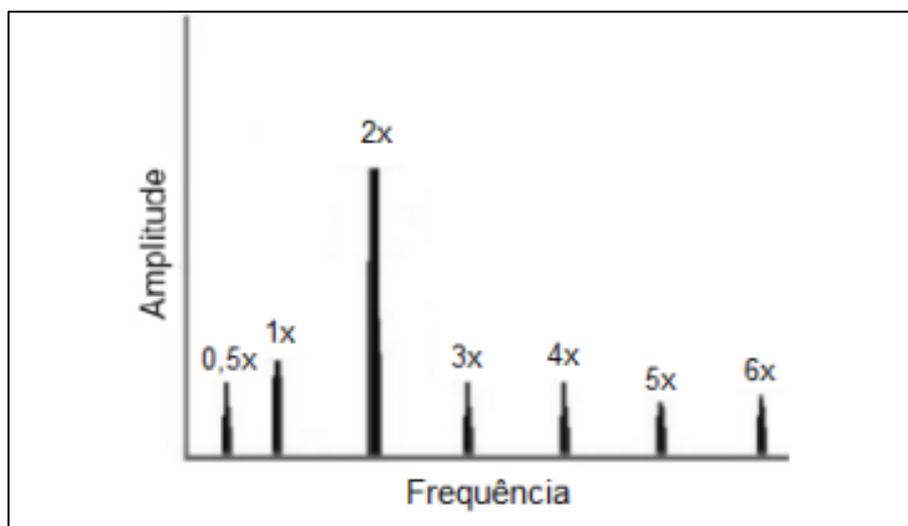
Girdhar e Scheffer (2004) explicam que quando há perda de um ou mais pontos de fixação dos mancais, o espectro caracteriza-se pela presença de picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e suas harmônicas, sendo distribuídos conforme ilustra a Figura 15. A perda de pontos de fixação é detalhada na Figura 14.

Figura 14 - Perda de ponto de fixação



Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

Figura 15 - Comportamento da vibração em casos de folga mecânica



Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

2.7 CÁLCULOS DE VIBRAÇÃO

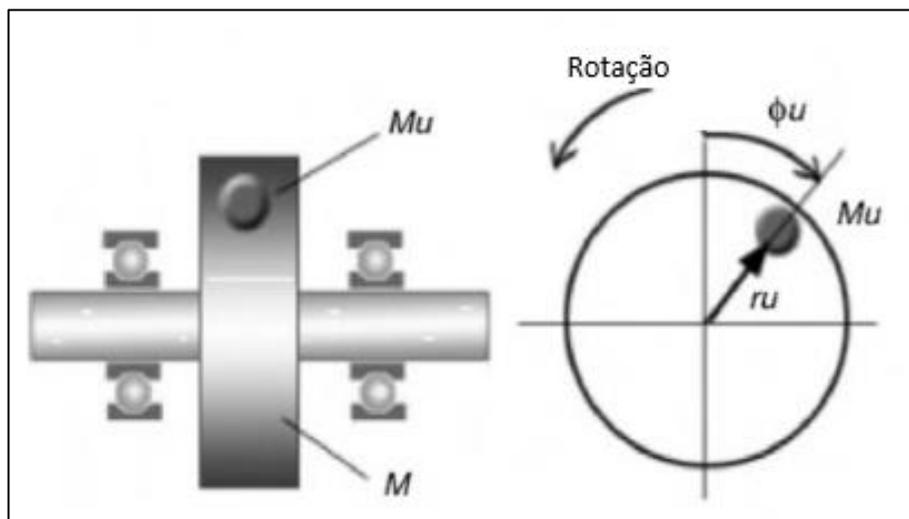
O desbalanceamento, que pode ser denominado como um desequilíbrio rotativo, é causado por uma distribuição desigual de massa em torno de um eixo de rotação. Este cenário resulta num momento que confere ao rotor um movimento oscilante. Nesse cenário, balancear uma peça é o ato de modificar a sua distribuição de massa para atenuar as anomalias geradas pelo desbalanceamento.

Para determinar o desbalanceamento, é essencial aprender como um rotor perfeitamente equilibrado responde a uma massa que tenderia a desequilibrá-lo. De acordo com Girdhar e

Scheffer (2004), quando um peso de desequilíbrio é adicionado a um rotor perfeitamente equilibrado, ele vibra a uma frequência de 1x rpm.

O cálculo do desbalanceamento dinâmico está associado com a força centrífuga. Se existir uma massa desbalanceada M_u no rotor, localizada num raio fixo r_u , e este estiver girando com uma velocidade angular conhecida w , surgirá uma força centrífuga que terá a tendência de jogar a massa desbalanceada para fora do rotor. Uma demonstração de uma massa desbalanceada pode ser vista a partir da Figura 16.

Figura 16 - Ilustração de massa desbalanceada no sistema



Fonte: Adaptado de Girdhar e Scheffer (2004)

Esta força pode ser calculada a partir da equação abaixo:

$$F_c = M_u r_u w^2$$

Sendo que:

M_u = massa desbalanceada; [kg]

r_u = raio do centro do rotor até a massa desbalanceada; [m]

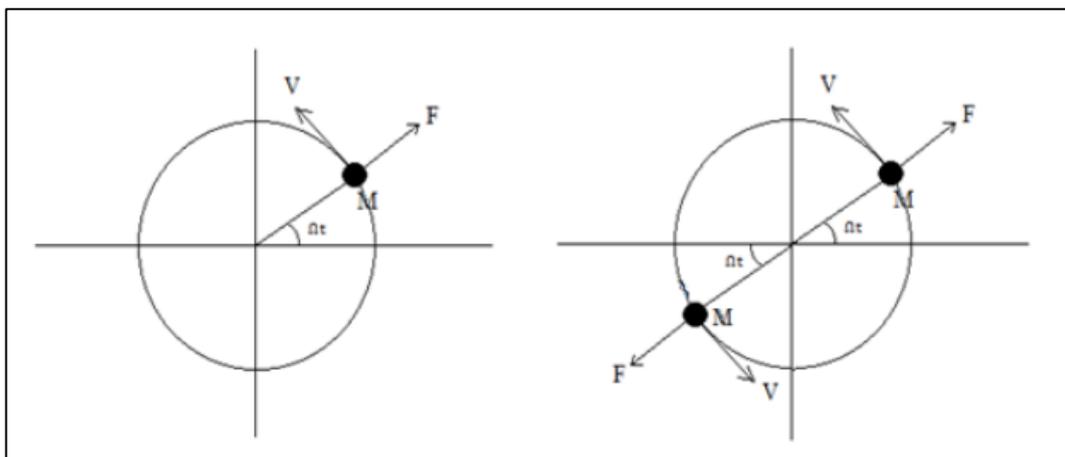
w = velocidade angular do rotor. [rad/s]

Este vetor de força irá girar junto com o eixo. Além disso, ela irá gerar reação de apoio nos mancais. Esta força de apoio pode ser evidenciada a partir da análise de vibração no mancal, a qual irá eventualmente variar em função desta força. Logo, é coerente afirmar que o comportamento dos sinais de vibração do mancal pode comprovar anormalidades no sistema, como é o caso do desbalanceamento.

Girdhar e Scheffer (2004) explicam que, se a massa do desbalanceamento for duplicada, a amplitude da vibração também duplica, o que implica que a amplitude é proporcional à força de desequilíbrio. Como exemplo, os autores citam um experimento em que foi colocada uma massa de desequilíbrio de 30 g em um rotor perfeito e foi observada uma amplitude de vibração de 2. Depois disso, a massa de 30 g foi removida e uma massa de 60 g é fixada no mesmo local. A amplitude de vibração foi de 4. Este é um fato extremamente importante a ser observado: A amplitude de vibração é um indicador da gravidade do desequilíbrio.

A técnica de balanceamento de rotores adiciona ou retira massas do sistema para compensar distribuições irregulares de massa em uma velocidade específica. (RIEGER, 1986). Conforme ilustra a Figura 17, a massa desbalanceada gera uma força radial. Para reduzir a intensidade desta força, faz-se necessário adicionar uma massa na direção oposta, a fim de atenuar os níveis de desbalanceamento.

Figura 17 - Técnica de balanceamento de equipamentos



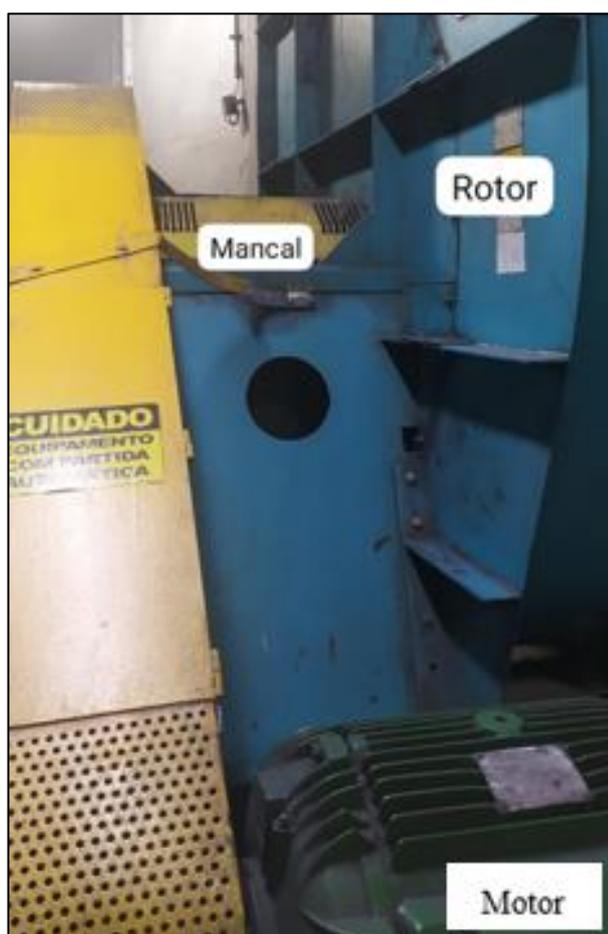
Fonte: Alencar e Moraes (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CENÁRIO ATUAL

No processo produtivo da empresa onde estão sendo realizados os estudos, há a operação de pintura líquida que é aplicada em algumas famílias de implementos rodoviários como basculantes e tanques. Um dos equipamentos presentes neste setor é o exaustor, cuja função é eliminar qualquer tipo de substância tóxica presente na cabine de pintura. Na indústria, esse ambiente é um dos que possuem maior contaminação. A Figura 18 ilustra o conjunto mencionado.

Figura 18 - Conjunto que compõe o sistema de exaustão da cabine de pintura

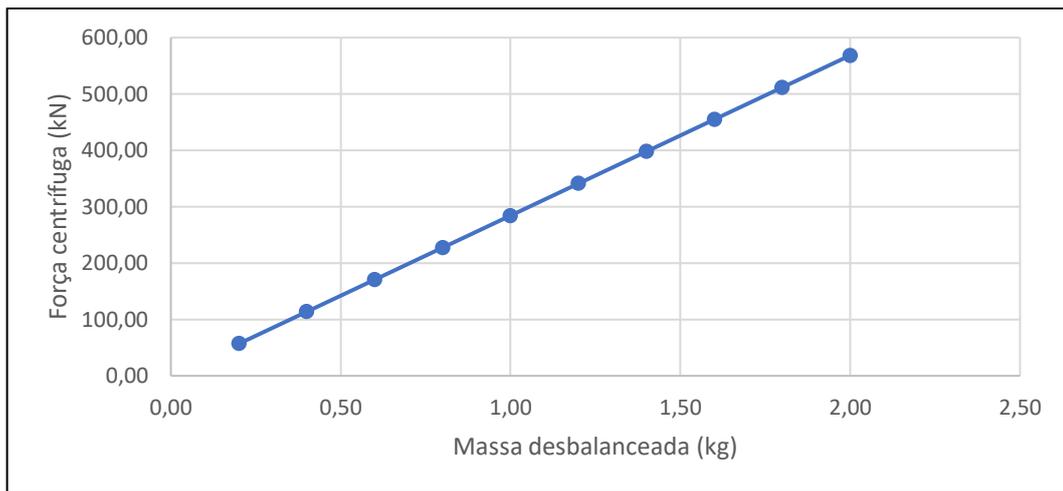


Fonte: O Autor (2024)

Neste cenário, conforme o passar do tempo, os resíduos deste processo de produção tendem a se acumular nas palhetas do rotor do exaustor de forma uniforme. Entretanto, gradativamente essa camada começa a sofrer um processo de deslocamento. Obviamente, este

acontecimento não ocorre no mesmo instante de tempo para todos os pontos. Diante disso, haverá uma distribuição desigual de massa acumulada nas palhetas, condição que irá gerar uma força centrífuga no equipamento. A partir dos dados de que o rotor gira a uma velocidade angular de 377 rad/s e supondo que o raio da massa desbalanceada seja de aproximadamente 2 metros, a força centrífuga varia em função da massa desbalanceada conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Variação da força centrífuga em função da massa desbalanceada



Fonte: O Autor (2024)

O aumento nos valores de força centrífuga exercida sobre o rotor, a partir da massa desbalanceada, reflete diretamente sobre as condições físicas dos mancais e do motor do equipamento, os quais começam a apresentar maiores índices de vibração.

Atualmente, o sistema de manutenção aplicado no exaustor é a manutenção preventiva. Apesar de ser estabelecida uma periodicidade fixa mensal para serem realizados os trabalhos de prevenção, é comum os próprios técnicos mecânicos que convivem com o equipamento identificarem a necessidade de atuação a partir do *feeling*, ou seja, através do sentimento que algo está de errado. Estas convicções nascem a partir do aumento de vibrações nos mancais e no motor e dos ruídos emitidos pelo equipamento. Neste momento, são agendadas as limpezas do rotor, de modo a retirar todo o acúmulo de resíduos do processo de pintura acumulados nas palhetas. A Figura 20 demonstra o resultado de uma manutenção preventiva realizada, evidenciando o material retirado.

Figura 20 - Material retirado das palhetas do rotor do exaustor



Fonte: O Autor (2024)

3.2 PROPOSTA DE INTERVENÇÃO

3.2.1 Instalação de sensores

Sensores serão instalados permanentemente nas máquinas em posições de medição adequadas e conectados ao equipamento online de aquisição e análise de dados. Os dados de vibração serão obtidos automaticamente para cada posição e a análise poderá ser exibida online via dispositivo móvel, utilizando um software de gerenciamento de banco de dados. Como os equipamentos de monitoramento serão permanentemente conectados aos sensores, os intervalos entre as medições podem ser curtos e podem ser considerados contínuos. Essa capacidade fornecerá detecção precoce de falhas e ação protetora. Após avaliar as informações, o software poderá fornecer um diagnóstico de possíveis problemas na máquina, a gravidade do problema e ainda poderá recomendar ações que possam amenizar o problema detectado.

A *TRACTIAN* é uma empresa de sensores inteligentes para a manutenção de equipamentos industriais que é parceira na continuidade deste trabalho. Seus produtos possuem tecnologia de comunicação sem fio de quarta geração e disparam alertas automáticos e em tempo real sobre qualquer mudança na vibração que possa indicar um problema em potencial no ativo. O sensor pode identificar anomalias envolvendo:

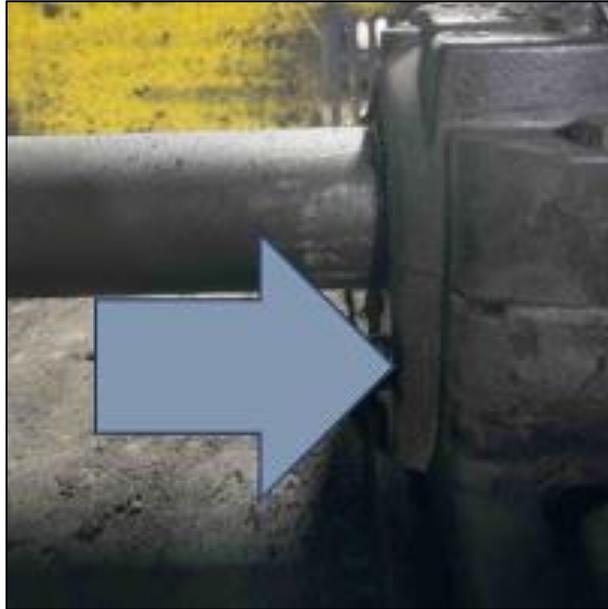
- (a) Desgaste;
- (b) Desbalanceamento;
- (c) Desalinhamento;
- (d) Folga mecânica;
- (e) Picos anômalos;
- (f) Engrenamento;
- (g) Falha de rolamento;
- (h) Falta de lubrificação;
- (i) Deposição;
- (j) Desgaste de filtros e
- (k) Cavitação.

Após posicionado na máquina e cadastrado na plataforma, o sensor inicia a coleta de dados sobre o comportamento mecânico e as condições físicas do ativo. As coletas são feitas através de um acelerômetro de alto desempenho que transforma os dados do mundo real em sua versão digital, onde são manipulados pelo processador embarcado no sensor e enviados aos servidores da *TRACTIAN* via nuvem.

3.2.2 Pontos de instalação

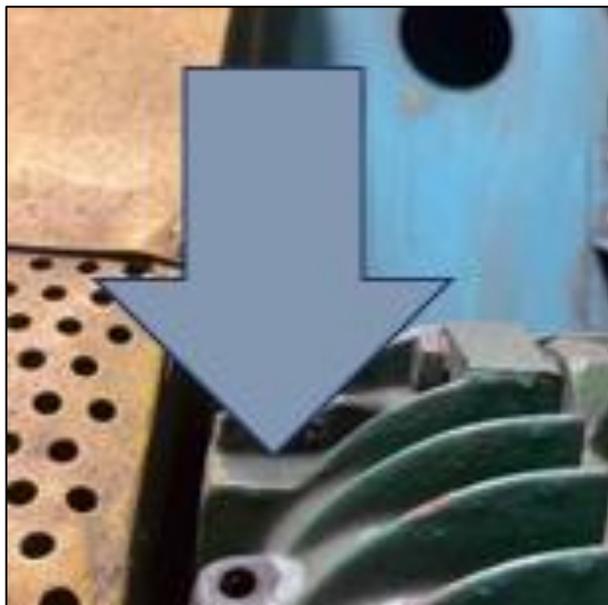
Os sensores *TRACTIAN* foram instalados em três pontos: dois foram posicionados em mancais, enquanto o terceiro foi posicionado no motor do equipamento, conforme ilustram as Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Ponto de instalação do sensor (mancal)



Fonte: O Autor (2024)

Figura 22 - Ponto de instalação do sensor (motor)



Fonte: O Autor (2024)

3.2.3 Realização de ensaios

Após a instalação dos sensores *TRACTIAN* nos mancais e no motor do sistema de exaustão, a capacidade de análise e poder de monitoramento aumentou exponencialmente. A partir deste avanço, uma série de ensaios e procedimentos foram realizados no equipamento

com o objetivo de ter mais clareza sobre como as vibrações se comportam em cenários distintos. Além disso, eles serviram para validar a etapa de instalação dos sensores, no sentido de demonstrar como pequenas variações no equipamento podem ser captadas e monitoradas via gráficos de vibração. Os procedimentos que foram feitos são:

- (a) Limpeza no rotor;
- (b) Inserção de massa de 49,20 gramas no rotor e
- (c) Troca de mancal.

Referente à troca do mancal, por consequência o rolamento também foi trocado. O modelo do rolamento é o 22216 K C3 (SKF), sendo o diâmetro externo de 140 mm e diâmetro interno de 80 mm. A Figura 23 ilustra o rolamento.

Figura 23 - Rolamento 22216 K C3 (SKF)



Fonte: SKF (2024)

Para cada um destes ensaios, foram obtidos os gráficos de velocidade e aceleração de vibração em função da frequência em dois momentos:

- (a) Imediatamente antes da alteração e
- (b) Imediatamente depois da alteração.

Além disso, foram elaboradas tabelas com os valores de velocidade e aceleração de vibração para cada um destes momentos, estratificados pelas direções vertical, horizontal e axial.

4 RESULTADOS

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES

A manutenção preditiva consiste na análise de dados para detectar anomalias e possíveis defeitos nos equipamentos. De modo a ganhar agilidade na obtenção de informações e consequentemente rapidez na resolução de problemas, sensores foram instalados em pontos estratégicos do sistema para garantir um acompanhamento em tempo real da máquina. Além disso, estas informações facilitam o desenvolvimento de estudos para entender melhor o comportamento do equipamento e como ele varia em condições anormais de funcionamento, visto que as informações estão disponíveis instantaneamente e possuem alta confiabilidade.

Nesse cenário, para a implementação de técnicas de manutenção preditiva no exaustor da cabine de pintura, foram instalados sensores em dois pontos estratégicos do sistema:

- (a) Mancal e
- (b) Motor.

A Figura 24 demonstra a instalação concluída no mancal e no motor, respectivamente.

Figura 24 – Instalação de sensores de manutenção preditiva



Fonte: O Autor (2024)

4.2 ENSAIOS

Foram feitos ensaios e procedimentos estratégicos com o objetivo de mensurar a influência de falhas sobre as vibrações emitidas pelo equipamento. Ou seja, a saída destes experimentos é de ter clareza de como o sistema se comporta em condições anormais de

funcionamento e comprovar os ganhos que podem ser obtidos a partir da implementação das técnicas de manutenção preditiva.

Com o auxílio dos sensores de vibração instalados no mancal e no motor do sistema, viabilizaram-se análises gráficas, as quais serviram como base para definir a criticidade de cada falha simulada, assim como definir uma relação entre falha e comportamento do rotor em termos de vibração. As alterações consistiram em:

- (a) Limpeza do rotor do exaustor;
- (b) Inserção de massa no rotor e
- (c) Troca de um dos mancais do sistema.

Outras variáveis envolvendo possíveis falhas com eixo empenado e lubrificação, por exemplo, podem também afetar as vibrações mecânicas. Porém, não foram feitas simulações para mensurar estes impactos devido à priorização de ensaios teoricamente mais relevantes, assim como falta de tempo hábil para as suas realizações.

4.2.1 Limpeza do rotor do exaustor

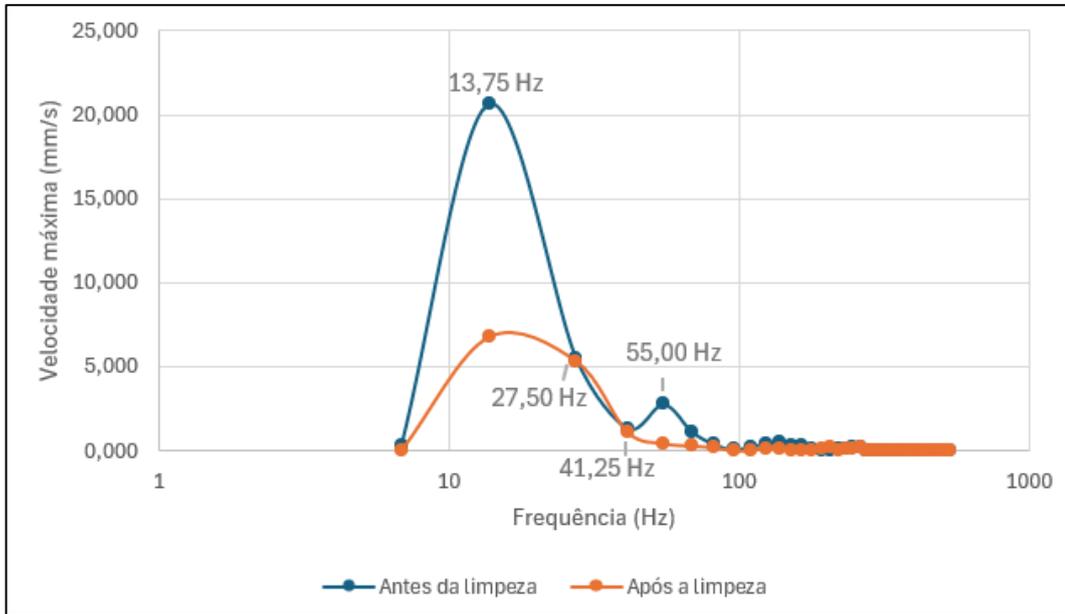
Uma das hipóteses mais claras que se tinha no início deste trabalho era a de que o acúmulo de resíduos de tinta acumulados nas pás do rotor do exaustor eram a causa para a geração de desbalanceamento no sistema. Conforme este acúmulo de tinta sofria um processo de deslocamento com o passar do tempo, a quantidade de massa acumulada em cada um dos pontos do rotor variava, sendo esta variação um dos principais motivos pelo aumento de vibração no equipamento.

Entretanto, a vibração não pode ser caracterizada somente por este motivo. Não se sabia com exatidão o quanto de influência este fator em específico possuía sobre as vibrações mecânicas emitidas pelo equipamento. Diante disso, o primeiro passo para tirar conclusões foi de aplicar uma limpeza no rotor do exaustor, de modo a praticamente zerarmos esta variável do sistema.

A partir dos sinais captados pelos sensores, foram obtidas informações imediatamente antes e depois deste procedimento, com o intuito de determinar a influência dos resíduos de tinta sobre a vibração. A Figura 25 exhibe as velocidades de vibração em função da frequência, a qual está disposta em escala logarítmica, logo antes e depois da limpeza, respectivamente. Da mesma maneira, a Figura 26 mostra as acelerações de vibração. Como a velocidade e a

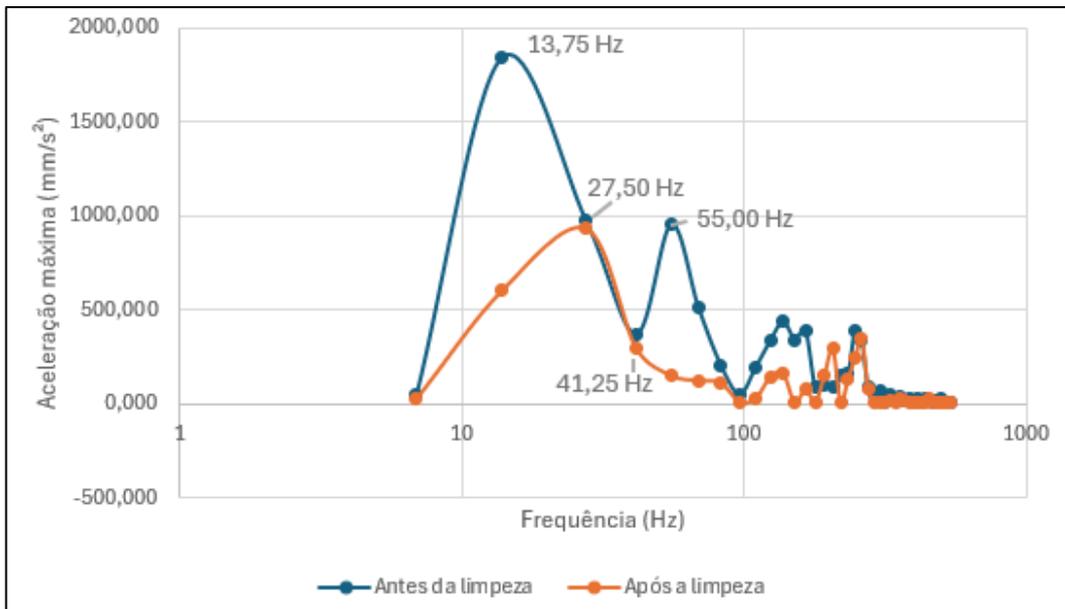
aceleração são grandezas vetoriais, o sensor capta sinais na direção vertical, horizontal e axial. Todos os valores que serão mostrados na sequência correspondem às maiores velocidades/acelerações apresentadas, independentemente da direção.

Figura 25 - Velocidades de vibração antes e depois da limpeza do rotor



Fonte: O Autor (2024)

Figura 26 - Acelerações de vibração antes e depois da limpeza do rotor



Fonte: O Autor (2024)

Observa-se claramente que os espectros apresentam diferenças significativas, principalmente na frequência de harmônica 1X (13,75 Hz). O Quadro 2 e Quadro 3 foram elaborados para exibir em termos numéricos o impacto que a limpeza no rotor teve nas vibrações do sistema, exibindo os valores de velocidade e aceleração nas direções vertical, horizontal e axial.

Quadro 2 - Variação das velocidades de vibração antes e depois da limpeza

		Vertical (mm/s)			Horizontal (mm/s)			Axial (mm/s)		
Harmônica	Frequência	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	20,386	1,700	18,686	15,571	0,971	14,600	4,202	6,774	-2,572
2X	27,50	3,254	1,088	2,166	0,981	0,033	0,948	6,262	5,359	0,903
3X	41,25	0,641	0,043	0,598	0,930	1,149	-0,219	1,246	0,821	0,425
4X	55,00	2,589	0,453	2,136	0,624	0,009	0,615	0,658	0,327	0,331
5X	68,75	1,031	0,048	0,983	0,215	0,017	0,198	0,990	0,314	0,676
6X	82,50	0,047	0,025	0,022	0,050	0,013	0,037	0,404	0,204	0,200

Fonte: O Autor (2024)

Quadro 3 - Variação das acelerações de vibração antes e depois da limpeza

		Vertical (mm/s ²)			Horizontal (mm/s ²)			Axial (mm/s ²)		
Harmônica	Frequência	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	1837,668	155,141	1682,527	1382,345	87,770	1294,575	437,377	599,481	-162,104
2X	27,50	569,276	187,405	381,871	182,894	7,159	175,735	973,408	935,652	37,756
3X	41,25	216,237	7,845	208,392	293,023	298,612	-5,589	368,240	217,413	150,827
4X	55,00	952,520	149,551	802,969	276,548	2,157	274,391	293,023	100,028	192,995
5X	68,75	513,868	10,395	503,473	149,453	4,609	144,844	400,896	122,681	278,215
6X	82,50	24,222	4,413	19,809	18,535	3,432	15,103	206,430	110,717	95,713

Fonte: O Autor (2024)

Estes valores demonstram que a limpeza no rotor implicou em variações de acelerações principalmente na frequência de rotação do eixo, ou seja, harmônica 1X. Visto que esta harmônica comumente apresenta índices altos em caso de desbalanceamento no sistema, a limpeza comprovou-se eficaz no que se refere a balanceamento.

4.2.2 Inserção de massa no rotor

O procedimento de limpeza confirmou a hipótese de que uma variação de massa de resíduos de tinta entre diferentes pontos do rotor ocasiona um desbalanceamento no sistema. A indefinição que persistiu neste momento era como se comportava a relação massa com variações na vibração. Ou seja, não se tinha clareza de uma função que relacionava diretamente essas duas variáveis.

Nesse cenário, foi feito um ensaio no rotor de modo a mensurar esse efeito. Uma massa de 49,20 gramas, a qual iremos denominar de massa 1, foi inserida na extremidade de uma das pás do rotor, conforme ilustra a Figura 27.

Figura 27 - Medição da massa 1 e inserção no rotor



Fonte: O Autor (2024)

Após este procedimento, o rotor foi ligado e a massa foi mantida intacta por uma duração de um dia para observar os efeitos que ela geraria no sistema. Após, foram analisados os dados de momentos imediatamente antes da inserção da massa, como também de momentos imediatamente depois.

É válido afirmar que este acréscimo de massa ocasionou um aumento na força centrífuga e, conseqüentemente, um acréscimo na força de reação no mancal. A força centrífuga acrescida mediante adição da massa de 49,20 gramas pode ser calculada conforme abaixo:

$$F_c = M_u r_u \omega^2$$

$$F_c = 0,04920 * 0,55 * 8,5773^2$$

$$F_c = 1,99 \text{ N}$$

Sendo que:

M_u = massa desbalanceada; [kg]

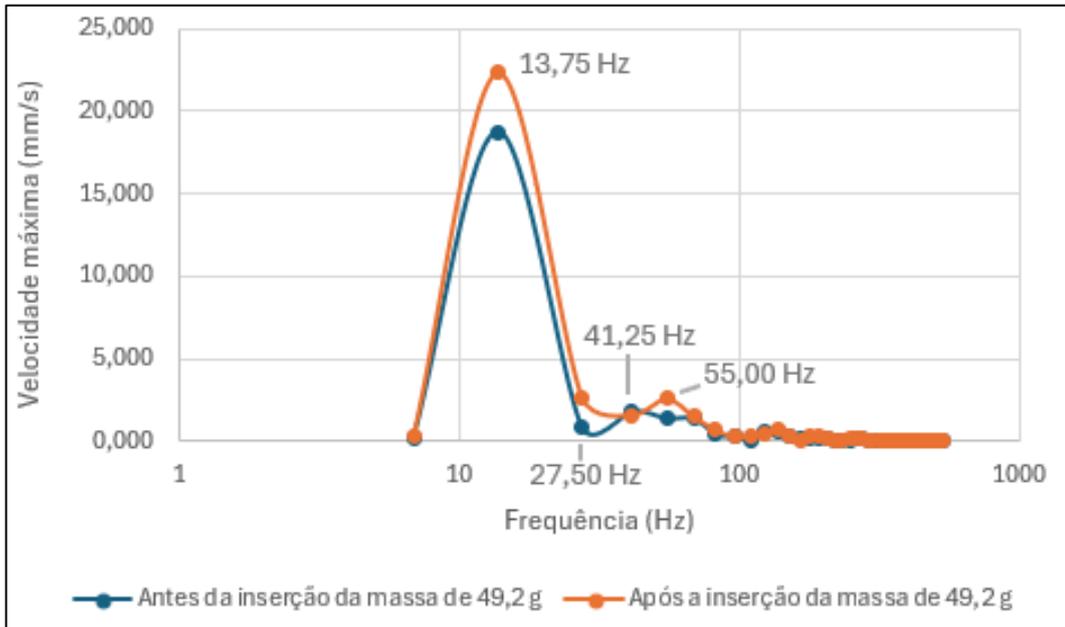
r_u = raio do centro do rotor até a massa desbalanceada; [m]

ω = velocidade angular do rotor. [rad/s]

A Figura 28 exhibe as velocidades de vibração em função da frequência, a qual está em escala logarítmica, antes e depois da introdução da massa. A Figura 29 mostra as acelerações

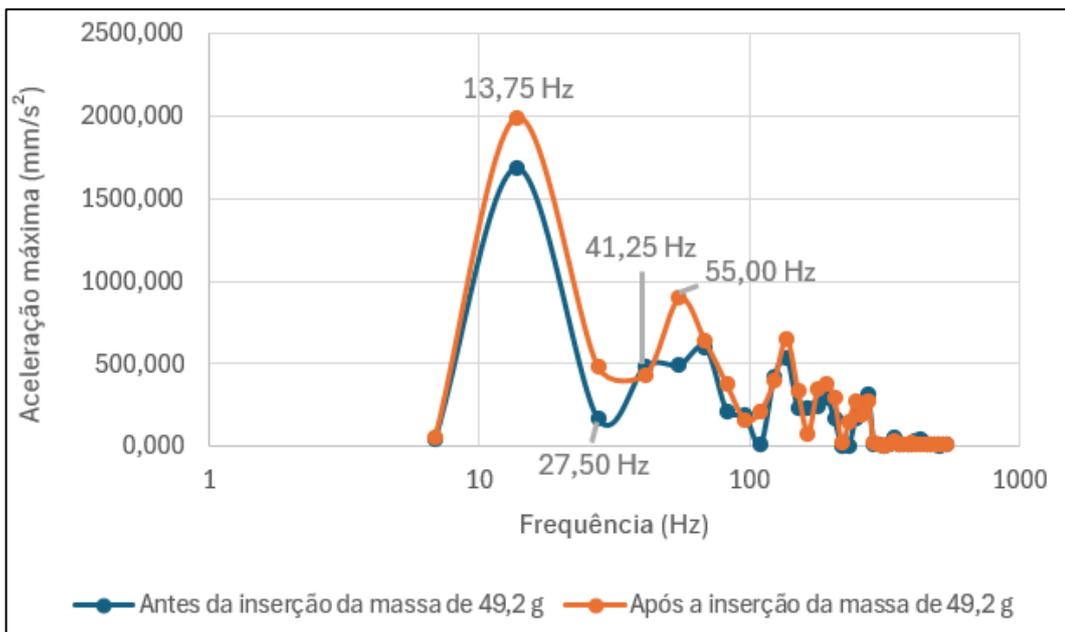
de vibração obtidas neste procedimento. Este ensaio provou-se benéfico também para validar a implementação dos sensores *TRACTIAN* na máquina, visto que uma pequena massa inserida no rotor gerou resultados que foram captados pelo sistema.

Figura 28 - Velocidades de vibração antes e depois da inserção da massa



Fonte: O Autor (2024)

Figura 29 - Acelerações de vibração antes e depois da inserção da massa



Fonte: O Autor (2024)

É nítido o aumento nos valores de velocidade e aceleração principalmente na harmônica 1X (13,75 Hz) a partir da inserção da massa de 49,20 gramas no rotor. Logo, é coerente afirmar que ela gerou um desbalanceamento no sistema. Os Quadros 4 e 5 deixam claro como as velocidades e acelerações de vibração variaram a partir deste ensaio.

Quadro 4 - Variação das velocidades de vibração antes e depois da inserção da massa 1

Harmônica	Frequência	Vertical (mm/s)			Horizontal (mm/s)			Axial (mm/s)		
		Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	18,623	22,314	3,691	14,138	16,036	1,898	6,033	6,999	0,966
2X	27,50	1,532	2,310	0,778	1,053	1,050	-0,003	2,948	2,678	-0,270
3X	41,25	0,982	0,956	-0,026	1,182	1,397	0,215	0,980	1,610	0,630
4X	55,00	1,563	2,590	1,027	0,479	0,848	0,369	0,728	1,311	0,583
5X	68,75	1,077	1,512	0,435	0,033	0,343	0,310	1,022	1,411	0,389
6X	82,50	0,053	0,049	-0,004	0,030	0,026	-0,004	0,293	0,692	0,399

Fonte: O Autor (2024)

Quadro 5 - Variação das acelerações de vibração antes e depois da inserção da massa 1

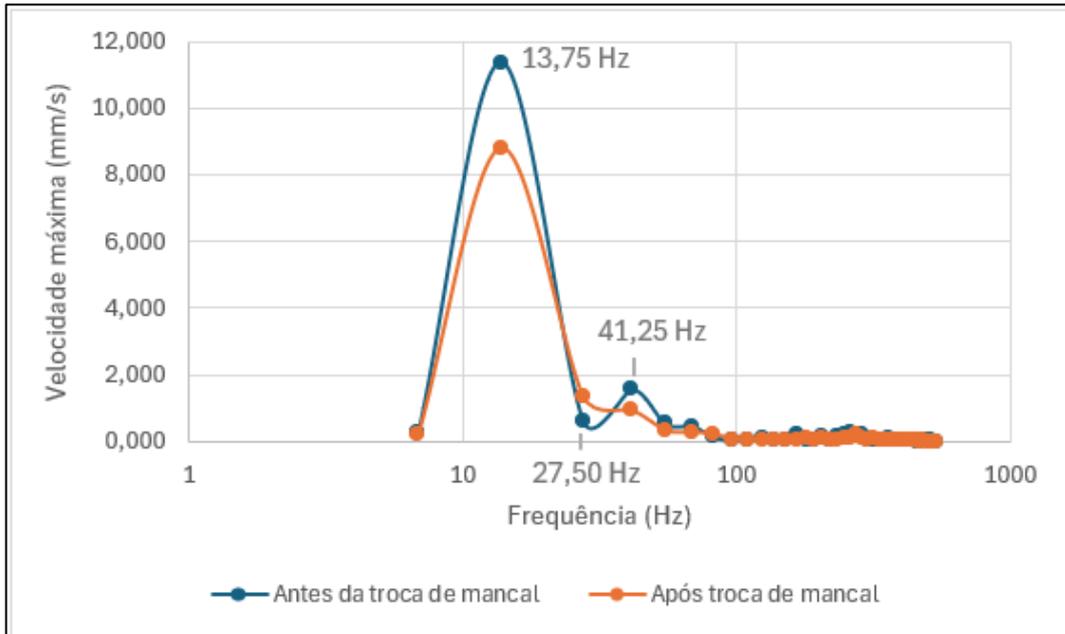
Harmônica	Frequência	Vertical (mm/s ²)			Horizontal (mm/s ²)			Axial (mm/s ²)		
		Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	1685,469	1994,378	308,909	1324,584	1436,086	111,502	499,747	618,505	118,758
2X	27,50	13,925	440,319	426,394	169,753	171,616	1,863	119,935	484,154	364,219
3X	41,25	10,591	248,795	238,204	487,979	372,162	-115,817	272,527	433,160	160,633
4X	55,00	494,255	896,818	402,563	196,231	296,455	100,224	357,649	445,222	87,573
5X	68,75	600,853	636,746	35,893	116,209	152,003	35,794	424,726	612,327	187,601
6X	82,50	5,198	8,532	3,334	6,669	15,102	8,433	216,040	375,300	159,260

Fonte: O Autor (2024)

4.2.3 Troca de rolamento em mancal do sistema

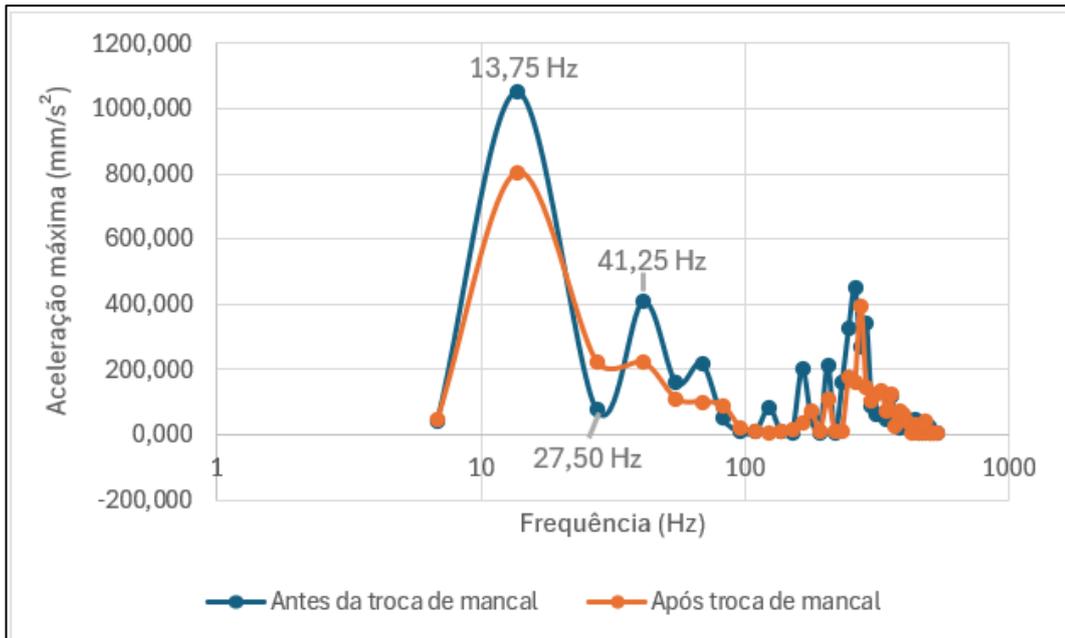
Uma terceira variável levada em consideração neste trabalho foi referente ao rolamento presente no mancal do sistema. Sabendo-se que folgas excessivas no rolamento podem gerar desbalanceamentos, foram obtidos os gráficos de vibração antes e depois da substituição do rolamento que foi realizada. As Figuras 30 e 31 apresentam como as velocidades e acelerações de vibração, respectivamente, variaram a partir deste procedimento. Os gráficos estão em função da frequência em escala logarítmica.

Figura 30 - Velocidades de vibração antes e depois da troca do rolamento



Fonte: O Autor (2024)

Figura 31 - Acelerações de vibração antes e depois da troca do rolamento



Fonte: O Autor (2024)

Os Quadros 6 e 7 detalham em termos numéricos como as velocidades e acelerações de vibração, respectivamente, se comportaram a partir da troca do rolamento.

Quadro 6 - Variação das velocidades de vibração antes e depois da troca do rolamento

Harmônica	Frequência	Vertical (mm/s)			Horizontal (mm/s)			Axial (mm/s)		
		Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	8,022	2,896	-5,126	5,884	2,498	-3,386	11,375	8,794	-2,581
2X	27,50	0,218	1,333	1,115	0,019	0,042	0,023	0,614	1,244	0,630
3X	41,25	0,120	0,579	0,459	0,990	0,683	-0,307	1,579	0,939	-0,640
4X	55,00	0,536	0,058	-0,478	0,013	0,328	0,315	0,241	0,292	0,051
5X	68,75	0,466	0,048	-0,418	0,015	0,036	0,021	0,384	0,283	-0,101
6X	82,50	0,054	0,041	-0,013	0,021	0,028	0,007	0,134	0,216	0,082

Fonte: O Autor (2024)

Quadro 7 - Variação das acelerações de vibração antes e depois da troca do rolamento

Harmônica	Frequência	Vertical (mm/s ²)			Horizontal (mm/s ²)			Axial (mm/s ²)		
		Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença	Antes	Depois	Diferença
1X	13,75	748,738	291,846	456,892	532,991	216,825	316,166	1051,077	803,949	247,128
2X	27,50	8,336	224,474	-216,138	11,180	6,669	4,511	77,080	207,018	-129,938
3X	41,25	6,767	128,663	-121,896	251,443	176,912	74,531	408,349	222,807	185,542
4X	55,00	160,437	2,452	157,985	5,296	110,521	-105,225	98,753	105,814	-7,061
5X	68,75	220,061	4,903	215,158	5,786	9,807	-4,021	180,540	100,224	80,316
6X	82,50	4,315	5,884	-1,569	8,238	7,453	0,785	51,681	90,712	-39,031

Fonte: O Autor (2024)

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos ensaios e procedimentos realizados no exaustor da cabine de pintura, tornou-se possível ter uma dimensão de como algumas variáveis impactam no desbalanceamento do sistema como um todo. Os valores levados em consideração nestas análises consistem nos resultados obtidos na harmônica 1X, ou 13,75 Hz de frequência, visto que o desbalanceamento presente na máquina é refletido principalmente nesta faixa de frequência.

Analisando-se os resultados obtidos após a limpeza que foi efetuada no rotor, é possível afirmar que o ponto zero desta variável está situado a uma velocidade de vibração de 6,774 mm/s. Nesse cenário, toda a faixa de velocidade de vibração superior a 6,774 mm/s pode ser majoritariamente justificada pelo desbalanceamento originado pelo deslocamento de resíduos de tinta. Logo, tomando como exemplo a velocidade máxima de vibração presente quando a limpeza foi executada, a qual estava em 20,386 mm/s, é coerente afirmar que, neste momento, 66,8% do desbalanceamento poderia ser justificado pela irregularidade de distribuição de massa. Neste contexto, o valor desta porcentagem obviamente tenderá a zero quando ocorre uma limpeza no rotor. Entretanto, ela tende a aumentar ao longo do tempo e, além disso, detém

o potencial de estar na maior parte do tempo na liderança de motivos que justificam o desbalanceamento do sistema.

Avaliando o resultado obtido a partir da inserção da massa de 49,2 gramas em uma das pás do rotor, houve um aumento na velocidade de vibração em 3,691 mm/s quando a máquina estava operando com o acréscimo desta massa. Logo, é correto afirmar que ela colaborou para aumentar o desbalanceamento do sistema. Pode-se concluir que, se massa for adicionada somente num ponto específico do rotor, é provável que haja um aumento na velocidade de vibração em 0,075 mm/s a cada grama adicionada. Importante destacar que se massas forem adicionadas em dois pontos ou mais do rotor, esta relação torna-se inválida.

Ademais, o acréscimo da massa validou a implementação dos sensores *TRACTIAN*, visto que o impacto deste pequeno incremento pôde ser captado a partir dos espectros de vibração, tanto de velocidade quanto de aceleração.

Unindo os resultados da limpeza do rotor com os gráficos obtidos a partir da adição da massa de 49,20 gramas, foi possível também estimar o quanto havia de massa desbalanceada previamente à limpeza efetuada. Sabendo-se que a massa de 49,20 gramas gerou um aumento de 3,691 mm/s na velocidade de vibração, e que a limpeza no rotor gerou um decréscimo de 13,612 mm/s, é coerente afirmar que o rotor possuía um desbalanceamento de massa de aproximadamente 181,44 gramas de tinta antes de ser feita a sua limpeza.

Por último, a troca de rolamento no mancal se mostrou ser uma ação benéfica para a máquina quando se trata de balanceamento. Este procedimento resultou numa queda de velocidade de vibração de 2,581 mm/s. Neste cenário, possivelmente uma folga excessiva no rolamento substituído pode ter contribuído para este resultado. Apesar disso, esta variável não se mostra como sendo a mais relevante para o desbalanceamento do sistema, e a curto prazo pode não ser a que apresentará os maiores problemas.

5 CONCLUSÃO

A manutenção preditiva representa uma abordagem transformadora na gestão de ativos e estratégias de manutenção em vários setores. Ao aproveitar tecnologias avançadas, como aprendizado de máquina, sensores IoT e análise de dados, as organizações podem antecipar falhas nos equipamentos antes que elas ocorram, reduzindo significativamente o tempo de inatividade e os custos de manutenção. A integração da manutenção preditiva não só aumenta a eficiência operacional, mas também prolonga a vida útil de ativos críticos.

Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho, o qual consistiu na implementação de técnicas de manutenção preditiva num exaustor de cabine de pintura, foi atingido. Esta mudança da manutenção reativa para a preditiva promoverá um quadro operacional mais resiliente e responsivo, abrindo caminho para futuros avanços nas práticas de manutenção. Além disso, ela permitirá à empresa monitorar a máquina em tempo real, recolhendo grandes quantidades de dados que podem ser analisados para identificar padrões e prever potenciais falhas. Esta abordagem baseada em dados permite que as equipes de manutenção programem intervenções nos momentos ideais, minimizando assim as interrupções nas operações.

Após a instalação de sensores em pontos estratégicos do ativo, foram realizados ensaios com o intuito de validar a instalação. Foi identificado que pequenas alterações no rotor da máquina foram captadas a partir dos espectros de velocidade e aceleração de vibração. Logo, os pontos escolhidos, sendo eles no mancal e no motor, mostraram-se precisos. Além disso, os ensaios possibilitaram um maior entendimento do sistema como um todo, identificando quais são as principais variáveis que levam a máquina a apresentar desbalanceamento. A principal causa foi definida como sendo a tinta acumulada nas pás do rotor, cujo processo de deslocamento ocasiona uma não uniformidade de massa na área do rotor, gerando o desbalanceamento. Além disso, folgas no rolamento do mancal também contribuem para o problema. Todos os gráficos obtidos possibilitaram também o desenvolvimento de relações matemáticas envolvendo massa, força centrífuga e velocidade de vibração.

Novos estudos envolvendo outras variáveis que impactam também no bom funcionamento do exaustor podem ser desenvolvidos para maior aprofundamento. Lubrificação e condição de eixo são alguns fatores que podem ser levados em consideração nas próximas oportunidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONIOLLI, Edilar Bento. **Estudo Comparativo De Técnicas De Medição E Análise De Vibrações Para A Manutenção Preditiva Em Mancais De Rolamentos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro. **NBR- 5462, Confiabilidade- terminologias**. Rio de Janeiro, 1981. 17pg.
- BARILLI, Rodrigo. **Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope**. Rio de Janeiro, 2013
- BEZERRA, R. D. A. **Deteção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. 2004. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- DE LIMA, Alisson. **Análise de Vibração em Mancais de Rolamento de Motores e Bombas**. Recife, 2019
- Garantia de Confiabilidade. Predponta MCA, Nova Rússia. Disponível em: <<https://www.predponta.com.br/site/pages/confiabilidade>>. Acesso em 19 de junho de 2024.
- GERGES, SAMIR N. Y. e NUNES, MARCUS A . C., **Deteção de Falhas em Rolamentos através de Medição do Envelope de Vibrações**. VII Congresso Nacional de Ingenieria Mecanica, Universid Austral de Chile, 2 a 5 outubro 1996.
- GIRDHAR, P. e SCHEFFER, C. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, v. I, 2004.
- GOMES, G. F. e BARONI, T. D'AQUINO, **Manutenção Preditiva por Ferrografia**. Revista Mundo Mecânico, Fevereiro de 1990 (24 - 28).
- HEIDRICH, ROBERTO M., **Controle de Vibrações**. Departamento de engenharia Mecânica, UFSC, EMC-5140,1996.
- INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA. **Curso de análise de vibração: módulo II**. 21. ed. Itajubá: IVMTA, 2013.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção Preditiva: Fator de Sucesso na Gestão Empresarial**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

KLEMPNOW, LESCANO, VIGNALE, RUZZANTE, HIERRO, **Análisis de Falhas en Cojintes a Rodamientos usando Vibraciones Mecânicas y Emisión Acústica**. 18º Encontro da SOBRAC, 1998, Florianópolis, pg.(591 - 594).

KOGUT, W. **Prescriptive Maintenance as production processes healthcare. Diagnosis and prognosis first, prescription and recommendations next**. Novembro 2022.

LENZI, A ., **Revisão Bibliográfica sobre Técnicas de Diagnóstico de Defeitos em Máquinas**. Relatório Parcial I e II, Setembro 1991.

MATOS, WIRITON SILVA DE, **Redução de Custo em Manutenção de Equipamentos Mecânicos**. Revista Mundo Mecânico, Julho 1980(24 - 27).

MENNA, Alexandre. **Detecção de Falhas em Mancais de Rolamento por Análise de Vibrações em Banda Larga: Um Caso Prático de Aplicação em uma População de Equipamentos Rotativos**. 2017

MORAES, Ricardo. **Balanceamento de Eletro-Ventilador Automotivo**. Recife, 2017.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva**. Volume 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

RIEGER, N. F. **Balancing of Rigid and Flexible Rotors**. STRESS TECHNOLOGY INC ROCHESTER, NY, 1986.

RODRIGUES, Marcelo. **Curso técnico em eletrotécnica, módulo 3, livro 17: gestão da manutenção**. Curitiba: Base Livros Didáticos, 2009.

ROSSDEUTSCHER, Joe Luiz Junior. **Análise de vibração em rolamentos industriais**. Lajes, SC: UNIFACVEST, 2018.

SANTOS, Valdir Aparecido dos. **Manual prático da manutenção industrial**. São Paulo: Ícone, 2007.

SIQUEIRA, Brenan. **Análise do Consumo de Energia em Máquinas Rotativas Vibrando**. Recife, 2023.

SKF. Disponível em: < <https://www.compreskf.com.br/>>. Acesso em: 1 de dezembro de 2024.

WEBER, Abilio José; et al. **Telecurso: profissionalizante de Mecânica: manutenção**. Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho, 2009.

YACUBSOHN, V. R. **El Diagnostico de fallas por analisis vibratorio**. São Paulo: Die Techik Ltda, 1983.