

Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG
Curso de Engenharia Mecânica

LENISE RIBEIRO DA SILVA
MATHEUS BATISTA LOPES

**MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM
ROTOR DO EXAUSTOR DE CALDEIRAS**

Publicação Nº 09

Goianésia - GO
2023

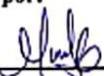
LENISE RIBEIRO DA SILVA
MATHEUS BATISTA LOPES

MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM
ROTOR DO EXAUSTOR DE CALDEIRAS

Publicação N° 09

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, EM FORMA DE ARTIGO,
SUBMETIDO AO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACEG

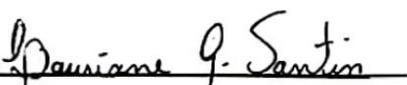
Aprovados por:



Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes, Doutora (Faculdade Evangélica de
Goianésia - FACEG)
(ORIENTADOR)



Ivandro José de Freitas Rocha, Mestre (Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)



Lauriane Gomes Santin, Doutora (Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)

Goianésia - GO
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, LENISE RIBEIRO DA. LOPES, MATHEUS BATISTA.	
Manutenção Preditiva Através de Análise de Vibrações em Rotor do Exaustor de Caldeiras [Goiás] 2023, 26P, 297 mm (ENC/FACEG, Bacharel, Engenharia Mecânica, 2023).	
ARTIGO – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA	
Curso de Engenharia Mecânica.	
1. Análise vibracional	2. Equipamentos rotativos
3. Espectro de vibração	
I. ENM/FACEG	II. Manutenção Preditiva Através de Análise de Vibrações em Rotor do Exaustor de Caldeiras

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, L. R.; LOPES, M. B. Manutenção Preditiva Através de Análise de Vibrações em Rotor do Exaustor de Caldeiras. Artigo, Publicação 09 2023/1 Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, Goianésia, GO, 26p. 2023.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Lenise Ribeiro da Silva, Matheus Batista Lopes

TÍTULO DO TRABALHO DO ARTIGO: Manutenção Preditiva Através de Análise de Vibrações em Rotor do Exaustor de Caldeiras.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica ANO: 2023

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


 Lenise Ribeiro da Silva
 Rua Tucum, Parque das
 Palmeiras III
 CEP 7638-540 - Goianésia/GO - Brasil


 Matheus Batista Lopes
 Rua 35, Centro
 CEP 76380-126 - Goianésia/GO -
 Brasil

MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM ROTOR DO EXAUSTOR DE CALDEIRAS

Lenise Ribeiro da Silva¹
Matheus Batista Lopes²
Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes³

RESUMO

A condição de uma máquina afeta a qualidade e eficiência do seu trabalho, e deixar um problema chegar em estado crítico resulta em consequências negativas, podendo causar a perda do equipamento e paradas extensas em uma fábrica. A manutenção de máquinas passou a existir junto com a criação da indústria. A expansão das indústrias fez necessária a realização constante de manutenção. Isso fez com que as áreas de planejamento percebessem que havia melhores formas de realizar a manutenção, não apenas quando o equipamento apresentasse defeito (manutenção corretiva) ou simplesmente fizesse a troca dos componentes para se evitar defeitos (manutenção preventiva). Tendo em vista que a manutenção preditiva, baseada em análise de vibrações, é de suma importância para detectar defeitos imperceptíveis a observação superficial ou a testes audíveis. O presente trabalho tem como objetivo um estudo de caso que mostra que com a implantação de um sistema de manutenção preditiva que se utiliza da análise de vibrações, é possível prevenir falhas e quebras nos equipamentos, reduzindo assim o tempo e o custo para identificação e reparo das falhas. Para isso foi acompanhado ao longo dos anos de 2021 e 2022 um rotor do exaustor de uma caldeira localizada na área industrial de uma empresa geradora de energia através do vapor gerado na queima do bagaço da cana-de-açúcar. Ao longo do acompanhamento foram percebidas duas falhas por desbalanceamento dinâmico, uma em cada ano de acompanhamento, sendo que a do segundo ano acompanhado teve alta acentuada em sua frequência de vibração em relação ao ano anterior, devido ao aumento da velocidade de operação do equipamento, que passou de 640 rpm, em 2021, para 710 rpm em 2022. Ambas falhas foram contornadas após o balanceamento dinâmico do equipamento. Ao final do trabalho foi evidenciada a importância da análise de vibrações como método preditivo, podendo reduzir anualmente até 80% dos gastos com troca de peças.

Palavras-chave: Análise vibracional. Equipamentos rotativos. Espectro de vibração.

¹ Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: leniseribeiro23@gmail.com

² Discente do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Evangélica de Goianésia (FACEG). E-mail: lopes2807@outlook.com

³ Doutora em Engenharia Aeronáutica, professora do curso da Faculdade Evangélica de Goianésia. E-mail: mariaeroing@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Em um meio a uma produção automatizada, a eficiência do produto depende, entre outros fatores, do desempenho do equipamento que o fabrica. A irregularidade das condições do equipamento leva a desvios no processo de produção e diminuição de qualidade do produto final. Somente a manutenção correta pode garantir que o processo não perderá qualidade devido a desvios gerado pelo equipamento (MARCORIN e LIMA, 2013).

A manutenção preditiva se trata das práticas de manutenção com foco preventivo e antecipado de todo o esforço físico utilizado nas operações, é uma metodologia de manutenção que tem maior atenção para a prevenção de danos e previsibilidade de falhas. Tem excelente uso em fábricas modernizadas, porque é tecnicamente mais maleável que outros conceitos. A manutenção preditiva atua de forma a executar uma experiência de monitoramento constante dentro de uma produção. Assim, é possível limitar os danos comuns da rotina fabril, diminuir custos e maximizar a produtividade (TOTVS, 2021).

Historicamente os primeiros estudos em elementos da natureza vibratória são datados de séculos antes de cristo. Sendo assim, cada vez mais, os estudos da área vêm evoluindo. Atualmente, a análise de vibrações tem uma função na manutenção preditiva de máquinas e seus componentes (SOARES, 2020).

Os dados de vibração mostram informações essenciais da operação de um equipamento, já que este vibrará em conformidade com as frequências características dos seus componentes. A amplitude de vibração de qualquer componente é única e permanece uniforme ao longo do tempo, conseqüentemente sua integridade não muda, nem sua dinâmica operacional. Sendo assim, as frequências de vibração podem ser isoladas e identificadas, processo conhecido como análise vibracional (SALUM, 2021).

A análise vibracional, é considerada a mais propícia para diagnosticar possíveis falhas em equipamentos que apresentam elemento rotativo, coletando dados sem sua parada. A utilização de sensores de vibração, é capaz de gerar um espectro do sistema, distinguindo a vibração característica de seus componentes e acompanhar sua condição, sendo possível diagnosticar o início de uma anormalidade, sendo que a amplitude da vibração começará a mudar. Assim sendo, o setor de manutenção poderá tomar providências estratégicas, como a de manter ou reduzir a carga operacional, adquirir um novo componente, programar a parada para realizar a substituição de alguma peça, e conseqüentemente prevenir o avanço da falha e/ou outros danos no equipamento (SALUM, 2021).

A proposta de análise de vibrações por sua vez foi escolhida por mostrar resultados pertinentes relacionados à modalidade de manutenção proposta para o trabalho. O intuito da atividade é que através de equipamentos possa-se capturar vibrações em sistemas mecânicos, onde serão medidas as vibrações emitidas pelo rotor do exaustor de uma caldeira a vapor e seus dados serão interpretados e analisados qualitativa e quantitativamente. Verifica-se também se as vibrações emitidas pelo sistema indicam um mal funcionamento, o qual poderia acarretar um defeito no equipamento. Assim, os responsáveis pelo equipamento, juntamente à área de planejamento, poderão providenciar a troca ou reparo do mesmo antes que ele venha a falhar.

A contínua mudança no mercado faz com que as organizações procurem novas formas de inovação, visto que o mercado necessita de ajustes. Kardec e Nascif (2009) atestam que as organizações, de maneira geral, vêm buscando incessantemente novas formas de ferramentas de gerenciamento de manutenção, que proporcionem uma competitividade maior através da qualidade e produtividade de seus produtos, processos e serviços.

Segundo Zaions (2013) a competição acirrada entre empresas determina um cenário onde não basta apenas produzir; é preciso também competir com qualidade e baixo custo.

Inconsequentemente as metas de uma empresa giram em torno de redução de custos, melhoria da qualidade dos produtos existentes e busca de novas criações de mercadorias, aumento progressivo e contínuo da produção, preservação do meio ambiente, aumento da vida útil dos maquinários e equipamentos. Além disso, ainda busca a redução dos índices de acidente de trabalho.

Segundo Souza (2009) a manutenção, deixou de ser considerada um centro de custos, sendo agora posicionada como um centro de negócios, com características de gerar lucros. A manutenção preditiva, por outro lado, parte do princípio da análise de condições de funcionamento da máquina para estabelecer a necessidade ou não de intervenção. Portanto, os custos com manutenção se restringem ao equipamento que visa a possibilidade de uma eventual falha.

A escolha do tema foi fundamentada no fato da manutenção preditiva ter uma grande importância no cenário industrial, capaz de prevenir possíveis falhas e paradas desnecessárias durante o processo de produção. O estudo do tema mostra e destaca a relevância e o impacto da análise de vibrações utilizando o método de manutenção preditiva, dispondo a possibilidade de economizar componentes ao antecipar o momento da quebra para substituição do equipamento. O principal objetivo deste trabalho é expor algumas necessidades específicas da manutenção e apresentar os benefícios da implantação deste sistema de manutenção em uma empresa geradora de energia através do vapor gerado na queima do bagaço da cana-de-açúcar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é a análise de vibração em rotores de exaustor de uma caldeira a vapor, como forma de manutenção preditiva do equipamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados de análise de vibração em um rotor do exaustor de uma caldeira a vapor.
- Analisar os dados coletados utilizando métodos de análise qualitativa e quantitativa.
- Verificar a eficiência do método de monitoramento das vibrações como método preditivo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MANUTENÇÃO

Entende-se manutenção como um processo de cuidados e procedimentos técnicos fundamentais para o bom funcionamento e reparos de máquinas, equipamentos, peças, moldes e ferramentas. A palavra vem do latim *manus tenere*, com significado de manter o que se tem, também é estabelecida de diferentes formas por vários órgãos certificadores e normalizadores

e sempre evidenciando a preocupação com o funcionamento das máquinas e dos equipamentos, especialmente no sistema produtivo (ALMEIDA, 2014).

A manutenção não atua somente em máquinas e equipamentos que se encontram em operação; atua também na geração de um projeto, pois a disposição de peças, a alcançabilidade dos conjuntos pelo mecânico e até pelo ajustamento das peças e dos componentes carecem obedecer a critérios para simplificar as operações de manutenção futuras (ALMEIDA, 2014).

De acordo com a norma técnica NBR 5462 (1994), o termo manutenção pode ser estabelecido como 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” (ABNT, 1994).

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

As máquinas, as ferramentas, os materiais e a tecnologia evoluíram a partir do surgimento da mecanização, industrialização e automatização. A manutenção inclusive evoluiu, no que se refere aos procedimentos práticos de montagem, desmontagem, substituição de peças e alinhamento, no aperfeiçoamento dos tipos de manutenção que atendessem a demanda industrial. Com isso, surgiram os tipos de Manutenção (ALMEIDA, 2014).

De acordo com Kardec e Nascif (2009), existe uma grande variedade de denominações para a atuação da manutenção. Essa variedade causa certa confusão na definição do tipo de manutenção. Desse modo, é de suma importância classificar de modo mais objetivo os diversos tipos de manutenção. Assim sendo, os autores dividiram as manutenções em cinco categorias principais:

- Manutenção Corretiva não Planejada;
- Manutenção Corretiva Planejada;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva;
- Manutenção Detectiva.

2.2.1 Manutenção Preditiva

As máquinas elétricas rotativas são frequentemente utilizadas nas indústrias de processamento, óleo e gás. Nestas indústrias, é necessário que as máquinas tenham um trabalho contínuo com um nível elevado. A performance das máquinas depende especificamente da disposição de seus componentes como rolamentos, transmissões, bombas, compressores, motores e geradores (PAUDYAL, ATIQUÉ e YANG, 2019).

A manutenção preditiva, diferente da manutenção preventiva, é caracterizada pela medição e análise de variáveis da máquina que possam apresentar uma falha inesperada. Assim, a equipe de manutenção pode se planejar para fazer a intervenção e aquisição de peças (custo da manutenção), gerando uma redução de gastos com estoque e evitando paradas indevidas (MARCORIN e LIMA, 2013).

Para manutenção preditiva embasada em condição, existem três elementos principais: (i) a busca e armazenamento de informações, (ii) o condicionamento e extração de atributos de aprendizagem para dados adquiridos, e (iii) o processo da escolha de recomendação das ações de manutenção por meio de diagnósticos ou prognóstico de falhas. (HENG et al., 2009).

De acordo com Neto (2017) a prática da manutenção preditiva reduzirá significativamente o número de manutenções corretivas e preventivas. A seguir têm-se os principais benefícios da Manutenção Preditiva:

- Fim das trocas de componentes e intervenções preventivas desnecessárias;
- Redução do custo e dos prazos de intervenção;
- Aumento da disponibilidade de equipamentos e da segurança durante a operação;
- Diminuição das quebras de equipamentos durante operação, o que danificaria de maneira secundária muitos componentes.

2.3 VIBRAÇÕES

Vibração é a ação dos componentes de uma máquina quando submetidos a forças internas e externas. Algumas falhas mecânicas ocasionam vibrações excessivas características, logo é uma técnica muito útil de acompanhamento da condição da máquina. O sinal gerado na coleta de vibração mecânica é uma onda mecânica e pode ser determinada por sua amplitude e frequência (MAIS, BRADY, 2012).

Frequência é a quantidade que um comportamento se repete em um determinado período de tempo, sendo um bom indício do tipo e causa da falha que está acontecendo na máquina (MAIS, BRADY, 2012).

A amplitude é o tamanho do sinal, sendo um bom indicativo da seriedade da falha que está acontecendo na máquina, quanto maior a amplitude, maior a vibração e maior o problema no equipamento (MAIS, BRADY, 2012).

2.3.1 Análises de Vibrações

O assunto manutenção preditiva está diretamente ligado a análise de vibração, dado que todo e qualquer equipamento está submetido a uma vibração natural quando se encontra em funcionamento. De acordo com Nascimento (2011) a análise de vibração pode ser considerada como o processo onde as falhas em determinados elementos móveis de uma máquina ou equipamento são descobertas por meio da taxa de variação das forças dinâmicas geradas.

Tais forças comprometem o nível de vibração, sendo capaz de ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem atrapalhar o funcionamento dos mesmos. Ter acesso a estes níveis de vibração, facilita a avaliação do quanto seu equipamento ou máquina está ultrapassando os valores. Dentre as diversas fontes de vibração as mais comuns, e que podem ser apontadas como as principais causadoras dos problemas das vibrações mecânicas, são o desbalanceamento, desalinhamento, folgas generalizadas, dentes de engrenagens, rolamentos, corrente elétrica e o campo elétrico desequilibrado (NASCIMENTO, 2011).

De acordo com Souza (2009) o acompanhamento e a análise de vibração tornaram-se um dos mais importantes métodos e está concentrada principalmente nos equipamentos rotativos. Estes parâmetros de vibração associados as máquinas rotativas são frequentemente relacionadas em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, sendo assim estas três variáveis destacadas mostram o quanto o equipamento está vibrando. Porém, dentre as análises de vibração se encontra outra grande variável que é a frequência, que aponta a origem da vibração, sendo esta a fase que indica onde o ponto mais pesado está em relação ao sensor de vibração.

A análise de vibração possui fundamentos técnicos e históricos sólidos, que podem comprovar o alto valor das informações que são adquiridas. Existe uma vastada quantidade de dados disponíveis a respeito sua aplicação. Essa técnica apresenta excelentes resultados, permitindo obter informações importantes a respeito da estabilidade das máquinas. (NETO, 2017).

2.3.1.1 Gráficos utilizados em análises de vibrações

Em análise de vibração, são utilizados três principais gráficos para acompanhar o estado de uma máquina: gráficos de tendência do valor global, espectrais FFT (do inglês *Fast Fourier Transform*) e formas de onda (GALLI, 2017).

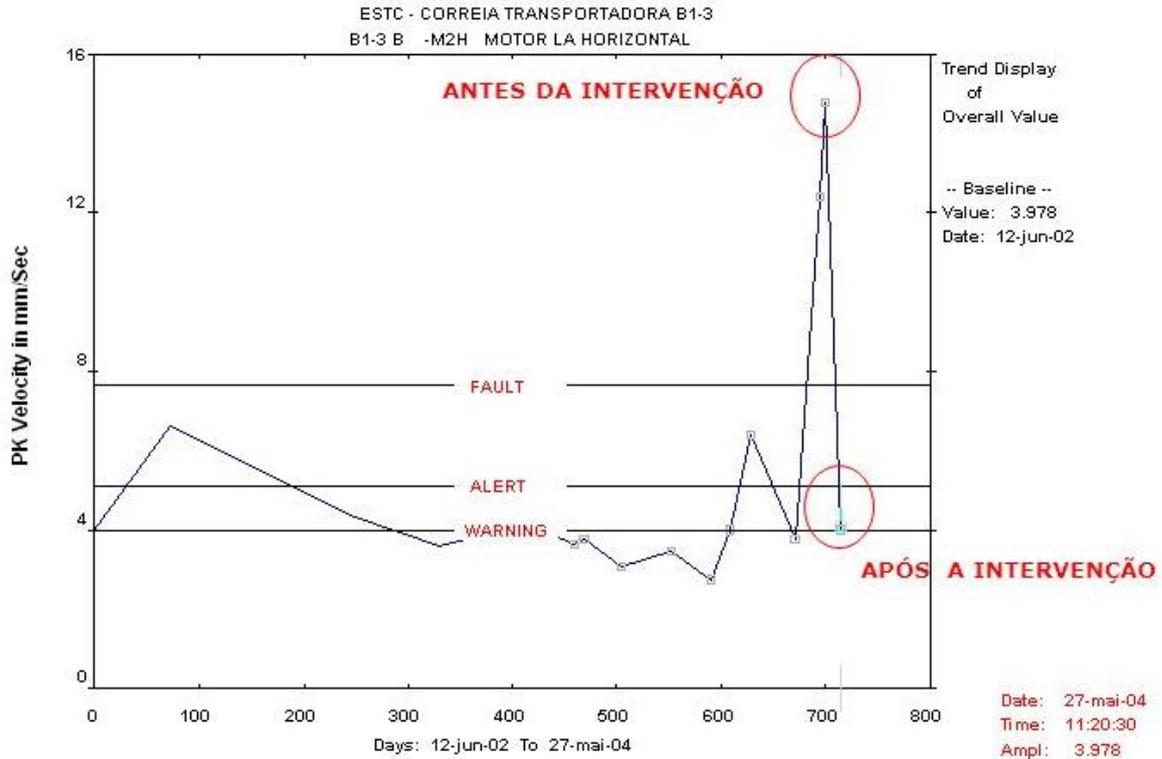
2.3.1.1.1 Gráficos de tendência

Nos gráficos de tendência do valor global, é representada uma curva das vibrações em uma faixa de frequências (vibração) determinada em função do tempo. Em termos gerais, são gráficos para proporcionar uma visualização rápida da condição da máquina, onde pequenas mudanças no valor global podem significar grandes mudanças na condição da máquina. Em contrapartida, não indicam a causa da vibração (GALLI, 2017).

Gráficos de tendência são provavelmente a forma mais eficiente e confiável de avaliar-se a condição de vibração, pois compara as medições mais recentes com anteriores da própria máquina em relação ao tempo (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2000).

Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de gráfico de tendência evidenciando a velocidade, em mm/s, ao longo dos dias, entre as datas de 12 de junho de 2002 e 27 de maio de 2004.

Figura 1 – Gráfico de tendência FFT.



Fonte: SAADE, 2014.

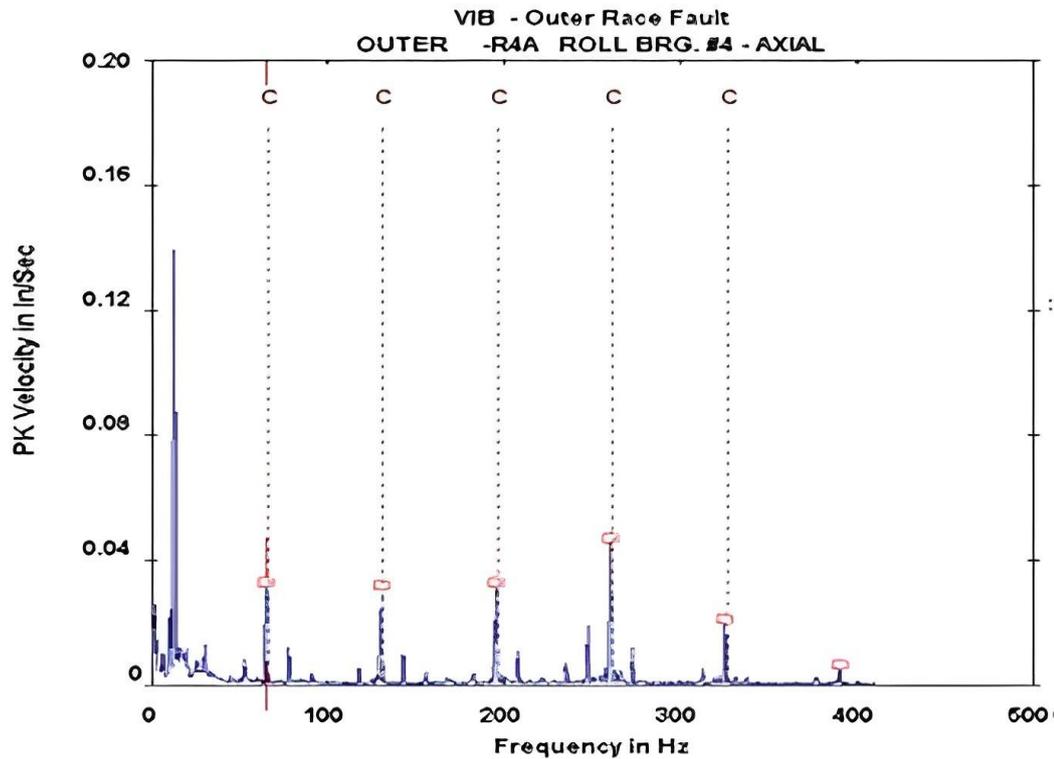
2.3.1.1.2 Gráficos espectrais FFT

Nos gráficos espectrais FFT o sinal de vibração é apresentado como um componente de frequências. No geral, esse tipo de gráfico é utilizado para determinar a causa das vibrações, pois fornece a capacidade de análise por frequência (GALLI, 2017).

A Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*) de um sinal é uma forma de ver o sinal de vibração de uma maneira mais útil para análise de vibração. Se existir um problema no maquinário, o espectro FFT fornece informações sobre a localidade e causa do problema e, ainda, fazer previsões do tempo até o problema se tornar crítico. Sabe-se que certos problemas de máquinas ocorrem em certas frequências, portanto, em uma análise espectral FFT, procura-se por mudanças de amplitude em certas frequências (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2000).

Na Figura 2 observa-se um exemplo de gráfico de espectro de frequência FFT, onde é evidenciada a velocidade, em in/s (polegada por segundo), em função da frequência, em Hz (Hertz).

Figura 2 – Gráfico de espectro de frequência FFT.



Fonte: Aroeira, 2019.

2.3.2 Condições de alarme de vibração dos equipamentos

Os alarmes utilizados são designados em função do histórico do equipamento. Quando não há histórico do equipamento, a severidade de vibração é avaliada segundo a magnitude de vibração, imposta pela norma ISO 10816-3, designada para máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 r/min e 15 000 r/min quando medidas *in situ*, a qual estabelece os alarmes conforme a Figura 3, que pode variar de acordo com a classe do equipamento e sua velocidade de rotação R.M.S. (*Root Mean Square*) em mm/s, sendo considerado valores de vibração operacionais na cor verde (A), operação contínua e sem restrições em amarelo (B), condição aceitável apenas por um período limitado de tempo em laranja (C) e, finalmente, valores de vibração perigosos para falha iminente na cor vermelha (D).

Figura 3 – Condições de alarme de acordo com a ISO 10816-3.

Norma ISO 10816 - Classe de equipamento				
R.m.s (mm/s)	Classe I Máq. Pequena	Classe II Máq Média	Máquinas Grandes	
			Classe II fundação rígida	Classe IV fundação flexível
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	B	B
4,5				
7,1	D	D	C	B
11,2			C	
18			D	C
28			D	D
45			D	

Zona A Verde: valores de vibração operacionais.
 Zona B Amarelo: Operação contínua sem restrições
 Zona C Laranja: Condição é aceitável apenas por um período limitado de tempo.
 Zona D Vermelha: Valores de vibração perigosos – falha iminente.

Fonte: ABNT ISO/IEC 10816-3.

2.4 ROTOR DO EXAUSTOR DE UMA CALDEIRA A VAPOR

Os exaustores industriais são equipamentos que têm a finalidade de retirar ar do ambiente através do acionamento de um motor elétrico. Eles retiram calor e impurezas do ambiente. São utilizados para a aeração de ambientes com excesso de: temperatura, umidade, vapores, fumaças, mofos, odores e outros poluentes (ARAÚJO, 2007).

Segundo Santos (2019), o rotor é o principal elemento de uma máquina de fluxo, pois é ele o responsável por intercambiar a energia mecânica em energia para o fluido. A forma com que é construído reflete diretamente na proporção de energia em forma de pressão ou velocidade cedida ao fluido.

Figura 4 – Rotor de exaustor



Fonte: Brasfaiber, 2022.

2.5 DESBALANCEAMENTO

O desequilíbrio é a maior consequência de vibração em máquinas rotativas, fenômeno descrito pelo desequilíbrio de massa em relação ao eixo rotativo. Além de defeitos nas matérias-primas e na montagem, as inevitáveis assimetrias e desvios de forma também podem causar desordem no centro da massa. Quando o sistema está desequilibrado, ele produzirá um mau comportamento, que pode causar diversos tipos de danos a outros dispositivos interconectados (HOLANDA, 2016).

2.5.1 Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático acontece quando o eixo principal de inércia do rotor está deslocado paralelamente em relação ao seu eixo geométrico. O nome é dado a este tipo de caso por ser identificado mesmo em um rotor em repouso, onde o ponto com a massa desbalanceada se posiciona na parte inferior do sistema por causa da ação da gravidade (CAMPOS, 2017).

2.5.2 Desbalanceamento dinâmico

Quando o eixo principal de inércia e o eixo de rotação não estão lado a lado e nem se cruzam no centro de gravidade do rotor é conhecido como desbalanceamento dinâmico ou desbalanceamento em dois planos. O desbalanceamento dinâmico geralmente é notado em rotores tipo corpo rígido alongado, ao longo de todo seu comprimento (COELHO, 2013).

2.6 BALANCEAMENTO

O balanceamento consiste na técnica de correção de inércia indesejáveis. Ele é o respaldo, o toque final, de todo bom projeto e assume um papel importante na linha de

fabricação de elementos que giram, bem como na atividade de manutenção de máquinas rotativas (SOEIRO, 2008).

2.6.1 Balanceamento Estático

Para a realização do balanceamento estático, é preciso criar um novo centro de gravidade para o rotor que estará localizado sobre o eixo de giração. Isso é feito pela adição (ou remoção) de uma massa ao sistema. Essa massa deve ser instalada em uma linha que passa através do centro de gravidade original do rotor e que seja perpendicular ao eixo de giração (SOEIRO, 2008).

2.6.2 Balanceamento Dinâmico

Para que seja alcançado o balanceamento dinâmico, é necessário promover uma rotação do eixo principal de inércia do rotor de modo a ajusta-lo com o eixo de rotação. Assim, é preciso fazer o uso de dois planos de balanceamento, um a cada lado do centro de gravidade do rotor, onde serão posicionadas massas de correção (SOEIRO, 2008).

3 METODOLOGIA

3.1 ORIGEM DOS DADOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um estudo de caso em dados coletados de medições de vibrações em sistemas rotativos, em conjunto com a empresa CSA, especializada em análise de vibrações, atuante na cidade de Goianésia-GO e seus arredores. A análise de vibrações foi realizada em uma empresa produtora de energia através da queima do bagaço de cana-de-açúcar, nas imediações da cidade de Goianésia, no estado de Goiás. O equipamento acompanhado em questão é um rotor do exaustor de uma caldeira de vapor, tendo supervisão em um período de abril de 2021 a julho de 2022. Também foram utilizados equipamento e software específicos para a coleta dos dados, os quais serão mostrados a seguir.

3.2 EQUIPAMENTO DE LEITURA

O instrumento utilizado na obtenção dos espectros de vibração é o coletor de dados avançado, analisador de FFT Microlog Analyzer, série GX modelo CMXA 75, da marca SKF, conforme mostra a Figura 5. O equipamento possui sensores CA/CC (corrente contínua e corrente alternada), sensores de pressão e temperatura e tacômetro integrado, este sendo um sensor dispositivo integrado ao instrumento, responsável por medir a velocidade de rotação de um equipamento.

Figura 5 – SKF Microlog Analyzer, série GX

Fonte: Primeira Linha, 2021.

3.3 SOFTWARE @PTITUDE ANALYST

O *software* usado para leitura dos espectros de vibração é o @ptitude Analyst, também da SKF. O *software* foi programado para disparar em dois alarmes quando a vibração lida atingir limites classificados como perigosos, considerando o histórico recente do equipamento para a determinação dos mesmos, cujos valores são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de disparo dos alarmes.

Alarme	2021	2022
A1	5 mm/s	5 mm/s
A2	10 mm/s	11 mm/s

Fonte: Própria autoria, 2023.

3.4 ROTOR

O rotor analisado está acoplado a um exaustor de uma caldeira a vapor, que produz vapor para geração de energia e ar comprimido. Seu funcionamento se dá pela rotação de suas pás, acopladas a um exaustor, para assim gerar energia e ar comprimido. O rotor estudado é do tipo fechado, no qual se encontra um disco onde prende-se as pás e uma coroa circular também presa as pás.

Na Figura 6 é mostrado, durante uma parada de manutenção programada, o rotor sendo içado para ser instalado na carenagem do exaustor.

Figura 6 – Rotor estudado sendo içado para ser acoplado ao exaustor.

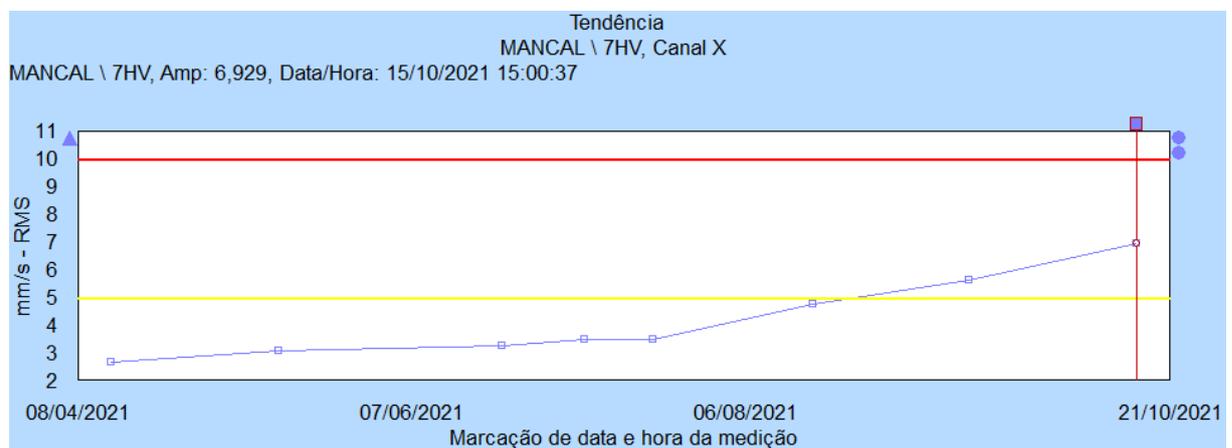


Fonte: Autoria própria, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se a seguir o histórico de desbalanceamento do rotor do exaustor da caldeira a vapor ao longo do ano de 2021, tendo início na data de 08/04/2021 até a data de 21/10/2021, onde pode-se observar um aumento progressivo da amplitude de vibração do mesmo, até o momento em que ultrapassa o sinal de alerta, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Gráfico de tendência do histórico de vibração do rotor ao longo do ano de 2021.



Fonte: Autoria própria, 2022.

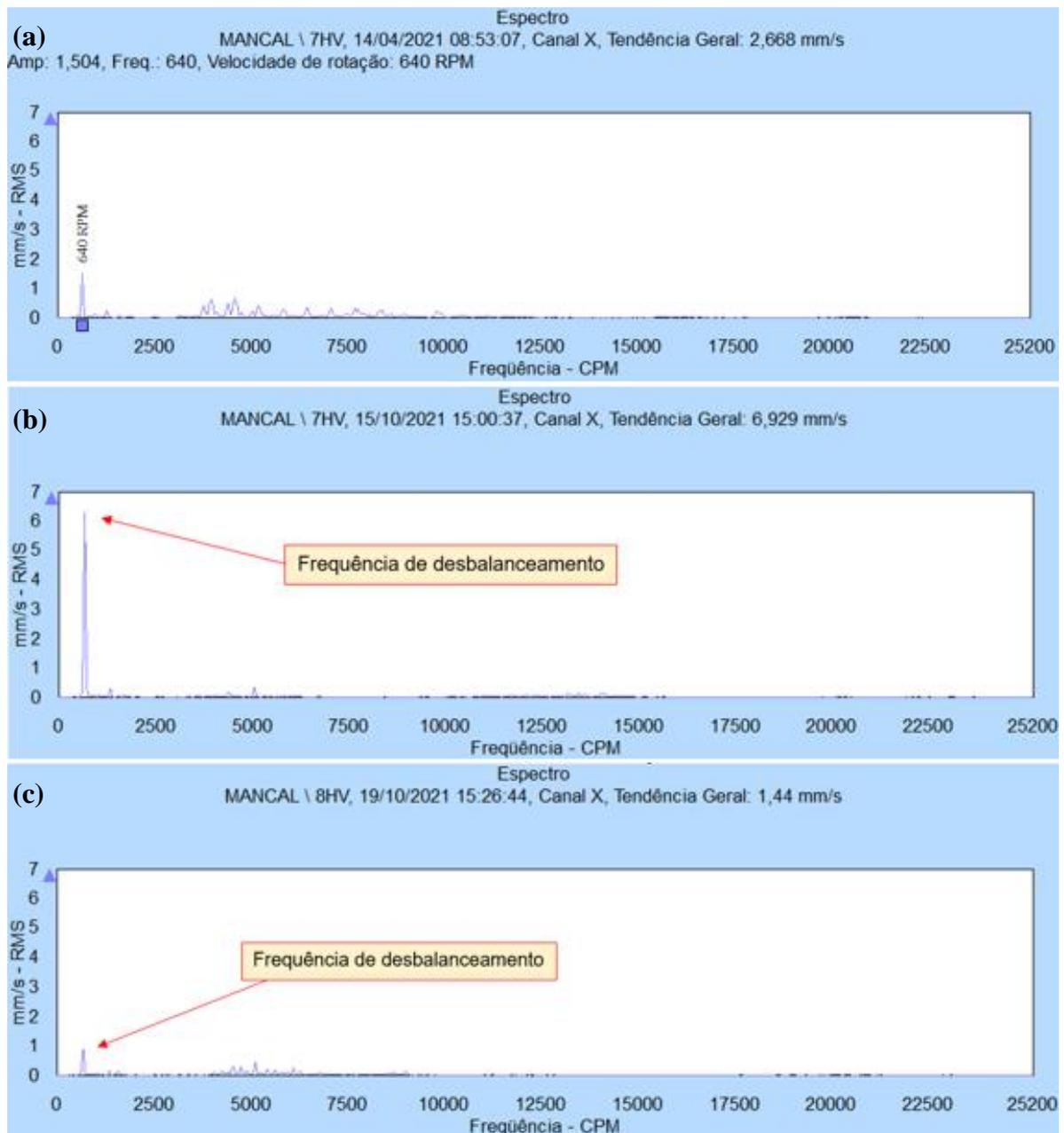
Na Figura 7, pode-se observar um aumento progressivo da vibração causada no rotor ao longo dos meses de medição, o que veio a acarretar a necessidade de balanceamento ao final do acompanhamento.

Na Figura 8 pode-se observar o espectro de frequência do equipamento na data de 14/04/2021 (Figura 8-a), o qual apresentava uma amplitude de rotação de 2,668 mm/s operando à frequência de ressonância, 640 rpm. O espectro de frequência observado demonstra que a mesma estava em bom estado. Observa-se a velocidade da rotação do exaustor de 640 rpm (frequência de ressonância do equipamento) com frequência de vibração de 2,668 mm/s, considerada baixa, ainda distante da condição de alarme A1 (5 mm/s).

O espectro de vibração medido em 15/10/2021 (Figura 8-b), mostrado no gráfico indica um aumento da frequência, o que significa um aumento drástico na vibração do equipamento. O espectro de vibração medido nessa data alcança o alarme A1, com uma frequência de 6,929 mm/s de rotação do exaustor, em seu ponto de ressonância. Como só aparece a frequência de rotação do exaustor, foi diagnosticado um desbalanceamento do mesmo. Desta forma foi recomendado pela empresa CSA, que coleta e analisa os dados de vibrações, o balanceamento dinâmico do rotor.

Seguindo a recomendação da empresa responsável pela coleta e análise de vibrações, a empresa geradora de energia e ar comprimido realizou o balanceamento dinâmico do rotor em 19/10/2021 (Figura 8-c).

Figura 8 – Espectros de vibração do rotor, coletados em: (a) 14/04/2021, (b) 15/10/2021 e (c) 19/10/2021.

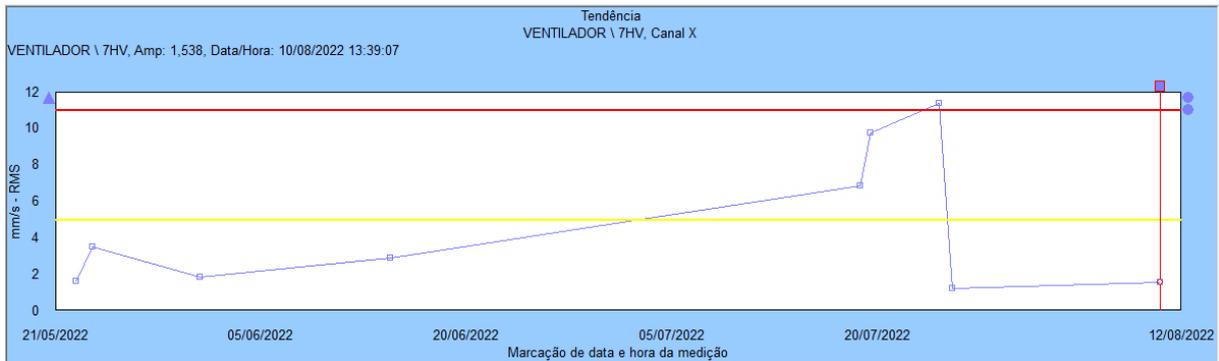


Fonte: Autoria própria, 2022.

Após a realização do balanceamento no rotor do exaustor, a intensidade de vibração diminuiu para 1,4 mm/s no ponto de ressonância do mesmo, restando apenas o desbalanceamento residual, que está dentro do limite tolerável.

Na Figura 9 é possível observar o gráfico de tendência do histórico de vibração do rotor do exaustor da caldeira ao longo do ano de 2022, tendo início em 23/05/2022 até a data de 26/07/2022, o qual evidencia uma evolução contínua, tendo um aumento brusco a partir da medição feita em 19/07/2022.

Figura 9 – Gráfico de tendência do histórico de vibração do rotor ao longo do ano de 2022.



Fonte: Autoria própria, 2022.

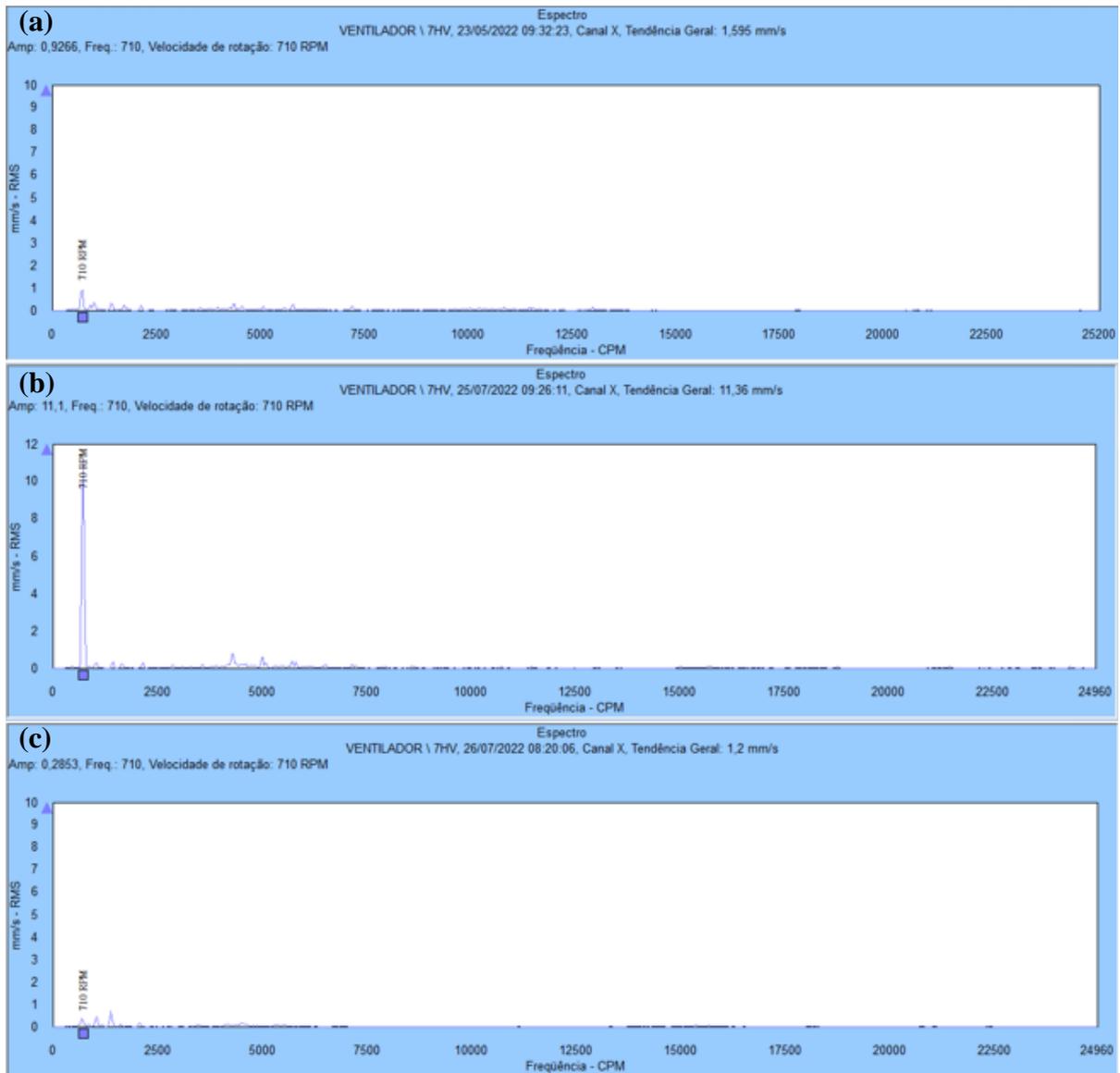
Nos espectros da Figura 10, ao longo do tempo, nota-se uma velocidade diferente do ano anterior, sendo 710 RPM, que é a frequência de rotação que o rotor do exaustor trabalhou no ano de 2022. Isso evidencia um problema de desbalanceamento, que no caso do exaustor em estudo é provocado em função do desgaste das pás do rotor, conforme foi observado posteriormente no mesmo ano.

Na Figura 10 é possível observar a medição em 3 momentos ao longo do ano de 2022, onde percebe-se o equipamento em perfeito funcionamento, em 23/05/2022 (Figura 10-a) no início do acompanhamento, com amplitude de vibração de 1,595 mm/s.

O segundo momento notável na medição da vibração acontece em 25/07/2022 (Figura 10-b), quando é registrada a maior amplitude de vibração do ano de 2022, no valor de 11,36 mm/s. Neste episódio foi observado considerável desgaste nas pás do rotor, conforme pode-se observar na Figura 11, sendo então recomendado o balanceamento dinâmico do rotor para amenização da vibração no equipamento.

O último espectro de vibração, datado de 26/07/2022 (Figura 10-c), foi coletado logo após ser realizado o balanceamento do rotor. É possível observar uma melhora considerável na amplitude de vibração, com tendência geral de 1,2 mm/s, sendo apenas 0,28 mm/s de desbalanceamento residual.

Figura 10 – Espectros de vibração do rotor, coletados em: (a) 23/05/2022, (b) 25/07/22 e (c) 26/07/2022.



Fonte: Autoria própria, 2022.

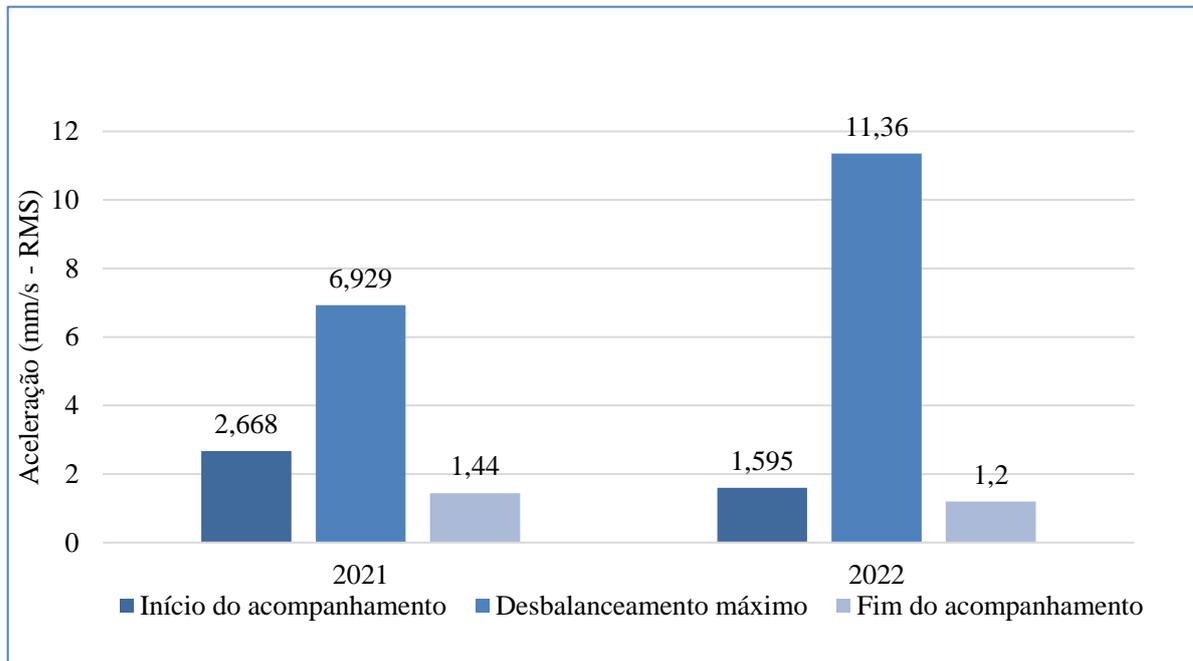
Após averiguação, constatou-se que um dos motivos para a alta repentina da amplitude de vibração ocasionada no mês de julho foi devido ao desgaste nas pás do rotor, conforme é evidenciado na Figura 11.

Figura 11 – Desgaste observado nas pás do rotor, após aumento brusco da vibração.



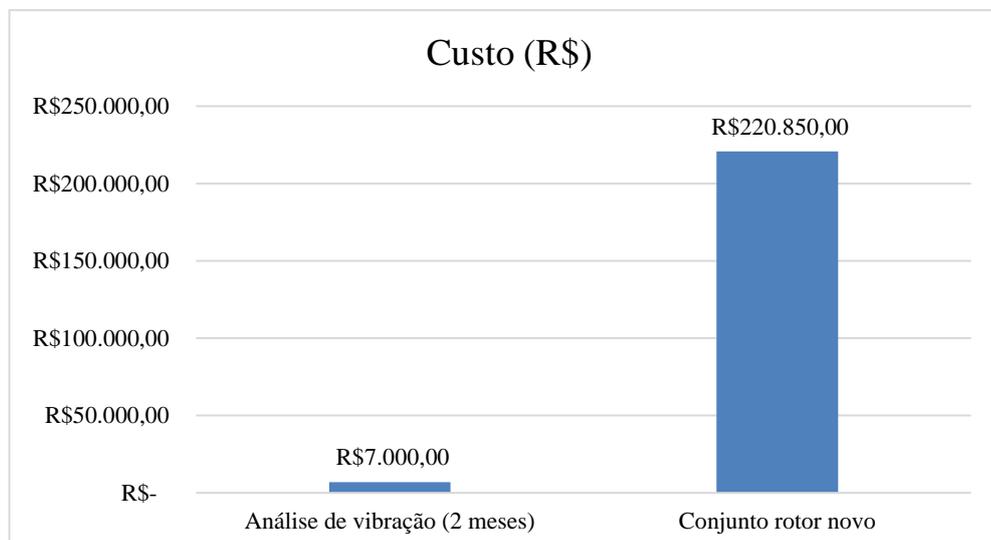
Fonte: Aatoria própria, 2022.

A Figura 12 mostra a diferença de velocidade do rotor no início do monitoramento até o pico de vibração, e logo em seguida a medição após o balanceamento, em ambos os anos acompanhados. São comparados os envelopes de aceleração do equipamento ao longo dos dois anos de acompanhamento (2021 e 2022). Ao início de cada ano, ambos apresentaram frequência de vibração dentro dos parâmetros adequados de operação. Na coluna do meio, que representa o pico máximo de desbalanceamento em cada ano, é possível notar um agravamento no pico de desbalanceamento do ano de 2022 em relação ao ano de 2021, muito provavelmente devido ao aumento na velocidade de trabalho do rotor, que passou de 640 rpm para 710 rpm. Observa-se na última coluna (fim do acompanhamento) a frequência de vibração medida após o balanceamento dinâmico, onde ambos apresentam uma frequência de vibração satisfatória.

Figura 12 – Gráfico de variação da aceleração.

Fonte: Autoria própria, 2023.

De acordo com a empresa CSA, responsável pela análise de vibrações na empresa geradora de energia, o valor cobrado pela mesma pelo acompanhamento das vibrações do equipamento por um período de dois meses custa para a contratante o valor de R\$ 7 mil, enquanto o valor de um rotor novo custará para a mesma o valor de R\$ 220.850,00, conforme orçamento disponibilizado pela empresa. Isso mostra a importância da análise de vibrações para a diminuição de custos com manutenção na empresa. A Figura 13 evidencia graficamente a grande diferença de custos para a empresa a análise de vibrações (por um período de 2 meses) e um conjunto novo de rotor, ressaltando a importância da análise de vibrações como método preditivo na redução de custos de manutenção para a empresa.

Figura 13 – Comparação de custos da análise de vibrações versus um novo conjunto de rotor.

Fonte: Autoria própria, 2023.

5 CONCLUSÕES

O acompanhamento periódico de vibrações é capaz de identificar inúmeras falhas de cunho mecânico, tanto folgas, desalinhamento e desbalanceamento, quanto falhas onde tem-se frequências de vibração maiores, como em mancais de rolamento. O monitoramento da vibração de um equipamento permite saber as condições em que o equipamento está trabalhando.

Dentre os resultados obtidos nas avaliações dos anos de 2021 e 2022, os seus picos de desbalanceamento tiveram uma diferença significativa, essa diferença se deu, muito provavelmente, devido ao aumento da velocidade de rotação, que no ano de 2021 era 640 rpm e no ano de 2022 foi alterada para 710 rpm.

Ao optar pela análise de vibrações como método de manutenção preditiva, a empresa geradora de energia economiza anualmente em torno de 80%, uma vez que o custo do acompanhamento anual das vibrações do rotor fica em torno de R\$ 42 mil, menos de um quinto do valor de um conjunto novo para a peça, que custa em torno de R\$ 220.850,00.

Considerando os resultados obtidos através do estudo dos dados presentes neste trabalho, é possível concluir que a análise de vibração como forma de manutenção preditiva é uma ferramenta de suma importância ao se montar estratégias de manutenção, prevenção de falhas e diminuição de custos.

Ao longo do estudo de caso das vibrações do exaustor da caldeira, foram identificadas dois defeitos por desbalanceamento dinâmico no rotor. O objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível perceber a eficiência do método, dado que a falha foi interceptada antes de causar maiores danos ao rotor, possibilitando a realização do reparo sem a necessidade de troca da peça, o que ocasionaria um alto dispêndio para a empresa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. **Manutenção mecânica industrial: Conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Érica, 2014.
- ARAÚJO, L. P. **Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado**. São Paulo: Ed. Esev, 2007.
- AROEIRA, C. **Análise de vibrações e envelope**. DMC, 2019. Disponível em: <<https://www.dmc.pt/analise-de-vibracoes-e-envelope/>>. Acesso em: 16 de novembro de 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/IEC 10816-3:2009: Vibração mecânica — Avaliação da vibração da máquina por medições em peças não rotativas — Parte 3: Máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 r/min e 15 000 r/min quando medidas *in situ***. Rio de Janeiro, 2009.
- CAMPOS, R. N. **Análise Experimental de Balanceamento de Rotores Pelo Método de Otimização “Four Run Method Accelerated”**. Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Brasília, 2017.
- COELHO, G. A. T. **Balanceamento Dinâmico de um Simulador de Máquinas Rotativas**. Projeto de graduação submetido ao corpo docente do departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval. Rio de Janeiro, 2013.
- GALLI, V. B. **Manutenção Preditiva por Análise de Vibração Mecânica em Máquinas Rotativas: Estudo de caso**. Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica. Guaratinguetá, 2017.
- HOLANDA, S, M, S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Dissertação submetida ao PPGEM com parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica área de Materiais e Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Recife, 2016.
- HENG, A. et al. Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Brisbane, n. 23, p. 724-739, 2009.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção Função Estratégica**, 2ª ed, 1ª Reimpressão 2009. Editora Quality Mark, Rio de Janeiro, Coleção Manutenção, Abraman.
- MAIS, J.; BRADY, S. **Introduction guide to vibration monitoring: measurements, analysis, and terminology**. EUA: SKF Reliability Systems, may. 2002. 30p.
- Manutenção Preditiva: o que é, como funciona, vantagens e dicas. TOTVS, 15 de março de 2021. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/manutencao->

SOUZA, Valdir Cardoso. **Organização e Gerência da Manutenção – Planejamento, Programação e Controle da Manutenção**. 3ª Ed, revisada. São Paulo: All Print, 2009. 285 p.

ZAIIONS, Douglas Roberto. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade em uma Planta de Celulose e Papel**. 2013.219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.