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

PREDICTIVE MAINTENANCE THROUGH VIBRATION ANALYSIS IN BOILER EXHAUST ROTOR

Lenise Ribeiro da Silva ¹, Matheus Batista Lopes ², Ivandro José de Freitas Rocha ³,
Ariane Martins Caponi Lima ⁴, Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes ⁵

¹ Graduação em Engenharia civil/FACEG: leniseribeiro23@gmail.com

² Graduação em Engenharia civil/FACEG: lopes2807@outlook.com

³ Professor do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: ivandro.rocha@evangelicagoianesia.edu.br

⁴ Professora do curso de Engenharia Mecânica/FACEG: ariane.lima@faceg.edu.br

⁵ Professora do curso de Engenharia Mecânica/FACEG: mariaeroing@gmail.com

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, portanto, é uma preocupação que passou a existir junto com a criação da indústria. A expansão das indústrias fez necessária a realização constante de manutenção. Este fato fez com que as áreas de planejamento percebessem que havia melhores formas de realizar a manutenção, que não fosse somente quando o equipamento apresentasse defeito (manutenção corretiva) ou simplesmente trocasse tudo 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 olho nu 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 estudado 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 estudo de caso das vibrações do exaustor da caldeira, foram identificadas duas falhas por desbalanceamento dinâmico no rotor. Em suma, 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, dando a chance da equipe de manutenção se preparar para o reparo.

Palavras-chaves: Análise vibracional; Equipamentos rotativos; Manutenção Preditiva.

Abstract: The condition of a machine affects the quality and efficiency of its work and allowing a problem to reach a critical state results in negative consequences, potentially causing equipment loss and extensive downtime in a factory. Machine maintenance, therefore, is a concern that came into existence along with the creation of the industry. The expansion of industries has made it necessary to carry out constant maintenance. This fact made the planning areas realize that there were better ways to carry out maintenance, other than just when the equipment was defective (corrective maintenance) or simply changing everything to avoid defects (preventive maintenance). Bearing in mind that predictive maintenance, based on vibration analysis, is extremely important to detect defects imperceptible to the naked eye or audible tests. The objective of this work is a case study that shows that with the implementation of a predictive maintenance system that uses vibration analysis, it is possible to prevent failures and breakdowns in equipment, thus reducing the time and cost for identification and repair. of failures. For this purpose, an exhaust fan rotor from a boiler located in the industrial area of a company that generates energy was studied using the steam generated by burning sugarcane bagasse. Throughout the case study of boiler exhaust vibrations, two faults due to dynamic unbalance in the rotor were identified. In short, the objective of the work was achieved, as it was possible to perceive the efficiency of the method, given that the fault was intercepted before causing further damage, giving the maintenance team the chance to prepare for the repair.

Keywords: Vibrational analysis; Rotating equipment; Predictive Maintenance.

INTRODUÇÃO

Em um meio de produção automatizada, a eficiência do produto depende, entre outros fatores, do desempenho do equipamento que o fábrica. A irregularidade das condições do equipamento leva a desvios no processo de produção e diminuição de qualidade. Somente a manutenção correta pode garantir que o processo não perderá qualidade devido a desvios gerado pelo equipamento [1].

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 [1].

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 [2].

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 [3].

Contudo, 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 [3].

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 funcionamento anormal, o qual poderia acarretar um defeito no equipamento. Assim, os responsáveis pelo equipamento, juntamente com a área de planejamento, poderão providenciar a troca ou reparo do equipamento antes que ele venha a falhar.

REFERENCIAL TEÓRICO

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 [4].

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 [4].

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” [5].

Dessa maneira, 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 [4].

De acordo com Kardec e Nascif, existe uma grande variedade de denominações para denominar a atuação da manutenção [5]. Não eventualmente, 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.

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 destas, dependem especificamente da disposição de seus componentes como rolamentos, transmissões, bombas, compressores, motores e geradores [7].

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), ocasionando na redução de gastos com estoque e evitando paradas indevidas [1].

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 [8].

De acordo com Neto a prática da manutenção preditiva reduzirá significativamente o número de manutenções corretivas e preventivas [9]. 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.

Quando falamos sobre manutenção preditiva, o primeiro pensamento que vem à cabeça é sobre 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 a análise de vibração pode ser considerada como o processo em que as falhas em determinados elementos móveis de uma máquina

ou equipamento são descobertas por meio da taxa de variação das forças dinâmicas geradas [10].

Tais forças comprometem o nível de vibração, sendo capaz de ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem atrapalhar o funcionamento dos mesmos. Quando temos 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 [10].

De acordo com Souza o acompanhamento e a análise de vibração tornaram-se um dos mais importantes métodos e está concentrada principalmente nos equipamentos rotativos [11]. 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. Sem contar no fato de existir 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 [9].

Em análise de vibração, são utilizados três principais gráficos para acompanhar o estado de uma máquina: gráficos de tendência do valor global, espectrais FFT e formas de onda [12].

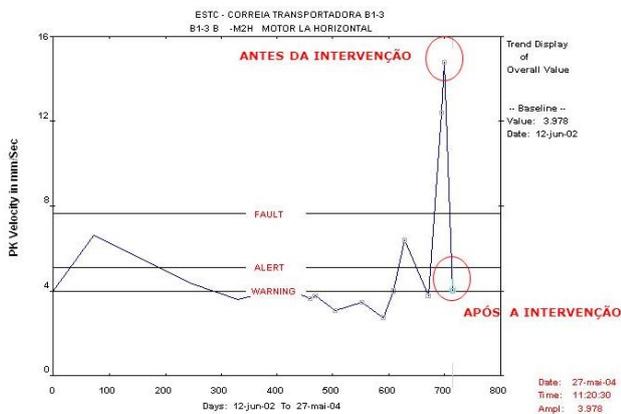
Nos gráficos de tendência do valor global, é representada uma curva das vibrações em uma faixa de frequências determinada, em função do tempo. Em termos gerais, são gráficos para proporcionar uma visualização

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 [12].

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 [13].

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 [14].



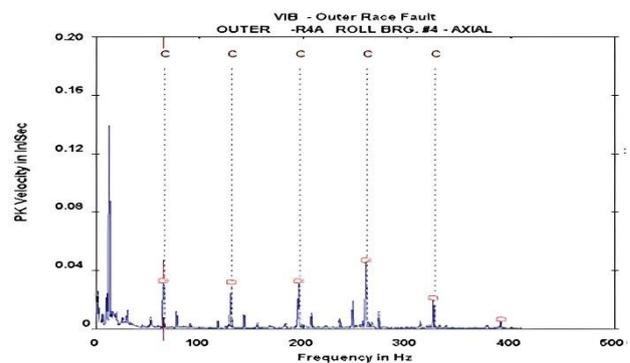
Nos gráficos espectrais FFT mostra o sinal de vibração como um componente de frequências. No geral, esse tipo de gráfico é utilizado para determinar a causa das vibrações, pois fornece a capacidade de análise por frequência [12]

A Transformada Rápida de Fourier de um sinal é uma forma de ver o sinal de vibração de uma maneira mais útil para análise de vibração. É uma ferramenta extremamente útil, pois 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 [13].

Na figura 2 é possível observar 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 [15].



Os alarmes utilizados são designados em função do histórico do equipamento. Entretanto, 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 (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 [16].

R.m.s (mm/s)	Norma ISO 10816 - Classe de equipamento			
	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	A	A	A	A
0,71	A	A	A	A
1,12	B	A	A	A
1,8	B	B	B	A
2,8	C	B	B	A
4,5	C	C	B	B
7,1	D	C	C	B
11,2	D	D	C	C
18	D	D	D	C
28	D	D	D	D
45	D	D	D	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.

Por outro lado, 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 [17].

Segundo Santos, 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 [18].

Figura 4 – Rotor de exaustor [18]



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, tolerâncias 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 [19].

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 [20].

O formato onde 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 conhecida 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 [21].

O balanceamento consiste na técnica de correção ou eliminação das excitações 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 [22].

Para a realização do balanceamento estático, é preciso criar um novo centro de gravidade para o rotor que estará localizado sobre o eixo de rotação. 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 rotação [22].

Para que seja alcançado o balanceamento dinâmico, é necessário promover uma rotação do eixo principal de inércia do rotor de modo a ajustá-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 [22].

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um estudo de caso em dados coletados de medições de vibrações em sistemas rotativos. 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.

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

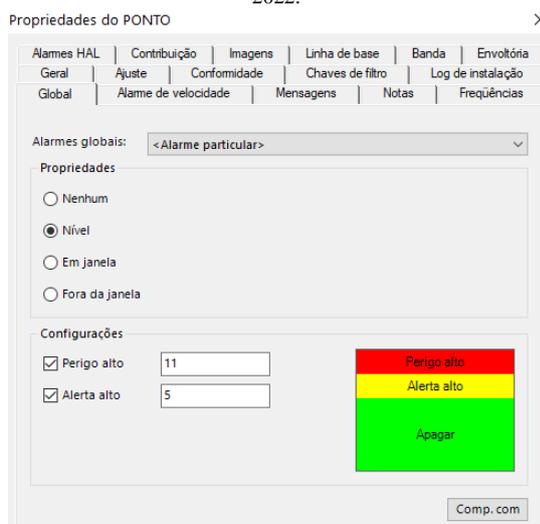
equipamento possui sensores CA/CC, sensores de pressão e temperatura e tacômetro integrado.

Figura 5 – SKF Microlog Analyzer, série GX [23]



O software usado para leitura dos espectros de vibração é o @ptitude Analyst, também da SKF. O software foi programado para disparar dois alarmes quando a vibração lida atingir limites considerados perigosos, sendo considerado o histórico do equipamento para a determinação dos alarmes. Desta forma, no ano de 2021 foram considerados os seguintes alarmes: o primeiro chamado A1, que dispara quando o espectro de vibração alcançar 5 mm/s, e A2 quando o mesmo chegar a atingir 10 mm/s. Já no ano de 2022, após análise do histórico do equipamento, o alarme A1 continuou situado em 5mm/s, e a condição de alerta do alarme A2 aumentado para 11mm/s, conforme observado na figura 6.

Figura 6 – Layout do software mostrando os alarmes adotados no de 2022.



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 7 é mostrado, durante uma parada de manutenção programada, o momento em que o rotor está sendo içado para ser alocado na carenagem do exaustor.

Figura 7 – Rotor estudado sendo içado para ser acoplado ao exaustor.

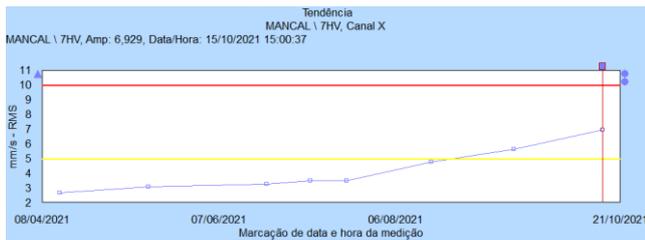


RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se a seguir o histórico de vibração 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 8.

No gráfico de tendência da figura 8, pode-se observar um aumento progressivo da amplitude de vibração ao longo dos meses de medição, o que veio a acarretar a necessidade de balanceamento ao final do acompanhamento.

Figura 8 – Gráfico de tendência do histórico de vibração do rotor ao longo do ano de 2021.



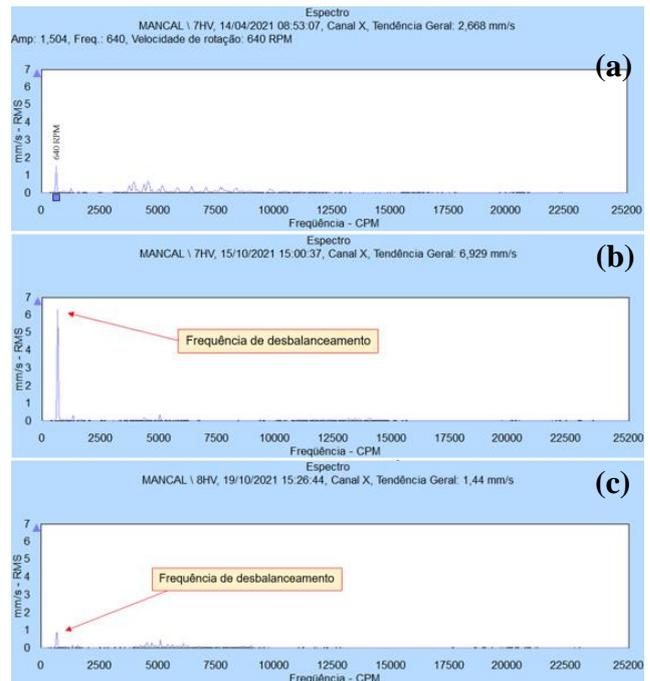
No gráfico da figura 9 pode-se observar o espectro de frequência do equipamento na data de 14/04/2021 (figura 9-a), o qual apresentava uma amplitude de rotação de 2,668 mm/s operando à frequência de ressonância, 640 rpm. O espectro de frequência observado no gráfico demonstra que a mesma estava em bom estado. Observa-se a frequência da rotação do exaustor de 640 rpm (frequência de ressonância do equipamento) com amplitude 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 9-b), mostrado no gráfico indica um aumento da amplitude de frequência, o que significa um aumento drástico na vibração do equipamento. O espectro de vibração medido nessa data alcança o alarme A1, com uma amplitude 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 de coleta e análise 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 9-c).

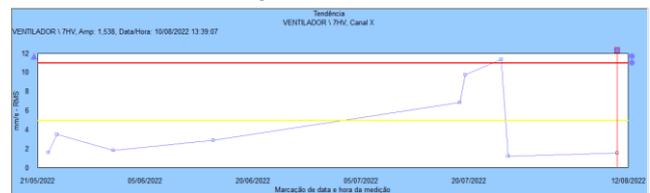
Após a realização o balanceamento do rotor do exaustor, a amplitude de vibração diminuiu para 1,4mm/s no ponto de ressonância do mesmo, restando apenas o desbalanceamento residual, que está dentro do limite tolerável.

Figura 9 – Espectros de vibração do rotor, coletados em: (a) 14/04/2021, (b) 15/10/2021 e (c) 19/10/2021.



Na Figura 10 é possível observar o gráfico de tendência do histórico de vibração 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, até certo período, tendo um aumento brusco a partir da medição feita em 19/07/2022.

Figura 10 – Gráfico de tendência do histórico de vibração do rotor ao longo do ano de 2022.



Nos espectros, ao longo do tempo, nota-se a evolução apenas na frequência de 710 RPM, que é a frequência de rotação que o 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.

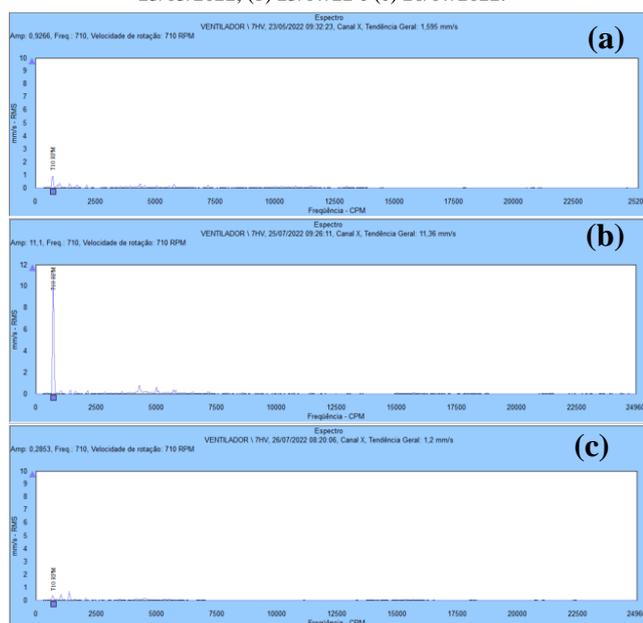
Nos gráficos da figura 11 é possível observar a medição em 3 momentos notáveis ao longo do ano de 2022, onde pode-se notar o equipamento em perfeito

funcionamento, em 23/05/2022 (figura 11-a) no início do acompanhamento, com amplitude de 1,595 mm/s.

O segundo momento notável na medição da vibração acontece em 25/07/2022 (figura 11-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 18, sendo então recomendado o balanceamento dinâmico do rotor para amenização da vibração no equipamento.

Já o último espectro de vibração, datado de 26/07/2022 (figura 11-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 11 – Espectros de vibração do rotor, coletados em: (a) 23/05/2022, (b) 25/07/22 e (c) 26/07/2022.



Foi observado, após averiguação, 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 12.

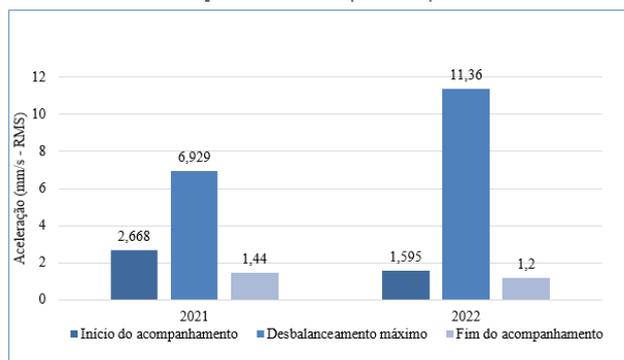
O gráfico da figura 13 mostra a diferença de aceleração do rotor no início do monitoramento até o pico de aceleração, e logo em seguida a medição após o balanceamento, em ambos os anos acompanhados. O gráfico compara os envelopes de aceleração do

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.

Figura 12 – Desgaste observado nas pás do rotor, após aumento brusco da vibração.



Figura 13 – Gráfico de variação da aceleração.



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. Por último, 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.

CONCLUSÃO

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, por exemplo. O monitoramento da vibração de um equipamento permite saber as condições em que o equipamento está trabalhando.

Pode-se observar que 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 considerar 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 e prevenção de falhas.

Ao longo do estudo de caso das vibrações do exaustor da caldeira, foram identificadas duas falhas por desbalanceamento dinâmico no rotor. Em suma, 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, dando a chance da equipe de manutenção se preparar para o reparo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARCORIN, W. R.; LIMA, C. R. C. Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos. **Revista de Ciência & Tecnológica**, Santa Bárbara d'Oeste, v. 11, n. 22, p. 35-42, 2013.
2. SOARES, Z. **Análise de Vibrações**. TM JR, 2020. Disponível em: <<https://tmjr.com.br/analise-de-vibracoes/#:~:text=Historicamente%20os%20primeir>

os%20estudos%20em,de%20m%C3%A1quinas%20e%20seus%20componentes> Acesso em: 10 de outubro de 2022.

3. SALUM, R.M.A. **Proposta de uma metodologia para construção de indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração no contexto da indústria 4.0**. Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2021.
4. ALMEIDA, P. S. **Manutenção mecânica industrial: Conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Érica, 2014.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro. 1994.
6. KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção Função Estratégica**, 2ª ed, 1ª Reimpressão 2009. Editora Quality Mark, Rio de Janeiro, Coleção Manutenção, Abraman.
7. PAUDYAL, S.; ATIQUE, M. S. A.; YANG, C. X. **Local Maximum Acceleration Based Rotating Machinery Fault Classification Using KNN**. IEEE EIT 2019. Grand Forks: [s.n.]. 2019.
8. 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.
9. [NETO, J.C.R. **Manutenção Preditiva de um Centro de Usinagem CNC Através de Análise de Vibrações**. Tese de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
10. NASCIMENTO, Rodrigo do. **Manutenção Preditiva usando Análise de Vibração**. 2011.38f. Dissertação (Graduação) Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Centro Universitário Anhanguera, Faculdade de Pirassununga.

11. [SOUZA, Valdir Cardoso. **Organização e Gerência da Manutenção – Planejamento, Programação e Controle da Manutenção**. 3ª Ed, revisada. São Paulo: All Print, 2009. 285 p.
12. 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.
13. SKF RELIABILITY SYSTEMS. **Vibration diagnostic guide**. EUA: SKF Reliability Systems, 2000.
14. SAADE, P. **Princípios de Vibrações Mecânicas**, 2014. Apresentação de *slide* de Vibração em Sistemas Mecânicos. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/1590523/>. Acesso em: 28 de maio de 2023.
15. 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.
16. 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.
17. ARAÚJO, L. P. **Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado**. São Paulo: Ed. Esev, 2007.
18. SANTOS, V.G. **Dimensionamento e proposta de melhoria do rotor de um ventilador centrífugo (estudo de caso)**. Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. SOEIRO, N. S. **Curso de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores**. Belém – PA, 2008. Curso promovido para Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.
23. Microlog Analyzer série GX - CMXA 75. **Primeira Linha**, 2021. Disponível em: <https://1linha.com.br/produto/microlog-analyzer-serie-gx-cmxa-75/>. Acesso em: 22 de maio de 2022.