



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Eficiência do Monitoramento Preditivo e Análise de Vibrações em Exaustores Industriais: Comparação entre Metodologias *Online* e *Offline*

Danthon Bruno Gomes

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adriano Silva Borges

Departamento Acadêmico de Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Viviane Teleginski Mazur

Coordenação de Engenharia Mecatrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Fernando Rigatti

Coordenação de Engenharia Mecatrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Henrique Ajuz Holzmann

Coordenação de Engenharia Mecatrônica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: Exaustores industriais desempenham um papel fundamental na ventilação e no controle de impurezas em ambientes industriais. No entanto, suas altas velocidades de operação frequentemente geram desbalanceamento, resultando em vibrações excessivas que comprometem o desempenho e a durabilidade desses equipamentos. Este artigo investiga a eficiência da análise de vibrações de exaustores em uma planta de beneficiamento de madeira, comparando as metodologias de monitoramento *Online* e *Offline*. Por meio de técnicas preditivas e sensores IIoT avançados, foram coletados dados *Online* de vibração para avaliar com precisão a condição dos exaustores e detectar falhas de maneira antecipada. O monitoramento realizado com sensores wireless, mostrou-se vantajoso por oferecer alertas em tempo real e *insights* gerados por inteligência artificial, possibilitando planejamento de intervenções rápidas e preventivas. Em contrapartida, o método *Offline*, embora útil, depende da disponibilidade de técnicos, o que pode criar lacunas na coleta de dados. Os resultados indicam que a combinação das duas metodologias aumenta a confiabilidade operacional e reduz o risco de paradas não programadas. Conclui-se que a integração de IoT e IA aos sistemas de monitoramento preditivo tradicionais fortalece a manutenção industrial, aprimora a tomada de decisões e prolonga a vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave: Confiabilidade Operacional, Inteligência Artificial, Internet das Coisas Industrial.

Efficiency of Predictive Monitoring and Vibration Analysis in Industrial Exhaust Fans: Comparison between Online and Offline Methodologies

Abstract: Industrial exhaust fans play a fundamental role in ventilation and impurity control in industrial environments. However, their high operating speeds often lead to imbalance, resulting in excessive vibrations that compromise the performance and durability of these devices. This article investigates the efficiency of vibration analysis in exhaust fans in a wood processing plant, comparing online and offline monitoring methodologies. Through predictive techniques and advanced IIoT sensors, vibration online data were collected to accurately assess the condition of the exhaust fans and detect failures in advance. Monitoring, conducted with wireless sensors, proved advantageous by offering real-time alerts and AI-generated insights, enabling quick and preventive

planning of interventions. In contrast, the offline method, although useful, relies on the availability of technicians, which can create gaps in data collection. The results indicate that combining both methodologies increases operational reliability and reduces the risk of unscheduled downtimes. It is concluded that integrating IoT and AI into traditional predictive monitoring systems strengthens industrial maintenance, enhances decision-making, and extends the equipment's service life.

Keywords: Operational reliability, Artificial intelligence, Industrial Internet of Things.

1. Introdução

Exaustores industriais que operam em vários sistemas de fluxo são, em sua maioria, equipamentos essenciais a qualquer planta industrial. Portanto, deve-se manter uma atenção especial com relação a seu funcionamento, recebendo manutenção adequada e monitoramento de suas condições para que a sua vida útil seja mantida (RUSINSKI, *et. al.*, 2017). Sua finalidade é retirar ar do ambiente através do movimento de um rotor ou pá, acionado por um motor elétrico, que gera uma diferença de pressão, gerando assim um fluxo retirando 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). Para realizar efetivamente o transporte de impurezas e assegurar um bom desempenho, é imprescindível que os exaustores industriais estejam não apenas em boas condições de funcionamento, mas também devidamente balanceados. O equilíbrio adequado desses equipamentos é crucial para garantir uma operação eficiente e confiável. As exigências que a indústria moderna impõe às máquinas rotativas, devem ser satisfeitas, mesmo em elevadas velocidades de rotação, mantendo níveis de vibração adequados (NEPOMUCENO, 1989).

Vibrações ocorrem em todos os casos de operação de máquinas rotativas, podendo ser causadas por parâmetros mecânicos ou de inércia, como rotação desequilibrada da massa causando desbalanceamento (RUSINSKI, *et. al.*, 2017). O desbalanceamento de uma máquina rotativa é decorrente de uma distribuição de massa não uniforme no rotor ao redor do eixo de rotação, acarretando perda de produtividade e/ou redução na vida útil do componente (GÓZ e SILVA, 2013). Além disso, o desbalanceamento pode causar danos em outros componentes que integram o sistema, como mancais, rolamentos, elementos de vedação, elementos de fixação e até no próprio rotor. A técnica de manutenção mais utilizada para se monitorar as vibrações, condições de funcionamento de equipamentos e detectar defeitos é a técnica preditiva de análise de vibrações, realizada através de coleta e análise de dados. Nesta técnica as vibrações dos equipamentos podem ser medidas externamente, sem necessidade de interrupção de uso.

No ambiente industrial atual, a análise de vibração é amplamente adotada, permitindo que as empresas maximizem a disponibilidade operacional dos ativos e evitem custos elevados associados a paradas não programadas. A tecnologia atual permite a coleta de dados de vibração com precisão e eficiência, tornando-a uma ferramenta valiosa para a manutenção baseada em condições (LENZI, 1991 e DE OLIVEIRA SILVA, 2023). A análise de vibração é realizada com base nos dados coletados por aparelhos específicos que detectam condições de vibração e a partir da análise das frequências obtidas, o diagnóstico de tendência de defeitos é realizado. Por conta disso, torna-se possível indicar, com antecedência, eventuais defeitos ou falhas, permitindo que a equipe trace um plano de ação para corrigir o problema, evitando paradas inesperadas e desnecessárias no equipamento (CYRINO, 2015).

A nova Revolução Industrial chamada de Indústria 4.0, impulsionada por avanços tecnológicos como a Internet das Coisas Industrial (IIoT) e Inteligências Artificiais (IA), está transformando a maneira como as empresas gerenciam suas operações, especialmente no que diz respeito à manutenção preditiva (PÁDUA, 2022). A IIoT é essencial nesse contexto, pois permite a conexão de dispositivos e equipamentos industriais à internet, coletando

dados em tempo real e fornecendo *insights* valiosos para otimização de processos e prevenção de falhas. No contexto da manutenção preditiva, a IoT desempenha um papel crucial ao integrar sensores inteligentes em máquinas e equipamentos (DE MENEZES, DE OLIVEIRA BARBOSA, GARZON, 2023). Esses sensores são capazes de monitorar uma variedade de parâmetros, como temperatura, vibração, umidade, consumo de energia, entre outros, com o monitoramento contínuo (SANTOS, 2021). Eles coletam dados constantemente e os enviam para uma inteligência artificial (IA) em uma plataforma centralizada, onde algoritmos de análise de dados e aprendizado de máquina podem processá-los para identificar padrões, tendências e anomalias. As IA's, com algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais, analisam grandes volumes de dados dos sensores, identificando padrões complexos, correlacionando variáveis e prevendo falhas ou necessidades de manutenção com precisão antes de ocorrerem. Isso possibilita uma tomada de decisão mais precisa e proativa (DE MENEZES, DE OLIVEIRA BARBOSA, GARZON, 2023).

Este artigo discute as vantagens da utilização de um sistema de análise de vibrações *Online* em relação a um sistema *Offline*, em um exaustor industrial de uma planta de beneficiamento de madeira.

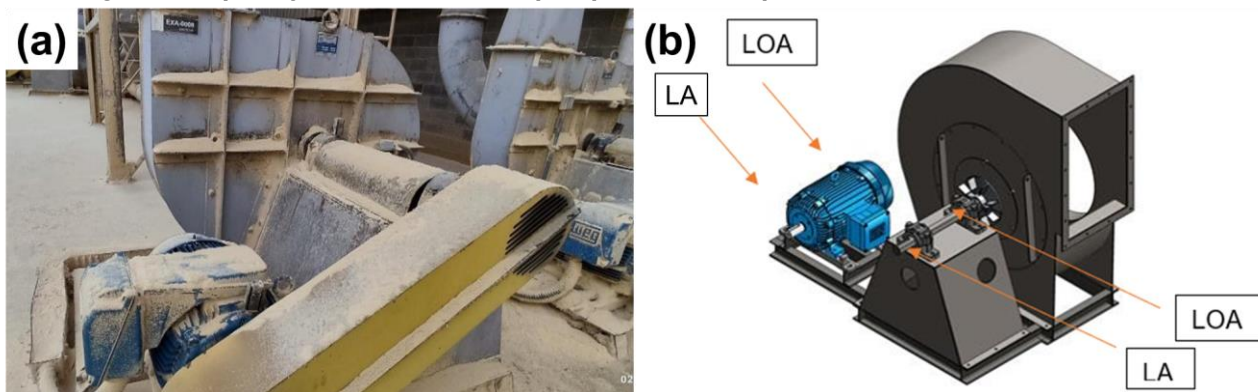
2. Metodologia

2.1. Sistema de exaustão e pontos de medição

O conjunto escolhido para esta pesquisa foi o exaustor marca Brandt (Figura 1a) com motor elétrico marca WEG Modelo W22 Plus, potência de 75 CV's e que possui rotação de 1775 RPM. Esse conjunto tem a etiqueta (TAG) MEX-008, a qual será a nomenclatura utilizada neste trabalho. As coletas de dados de vibração foram realizadas nos pontos de nas partes expostas da máquina que são normalmente acessíveis. Foram tomadas precauções para garantir que as medições representam razoavelmente a vibração do alojamento do rolamento e não incluem quaisquer ressonâncias locais ou amplificações. As localizações e direções das medições de vibração foram tais que fornecem sensibilidade adequada às forças dinâmicas da máquina. Assim, foram analisadas duas localizações ortogonais radiais de medição em cada tampa de rolamento ou pedestal. Direções verticais e horizontais são geralmente preferidas para máquinas montadas horizontalmente (ISO, 2022).

Foram instalados dois sensores wireless de coleta IIoT, posicionados no motor e mancal do rotor do lado oposto ao acionamento (LOA). Os pontos de coleta foram selecionados seguindo a recomendação de medição da norma ISO 20816-3 (ISO, 2022), iniciando pelo acionamento motor (MEI-0533) dispondo-se em coletar 2 pontos na parte traseira do motor LOA (horizontal e vertical) e 3 pontos na parte dianteira LA (horizontal, vertical e axial), focando em coletar dados referentes as vibrações dos rolamentos, polias e correias. No eixo do exaustor EXA-0008 são coletados 3 pontos em cada mancal LA e LOA (Horizontal, Vertical e Axial). O esquemático de coleta de dados é demonstrado na Figura 1b.

Figura 1 – a) Conjunto MEX-0008 e b) esquemático de pontos de coleta de dados Offline



Fonte: Autor (2024)

2.2. Sensores de análise de vibrações

Utilizando as mesmas posições indicadas na Figura 1b, foram realizadas análises por um técnico profissional de forma *Offline*, com periodicidade mensal, utilizando um coletor de dados marca Pruftechnik, modelo VIBXpert II, que é um pacote móvel de gravação dos dados. Após um tempo de medição, os dados do status atual do equipamento são exibidos na tela do equipamento, sendo que o técnico pode analisar os dados no *in-loco*. Um acelerômetro modelo VIB 6.142R da Pruftechnik foi utilizado nos pontos de medição, o qual lê uma faixa de frequências entre 1 Hz a 20 kHz (± 3 dB) ou 0,3 Hz a 10 kHz. Para análise dos dados coletados foi utilizado o *software* Omnitrend da mesma fabricante do coletor, o qual possibilita gerenciar os dados coletados, e gerar históricos para manutenção e controlar rotas de medição em uma planta industrial (PAGAR, GAWDE, SANAP, 2023 e PRUFTECHNIK, 2024). As medições foram realizadas quando o rotor e os rolamentos principais estavam em suas temperaturas normais de operação, em regime permanente e com a máquina funcionando sob condições normais, por exemplo, na velocidade nominal, tensão, fluxo, pressão e carga. Para efeito de comparação, somente foram utilizados valores medidos na mesma condição de operação e para efeito de avaliação, utilizou-se o máximo valor medido entre todas as condições de operação avaliadas (ISO, 2022 e ABNT, 2021).

Já para as coletas automatizadas utilizou-se o sensor *wireless* IoT Smart Trac da Tractian. O Smart Trac tem conectividade 3G/LTE e dispara alertas em tempo real e automaticamente sobre mudanças nas medições de vibração que possa indicar um problema em potencial no ativo. Ao detectar um alerta, um *insight* é gerado pela inteligência artificial e enviado para o usuário através de sua plataforma *Online* (PC's) ou aplicativo (*Smartphones*). Ao verificar a alerta de falha detectada na plataforma, o usuário verifica o *insight* e a equipe de manutenção se desloca até o ativo, realiza a manutenção e comprova o alerta da plataforma, informando o sistema sobre a falha identificada e se o diagnóstico foi assertivo. A cada falha identificada cria um aprendizado contínuo da ferramenta e o *insight* checado em sua tecnologia absorve os dados e aprimora seu conhecimento sobre a máquina para as próximas detecções (PÁDUA, 2022).

A instalação dos sensores foi de simples implementação e assim que o sensor foi posicionado na máquina iniciou-se a coleta de dados por meio das vibrações e temperatura. No entanto, foi necessária a inserção manual de dados do equipamento (rotação, descrição de colamentos, diâmetros de polias, etc.) na plataforma de monitoramento para que o sensor possa definir os comportamentos padrões do equipamento, sendo possível detectar mudanças no perfil do equipamento. Os pontos onde estes sensores estão posicionados são realizadas coletas *Online* diariamente, com um intervalo de 5 minutos, gerando um histórico de dados, sendo possível de ser analisado por qualquer funcionário que esteja

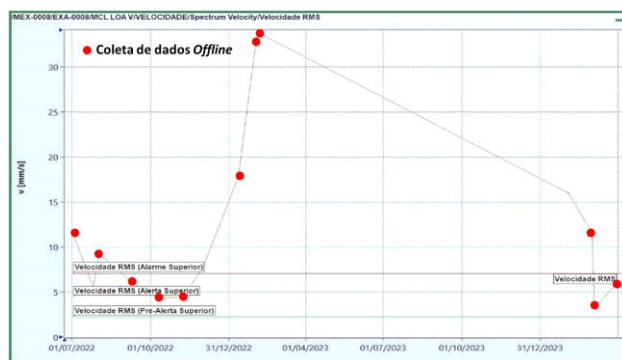
cadastrado na plataforma, independentemente de ter um técnico especializado em inspeção preditiva na empresa (TRACTIAN, 2024).

3. Resultados e discussão

3.1. Coleta de dados *Offline*

As coletas realizadas *Offline* são periódicas mas dependem da disponibilidade dos técnicos. Conforme demonstrado na Figura 2, nota-se um período longo entre as datas de medição, período em que a empresa não realizou coleta e análise de vibração por falta de técnico especializado para esta função. Em concomitância a este período ocorreram falhas relacionadas à falta de manutenção preditiva.

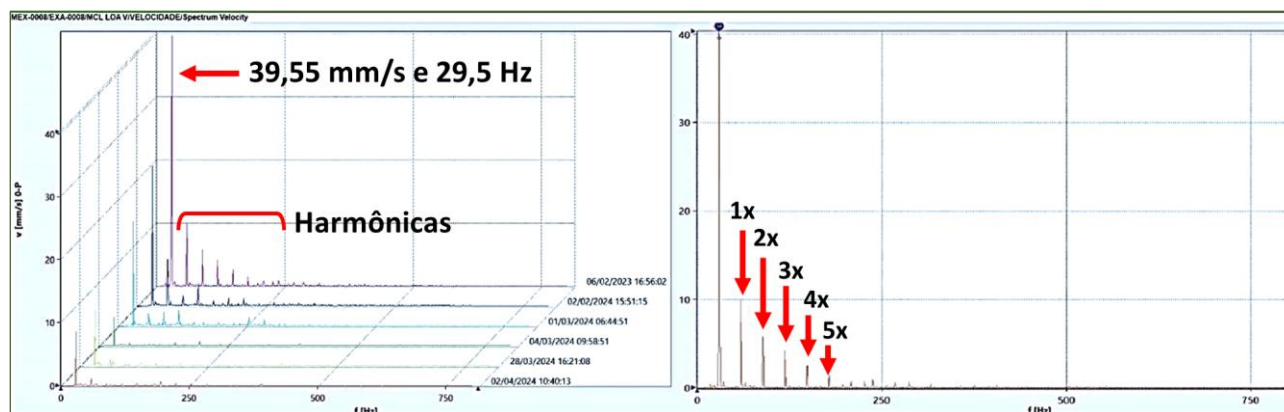
Figura 2 – Análises de vibração *Offline* em função do tempo para o ponto LOAV mancal EXA-0008



Fonte: Autor (2024)

Utilizando os dados de coleta offline, foi traçada uma linha do tempo em cascata, como é mostrado na Figura 2a, demonstrando o histórico de medições no ponto LOAV do mancal EXA-0008. Como é possível visualizar na análise do espectro em cascata, Figura 2a, é possível observar um pico elevado na frequência de 29,5 Hz de amplitude de 39,55 mm/s, este valor se refere a rotação do rotor em seu eixo ($29,5 \times 60 = 1770$ rpm). Nota-se também harmônicas de 2x, 3x, 4x, 5x e 6x em que é diagnosticado desbalanceamento e folga, pois segundo Nepomuceno (1989), com o desbalanceamento de massa pode-se detectar uma frequência de uma vez à rotação do rotor e folgas mecânicas detecta-se como frequência dominante a igual a rotação do eixo, podendo aparecer harmônicas até de décima ordem, porém com pequenas amplitudes. A partir desses dados foi diagnosticado um desbalanceamento severo e folga estrutural. Após esta data (fev/2023) foi programada uma manutenção no ativo para limpeza no rotor do exaustor, não sendo realizada nenhuma outra intervenção.

Figura 4 – a) Análise em cascata velocidade (mm/s) LOAV mancal EXA-0008 e b) Espectro em velocidade (mm/s) LOAV mancal EXA-0008 06/02/2023

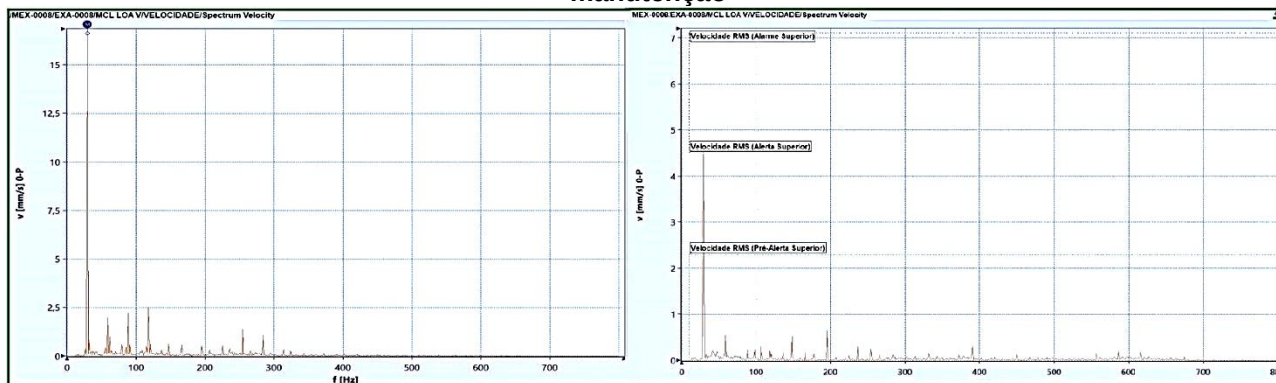


Fonte: Autor (2024)

Em uma coleta de dados posterior (fev/2024) foi verificado que os valores de vibração se encontravam fora dos padrões considerados normais. Foi realizada então uma programação para manutenção, com limpeza e balanceamento do rotor do exaustor. O acompanhamento da análise de vibrações é mostrada na Figura 3a.

O desbalanceamento é um defeito comum, principalmente em máquinas rotativas, ele consiste na distribuição assimétrica de massa em torno do eixo de rotação de um rotor, criando pontos pesados o que gera forças radiais desbalanceadas ocasionando uma forte vibração no equipamento durante o seu funcionamento provocando o desgaste prematuro dos seus elementos mecânicos, como por exemplo: mancais, rolamentos, elementos de vedação, elementos de fixação e até no próprio rotor. Pode chegar a afetar, dependendo da severidade do desbalanceamento, outros equipamentos instalados nas proximidades, além disso, há o desperdício da energia em forma de vibração e, finalmente, devido a intensa vibração há possibilidade de ocorrência de acidentes materiais e pessoais (LIMA, 2019). Os espectros em velocidade demonstram as condições antes, Figura 3a e depois, Figura 3b, da realização da manutenção no ativo. É possível verificar que os valores de vibração diminuíram significativamente, sendo considerado então como situação normal de funcionamento.

Figura 3 – a) Espectro em velocidade (mm/s) LOAV Mancal EXA-0008 e b) Após realização da manutenção

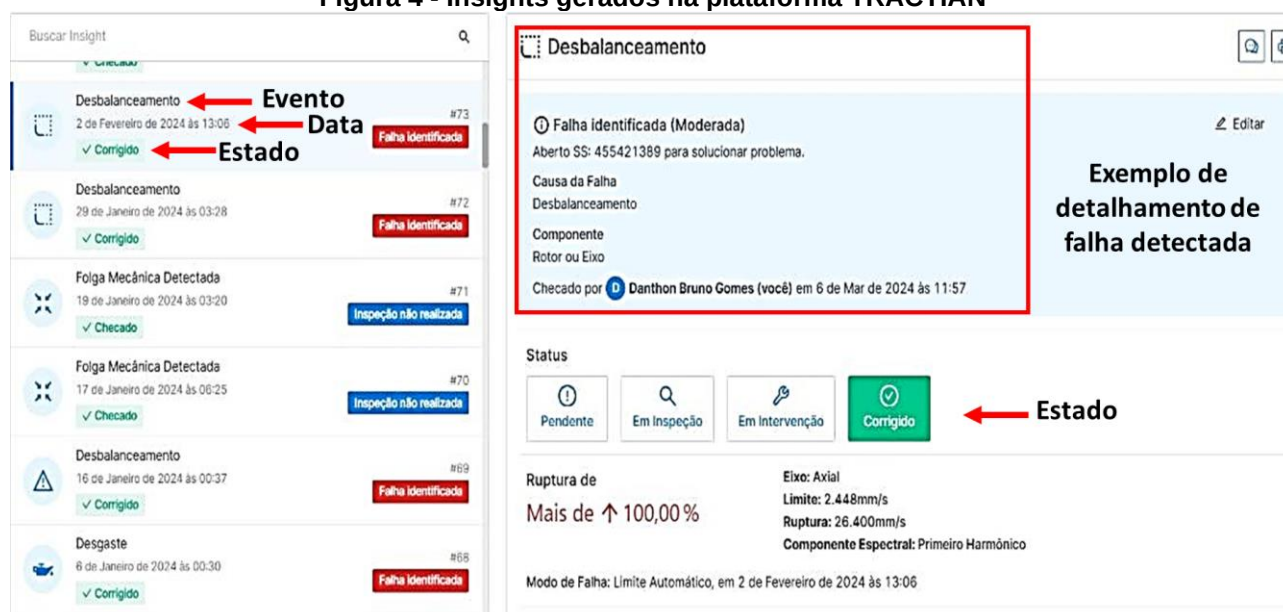


Fonte: Autor (2024)

3.2. Coleta de dados *Online*

Já na coleta *Online*, independentemente da falta de um técnico especializado, o sensor utilizado demonstrou sua capacidade de operar de forma autônoma, fornecendo informações sobre o estado da máquina. A Figura 4 apresenta uma leitura e a tela da plataforma de monitoramento com indicação de uma falha e o local da mesma, sendo que esses dados ficam armazenados em um banco de dados em nuvem, criando um histórico preciso do equipamento.

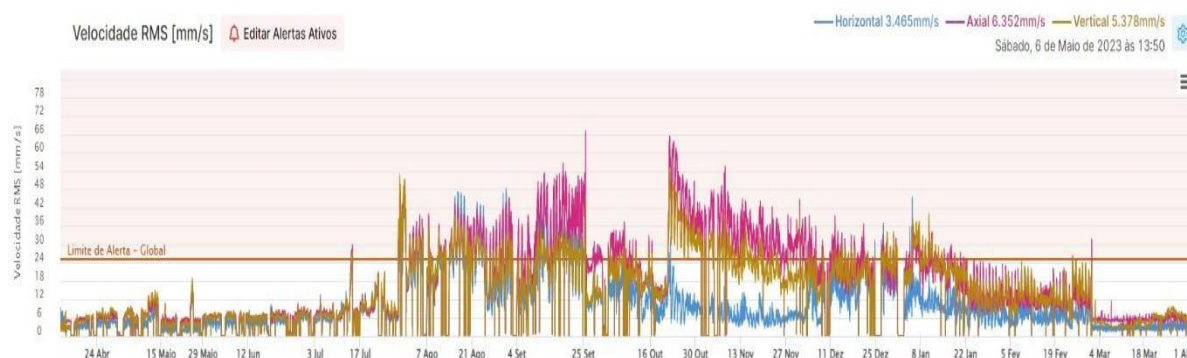
Figura 4 - Insights gerados na plataforma TRACTIAN



Fonte: Autor (2024)

Na Figura 5 é possível verificar a linha do tempo de coletas *Online* que geraram histórico de como o ativo se comportou em funcionamento, durante um período de 1 ano.

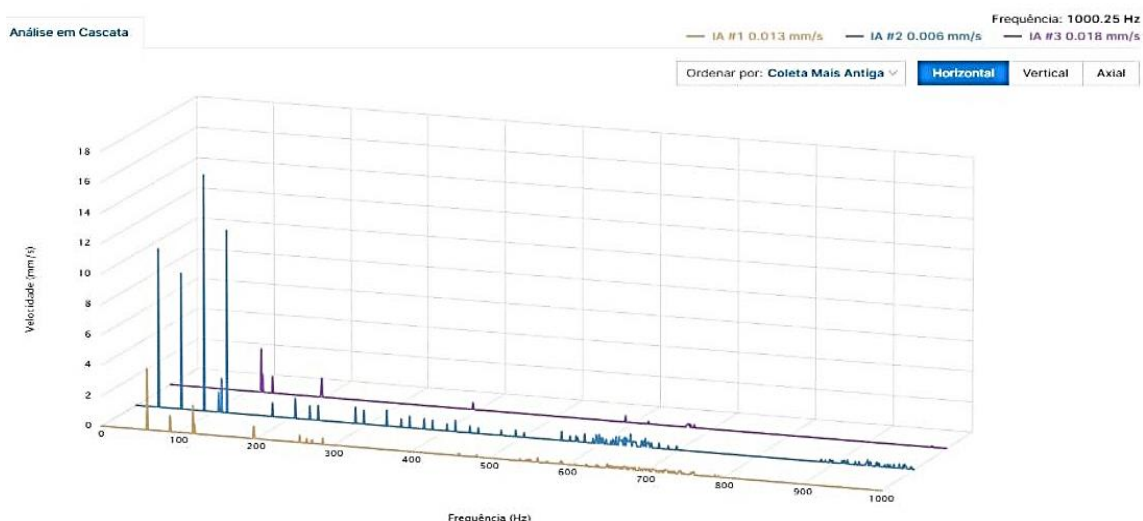
Figura 5 – Valores globais de vibração *Online* em função do tempo em Velocidade (mm/s) TRACTIAN



Fonte: Autor (2024)

A Figura 6 indica uma alteração significativa no padrão vibratório do ativo, compatível com um desbalanceamento e folga, que se manifestaram por um aumento gradual da amplitude de vibração na frequência característica do rotor, culminando em elevados valores de vibração entre agosto e março de 2024, onde houve intervenção no ativo. Essas condições poderiam levar à fadiga dos componentes, redução da vida útil do equipamento gerando potencialmente falha e parada não programada do exaustor. Os *insights* gerados pela plataforma Tractian, que monitora continuamente as condições operacionais do exaustor, foram cruciais para a detecção precoce dessa anomalia. A precisão da análise de vibração utilizando um sensor wireless IoT, associada à capacidade de identificar tendências de degradação, permitiu a antecipação da falha e a programação de uma intervenção técnica antes que a situação se agravasse. A confirmação humana dos alertas na plataforma realizada pelo técnico de manutenção responsável, permitiu a geração de uma ordem de manutenção prioritária, garantindo a rápida resolução do problema e evitando a interrupção do processo produtivo.

Figura 8 - Espectro em cascata de Velocidade (mm/s) TRACTIAN



Fonte: Autor (2024)

4. Conclusões

Com a aplicação da técnica preditiva de análise de vibrações na gestão de ativos de empresas, a manutenção preditiva será tanto mais eficiente quanto mais rapidamente for detectada a mudança de comportamentos nas máquinas em que se deseja monitorar, tomando possível prever, com uma antecedência satisfatória, quais as providências que devem ser tomadas para evitar uma parada ou pane não programada. É, então importante que o responsável pela manutenção esteja em condições de determinar quais parâmetros são importantes, estabelecer limites admissíveis para a operação e implantar métodos de medição, parâmetros observados e suas variações com o funcionamento do equipamento e seu histórico de medições.

Com a chegada das tecnologias inovadoras da Indústria 4.0 e as IoT's, a manutenção preditiva passou a representar o futuro também, uma vez que o monitoramento *Online* proporciona um controle ainda maior sobre a vida útil de equipamentos na gestão de seus ativos.

Com o uso da informação gerada tanto pela coleta *Offline* e *Online* foi possível obter um resultado satisfatório no exaustor objeto deste estudo, que ao se verificar os espectros de frequência gerados na plataforma Tractian se confirma os dados gerados na coleta *Offline*, mostrando assim que é possível realizar uma análise de vibração com sensores IoT's e o auxílio da IA. Porém é necessário que um usuário esteja dedicado na utilização da plataforma ou aplicativo da Tractian para checar devidamente os insights gerados e verificar a assertividade das possíveis falhas identificadas na plataforma.

Conclui-se neste trabalho, que foi possível verificar a efetividade destas tecnologias na gestão de ativos, proporcionando melhor disponibilidade dos equipamentos e redução dos custos de manutenção em paradas não programadas. Além de melhor direcionar as equipes de manutenção nas tomadas de decisões, resultando em uma melhora significativa no que se diz respeito à confiabilidade e manutenibilidade das intervenções preditivas nos ativos. Mas que sem um utilizador conhecedor das técnicas de análise de vibração, estas ferramentas podem não ser utilizadas de forma correta e gerando assim um custo com equipamentos desnecessários no caso da falta do mesmo.

Referências

- ABNT, NBR 10082: Ensaio não destrutivo - análise de vibrações - avaliação de vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 5 000 rpm. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ARAÚJO, L. P. de. Aquecimento, ventilação e ar condicionado. **São Paulo: Ed**, 2007.
- BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção preditiva na indústria 4.0. **Scientia cum industria**, v. 7, n. 2, p. 11-22, 2019.
- CYRINO, L. Análise de vibração: Método de preditiva. **Manutenção em foco**, v. 8, 2015.
- DE MENEZES, I. V. C. B.; DE OLIVEIRA BARBOSA, L. S.; GARZON, N. A. Aplicações de inteligência artificial na otimização de banco de dados. **Recima21 - Revista científica multidisciplinar- issn 2675-6218**, v. 4, n. 12, p. e4124516-e4124516, 2023.
- DE OLIVEIRA SILVA, D.; BIAZON, L. G., SANTOS, T. B., NOVAES, Y. S.; DA COSTA, A. F. Manutenção preditiva-análise de vibrações na indústria 4.0. **Revista Foco**, v. 16, n. 11, p. e3628-e3628, 2023.
- GÓZ, R. D.; SILVA, T. C. R&T Análise de vibrações e balanceamento. 2013.
- ISO, Standard. Mechanical vibration: Measurement and evaluation of machine vibration- Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. 2022.
- LENZI, A. Revisão bibliográfica sobre técnicas de diagnóstico de defeitos em máquinas. **Relatório parcial I e II**, 1991.
- LIMA, J. P. S. de. **Balanceamento em um plano de rotor rígido**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva, v. 1**. Editora Blucher, 1989.
- PÁDUA, H. G. de. Análise da indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias no auxílio da detecção de falhas prematuras de motores elétricos. 2022.
- PAGAR, N. D.; GAWDE, S. S.; SANAP, S. B. Online condition monitoring system for rotating machine elements using edge computing. **Australian Journal of Mechanical Engineering**, p. 1-14, 2023.
- PRUFTECHNIK Produtos e Serviços, disponível em: <https://www.pruftechnik.com/pt-BR/Produtos-e-servi%c3%a7os/>. Acesso em 12 de maio, 2024.
- RUSINSKI, E.; CZMOCHOWSKI, J.; MOCZKO, P.; PIETRUSIAK, D. Monitoring and testing of high power industrial fans vibration. **Procedia engineering**, v. 199, p. 2190-2195, 2017.

SANTOS, J. G. R. dos. A Utilização de sensores de monitoramento online como estratégia de manutenção preditiva de motores de indução. 2021.

TRACTIAN Sensor Inteligente, disponível em: <<https://traction.com/sensor-inteligente/>>. Acesso em 12 de maio, 2024.