

Análise de Vibração Aplicada à Manutenção Preditiva de Componentes de Máquinas Agrícolas

Felipe Chagas Rodrigues de Souza¹

<https://orcid.org/0000-0003-4446-3077>

Leonardo Carvalho Aires²

<https://orcid.org/0009-0002-9142-6084>

RESUMO

O trabalho trata da aplicação da análise de vibrações na manutenção preditiva de máquinas agrícolas. Introduz o conceito de manutenção preditiva, destacando sua eficiência na redução de falhas catastróficas e otimização de recursos. A análise de vibrações é apresentada como uma das principais ferramentas para monitorar o estado de máquinas, sendo capaz de diagnosticar falhas potenciais antes que causem danos maiores. O estudo utilizou acelerômetros piezoelétricos instalados em dois componentes específicos: a caixa de engrenagem planetária do eixo dianteiro de um trator modelo TR7500 e o rotor do ventilador do extrator primário de uma colhedora de cana modelo CH570. Os sensores foram posicionados em três direções (axial, radial e tangencial) e os dados coletados foram analisados por uma empresa especializada, utilizando métodos como o valor global de vibração e medidas como pico a pico, valor de crista e RMS. Nos resultados, a análise da caixa de engrenagem revelou picos de aceleração entre 1800 e 2300 Hz, indicando folgas que resultaram em vibrações adicionais devido à interação dinâmica dos dentes das engrenagens. Já no rotor do ventilador, o desbalanceamento causado por acúmulo de terra foi identificado como fonte de vibração crescente, evidenciado por um pico no espectro de frequências e tendência de falha ao longo do tempo. A pesquisa conclui que a análise de vibrações é uma técnica eficaz para detectar anomalias, como folgas e desbalanceamentos, prevenindo falhas catastróficas. A manutenção preditiva se mostra uma abordagem vantajosa, permitindo intervenções planejadas, redução de custos e aumento da vida útil dos equipamentos.

Palavras-chave

Manutenção preditiva; Análise de vibrações; Folgas; Desbalanceamento; Diagnóstico.

Submetido em: 13/01/2025 – Aprovado em: 31/01/2025 – Publicado em: 31/01/2025

¹ Doutorando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, felipechagas@ufu.br.

² Graduando, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, leonardo.aires@ufu.br.



Vibration Analysis Applied to Predictive Maintenance of Agricultural Machinery Components

ABSTRACT

The study addresses the application of vibration analysis in the predictive maintenance of agricultural machinery. It introduces the concept of predictive maintenance, emphasizing its efficiency in reducing catastrophic failures and optimizing resources. Vibration analysis is presented as one of the main tools for monitoring machine conditions, capable of diagnosing potential failures before causing major damage. The study employed piezoelectric accelerometers installed on two specific components: the planetary gearbox of the front axle of a TR7500 tractor and the rotor of the fan from the primary extractor of a CH570 sugarcane harvester. Sensors were positioned in three directions (axial, radial, and tangential), and the data collected were analyzed by a specialized company using methods such as global vibration value and measurements like peak-to-peak, crest value, and RMS. The results revealed that the analysis of the planetary gearbox identified acceleration peaks between 1800 and 2300 Hz, indicating looseness that caused additional vibrations due to the dynamic interaction of gear teeth. In the fan rotor, imbalance caused by the accumulation of soil was identified as a source of increasing vibration, evidenced by a peak in the frequency spectrum and a trend curve predicting failure over time. The research concludes that vibration analysis is an effective technique for detecting anomalies such as looseness and imbalance, preventing catastrophic failures. Predictive maintenance proves to be an advantageous approach, allowing planned interventions, cost reduction, and increased equipment lifespan.

Keywords

Predictive maintenance; Vibration analysis; Looseness; Imbalance; Diagnosis.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Pereira (2009), em seu trabalho sobre planos de manutenção preventiva, todo equipamento ou sistema mecânico está sujeito a processos naturais de deterioração, que ocorrem devido a fatores como desgaste mecânico, fadiga dos materiais, variações térmicas e impacto das condições operacionais. Esses processos gradualmente levam ao aparecimento de defeitos e falhas que comprometem o desempenho dos equipamentos, impactando diretamente a produtividade e a segurança das operações industriais.

Até a década de 1960, uma prática comum na indústria era a utilização dos equipamentos até que eles apresentassem sérios problemas de desempenho ou falhas completas. Esse modelo de manutenção corretiva, também conhecido como abordagem reativa, consistia na substituição ou reparo dos componentes somente após a ocorrência da falha. No entanto, essa estratégia frequentemente resultava em falhas catastróficas, causando prejuízos financeiros significativos, aumento do tempo de máquina parada, queda na produtividade e, em alguns casos, riscos à segurança dos trabalhadores. Além disso, a necessidade de intervenções emergenciais elevava os custos operacionais, pois muitas vezes exigia a aquisição imediata de peças de reposição, além de mão de obra adicional para realizar os reparos em caráter emergencial.

Diante desse cenário e considerando a crescente limitação dos recursos disponíveis, a manutenção preditiva surgiu como uma alternativa mais eficaz e econômica. Essa estratégia de manutenção permite a antecipação de falhas e o monitoramento contínuo dos equipamentos, possibilitando intervenções planejadas e minimizando custos com reparos não programados. Diferentemente da manutenção preventiva, que se baseia em intervalos fixos para substituição de componentes, a manutenção preditiva foca no monitoramento do real estado dos equipamentos, reduzindo a necessidade de trocas prematuras e maximizando a vida útil das peças.

A manutenção preditiva se destaca como o método mais eficiente no gerenciamento de equipamentos industriais, pois permite a identificação precoce de anomalias ou sinais de desgaste sem a necessidade de desmontagem do equipamento, a menos que seja detectado um problema crítico. Essa abordagem possibilita não apenas a prevenção de falhas catastróficas, que poderiam comprometer o funcionamento de diversas partes do sistema, mas também a redução significativa dos custos com reposição de peças e reparos emergenciais. Além disso, ao prolongar a vida útil dos componentes, a manutenção preditiva contribui para a sustentabilidade industrial, minimizando o desperdício de materiais e otimizando a utilização de recursos.

Entre as diversas técnicas empregadas na manutenção preditiva, a análise de vibrações se destaca como uma das mais eficazes para o diagnóstico de problemas mecânicos em máquinas rotativas.

Esse método permite identificar falhas como desalinhamentos, desbalanceamentos, folgas excessivas, desgaste de rolamentos, engrenagens danificadas e outros problemas estruturais que poderiam comprometer o desempenho dos equipamentos. A análise de vibração tem sido amplamente utilizada ao longo dos últimos 50 anos e é reconhecida como a principal ferramenta para avaliação do estado mecânico das máquinas (Dube; Dhamande; Kulkarni, 2013). Sua aplicação contínua possibilita a detecção precoce de anomalias, permitindo a tomada de decisões estratégicas para evitar falhas inesperadas.

A implementação eficaz da manutenção preditiva, no entanto, não depende apenas da utilização dessas ferramentas avançadas. Para que esse modelo seja bem-sucedido, é fundamental que a empresa invista na capacitação técnica de sua equipe, garantindo que os profissionais responsáveis pelo monitoramento dos equipamentos possuam conhecimento adequado para interpretar os dados coletados. Além disso, é necessário contar com sistemas de monitoramento eficientes e uma cultura organizacional voltada para a antecipação de problemas, incentivando práticas de gestão baseadas em dados e na melhoria contínua dos processos.

Portanto, ao adotar a manutenção preditiva como estratégia principal para o gerenciamento de equipamentos, as empresas não apenas reduzem custos operacionais e evitam falhas inesperadas, mas também aumentam a confiabilidade dos seus sistemas, garantindo maior produtividade e segurança em suas operações. Essa abordagem representa um avanço significativo na forma como os ativos industriais são gerenciados, contribuindo para a eficiência e competitividade das organizações no cenário atual.

2 METODOLOGIA

Os testes foram realizados pela empresa responsável pela máquina e analisados por uma empresa nacional especializada em análise de vibração. Estes testes consistiram na análise de vibração por meio da instalação de acelerômetros piezoelétricos, que são sensores altamente sensíveis capazes de detectar pequenas variações nas vibrações mecânicas. Esses dispositivos foram instalados estrategicamente na caixa de engrenagem planetária do acionamento do eixo dianteiro de um trator modelo TR7500 e no rotor do ventilador do extrator primário de uma colhedora de cana modelo CH570, ambos fabricados pela John Deere. Durante a análise, ambas as máquinas estavam operando sob a carga de trabalho máxima especificada para cada modelo, o que garante a avaliação do desempenho em condições de maior esforço.

Os acelerômetros foram fixados por meio de ímãs (como mostrado na Figura 1), o mais próximo possível dos compartimentos avaliados, para assegurar a precisão na captação dos dados. As medições foram realizadas em três direções distintas: axial, radial e tangencial, o que permitiu uma análise tridimensional das vibrações.

Essa abordagem é essencial para identificar problemas como desalinhamento, desbalanceamento, folgas mecânicas e outros defeitos que poderiam comprometer o funcionamento e a vida útil dos equipamentos.

O sinal captado pelos acelerômetros foi transmitido via Bluetooth® para um armazenador de dados, que posteriormente enviou essas informações para serem analisadas pela empresa responsável. Essa etapa de processamento e análise é fundamental, pois os dados brutos coletados pelos sensores precisam ser interpretados por softwares especializados e por profissionais capacitados, que utilizam métodos como transformada de Fourier para decompor e avaliar as frequências das vibrações.

A análise de vibração, como realizada nesses testes, é amplamente utilizada em programas de manutenção preditiva. A sua aplicação em máquinas agrícolas, como tratores e colhedoras de cana, é de extrema importância, considerando o impacto que falhas mecânicas podem causar na produtividade e nos custos operacionais. Além disso, a análise sob condições de carga máxima permite prever falhas que poderiam passar despercebidas em testes sob condições normais de operação, aumentando assim a confiabilidade dos equipamentos. O uso de acelerômetros piezoelétricos e a transmissão de dados via Bluetooth® refletem a modernização das práticas de manutenção, que incorporam tecnologias avançadas para garantir eficiência e precisão no diagnóstico de possíveis falhas.

Figura 1.: Fixação dos acelerômetros por ímãs em A. Exemplo de um extrator primário de uma colhedora de cana em B. Função do extrator primário de uma colhedora de cana e sua função (remover a maior parte da palha de cana durante a colheita) em C.



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

A empresa responsável pela análise usa do método da medida do valor global. Este é um método de análise aproximado do sinal, que faz abstrações do parâmetro frequência, mensurando a amplitude avaliada de diferentes formas. Esta leva em conta:

- a) O valor pico a pico, isto é, mede-se a amplitude máxima da onda fundamental, que é útil, por exemplo, quando o deslocamento vibratório de uma máquina é crítico em relação às restrições de carga máxima ou de "jogo mecânico"

- b) O valor de crista (ou de pico), é uma medida importante para indicar, por exemplo, o nível de um choque de curta duração.
- c) O valor eficaz, medida que leva em conta a avaliação do valor das componentes harmônicas diretamente relacionadas ao conteúdo energético da vibração. O problema de se analisar e estabelecer comparações entre diversos sinais de vibração não pode ser resolvido com base no simples conhecimento de valores de sua amplitude e frequência. Uma forma de resolver este problema foi o estabelecimento de algumas medidas, cuja definição permite o cálculo de valores quantitativos globais para um movimento vibratório $x(t)$ qualquer, descrito no domínio do tempo. Estes valores são: valor eficaz ou RMS, valor médio, fator de forma e fator de crista cujas expressões são dadas pelas Equações 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (1)$$

$$x_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2)$$

$$F_f = \frac{x_{RMS}}{x_m} \quad (3)$$

$$F_c = \frac{x_{pico}}{x_{RMS}} \quad (4)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados foi conduzida por uma empresa especializada em monitoramento e diagnóstico de vibrações, utilizando metodologias avançadas para garantir precisão na detecção de falhas e otimização da manutenção preditiva. Para a caixa de engrenagem planetária do acionamento do eixo dianteiro, foi empregada a técnica de análise de aceleração pela frequência, um método eficaz para identificar impactos e variações bruscas nos componentes internos, como engrenagens e rolamentos, permitindo a detecção precoce de falhas estruturais, como desgaste de dentes ou desalinhamentos. Esse tipo de análise é essencial, pois falhas em sistemas planetários podem comprometer a eficiência da transmissão de potência e gerar falhas catastróficas se não forem tratadas a tempo.

No caso do rotor do extrator do ventilador, optou-se pela análise da velocidade pela frequência, uma abordagem mais adequada para componentes rotativos de médio e grande porte, pois fornece uma visão mais clara das oscilações de vibração e de possíveis problemas relacionados ao balanceamento, folgas mecânicas e desalinhamentos.

A velocidade vibracional é um indicador crucial, pois reflete a intensidade dos deslocamentos ao longo do tempo, sendo amplamente utilizada na norma ISO 10816, que estabelece critérios de severidade de vibração para diferentes tipos de máquinas rotativas.

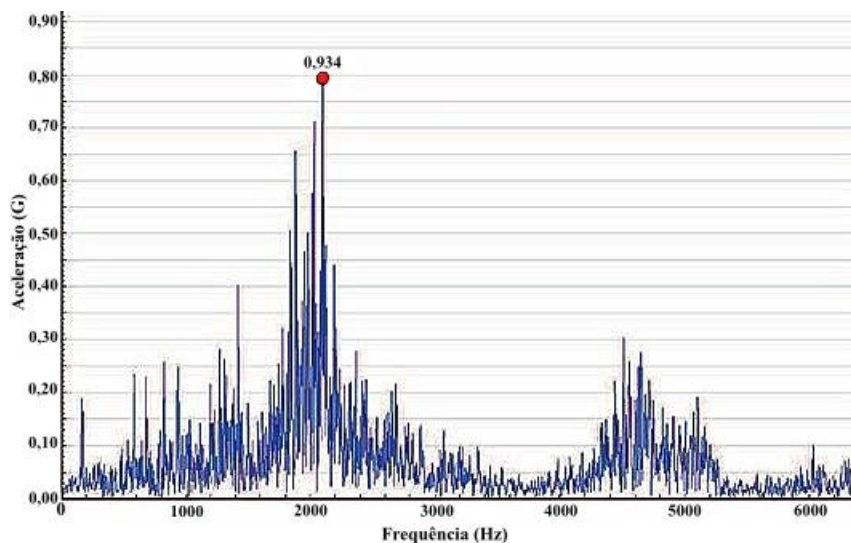
Além disso, para prever a progressão das falhas e estimar o tempo de vida útil dos componentes, foi empregada uma curva de tendência, baseada no acompanhamento do comportamento vibracional ao longo do tempo. Esse método permite a identificação de padrões de degradação progressiva, possibilitando a programação de manutenções corretivas antes que os danos atinjam níveis críticos. A utilização de algoritmos estatísticos e modelos preditivos pode complementar essa abordagem, permitindo um planejamento mais eficiente da manutenção e reduzindo custos operacionais.

A integração dessas diferentes técnicas de análise reforça a importância da manutenção preditiva baseada em condição (CBM - Condition-Based Maintenance), garantindo maior confiabilidade dos equipamentos e minimizando paradas não planejadas. Com o avanço da tecnologia, a incorporação de sistemas de monitoramento em tempo real e o uso de inteligência artificial (IA) aplicada à análise de vibração têm se mostrado tendências promissoras, elevando a precisão dos diagnósticos e permitindo intervenções cada vez mais estratégicas na gestão da manutenção industrial.

3.1 Análise de vibração na caixa de engrenagem planetária do acionamento do eixo dianteiro de um trator

Os dados obtidos na Figura 2 são os valores de vibração de nível global. Esse método foi utilizado por ser capaz de medir o valor global de vibração, em uma extensa faixa de frequência. Pelo seu funcionamento, este instrumento mede a vibração total resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal de vibração, dentro da faixa considerada. As medições são comparadas com os valores de referência do banco de dados da empresa para esse equipamento.

Figura 2. :Resultados obtidos para vibrações das engrenagens, frequência *versus* aceleração



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Caso o engrenamento fosse perfeito, a vibração captada pelo sensor deveria apresentar um comportamento puramente senoidal, com a presença de apenas uma frequência fundamental, correspondente à frequência do engrenamento. No entanto, qualquer irregularidade, desgaste ou esforço externo faz com que esse engrenamento ideal deixe de existir, alterando o modo de vibração e gerando esforços adicionais no sistema, os quais podem resultar em falhas prematuras.

Ao analisar o gráfico da Figura 2, foram detectados picos de aceleração acima de 0,4 g na banda de frequência entre 1800 e 2300 Hz. Esses valores, quando comparados ao histórico de medições do equipamento fornecido pela gerência de manutenção, indicaram sinais iniciais de uma possível falha no elemento analisado. Como medida corretiva, o equipamento foi desmontado, e detectou-se a presença de folga entre os componentes.

Segundo Junior (2009), as folgas representam uma fonte perigosa de vibrações em sistemas mecânicos, pois elas concentram grande energia cinética no equipamento devido à geração de muitos harmônicos. Nesse caso específico, as vibrações nos dentes das engrenagens foram causadas por ações dinâmicas associadas, resultando em altas frequências de contato. A presença de folga na engrenagem provocou impactos entre os dentes, que se manifestaram no sinal vibratório como aumentos significativos na aceleração em frequências específicas.

As folgas em engrenagens geram não apenas choques mecânicos, mas também podem acelerar processos de desgaste devido ao aumento das forças de impacto e à redução da precisão no contato entre os dentes. Esses fatores tendem a intensificar vibrações que comprometem o desempenho do sistema como um todo. Além disso, a energia gerada pelos harmônicos e os impactos repetitivos podem causar danos cumulativos, resultando em trincas ou até mesmo falhas catastróficas em casos extremos.

A detecção precoce desses sinais é crucial para evitar falhas mais severas e paradas não programadas. Técnicas de análise como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) são amplamente empregadas para decompor os sinais vibratórios em suas componentes de frequência, facilitando a identificação de anomalias, como aquelas causadas por folgas.

Neste contexto, a manutenção preditiva, aliada à análise de vibrações, não apenas identifica problemas emergentes como as folgas, mas também permite a realização de ações corretivas pontuais, como ajustes ou trocas de componentes, antes que a falha se agrave. Essa abordagem reduz custos operacionais, aumenta a confiabilidade dos equipamentos e minimiza o impacto na produtividade.

3.2 Análise de vibração do rotor do ventilador do extrator primário de uma colhedora

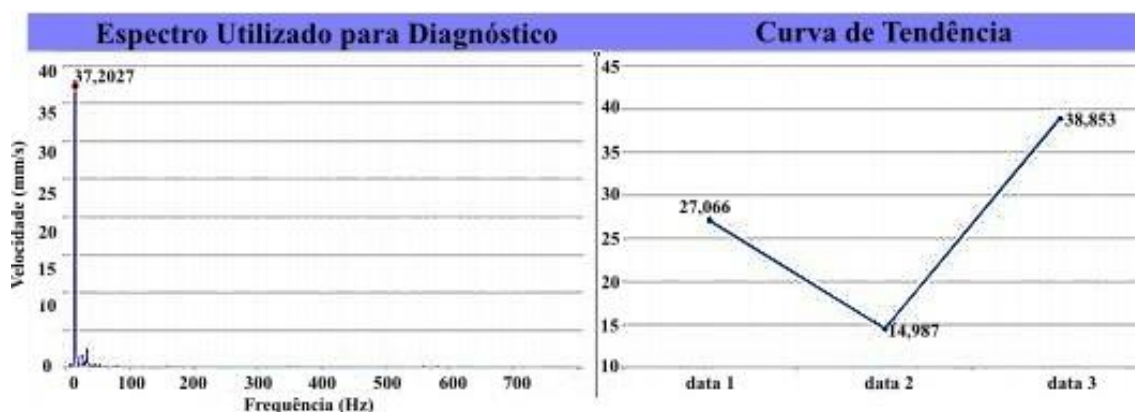
Garcia (2005), em sua tese sobre a análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos por meio da monitoração de vibrações, ressaltou a importância do monitoramento contínuo para a detecção precoce de falhas e a otimização da manutenção industrial. Para a construção da curva de tendência utilizada na análise, foi adotado o parâmetro *Root Mean Square* (RMS), ou valor médio quadrático, um dos indicadores mais robustos na avaliação da severidade vibracional. Conforme apontado por Benevenuti (2004), o RMS é amplamente utilizado em diagnósticos de falhas devido à sua capacidade de considerar o histórico completo da onda no tempo, permitindo a quantificação da energia total contida no sinal vibratório. Esse método possibilita não apenas a identificação de anomalias, mas também a previsão do comportamento do sistema ao longo do tempo, viabilizando ações preditivas antes que falhas catastróficas ocorram.

A análise do RMS é particularmente eficaz para detectar desequilíbrios, desalinhamentos, falhas em rolamentos e engrenagens desgastadas, sendo um método fundamental em programas de manutenção preditiva baseada em condição (CBM - Condition-Based Maintenance). A eficácia desse parâmetro se deve ao fato de que oscilações anômalas nos valores médios quadráticos geralmente indicam um aumento na carga dinâmica da máquina, revelando potenciais falhas estruturais ou operacionais. Além disso, estudos mais recentes, demonstram que o RMS é um dos parâmetros fundamentais na análise espectral, onde é possível correlacionar padrões de vibração específicos a diferentes tipos de falhas mecânicas.

No caso específico do rotor do ventilador analisado, os resultados apresentados na Figura 3 fornecem uma visão detalhada do comportamento vibracional do sistema, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo para evitar desgastes prematuros e falhas inesperadas. Através da interpretação da curva de tendência, é possível estabelecer limiares de criticidade e determinar o momento exato para intervenções corretivas, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade do equipamento.

A integração desse tipo de análise com técnicas modernas, como Machine Learning e Análise Preditiva Baseada em Inteligência Artificial, tem se mostrado uma abordagem promissora para aprimorar ainda mais a precisão na detecção e prevenção de falhas em sistemas rotativos industriais.

Figura 3. : Resultados obtidos para vibrações do rotor do ventilador do extrator primário de uma colhedeira de cana. À esquerda, temos o espectro da velocidade pela frequência utilizado na análise de falhas. À direita, temos a curva de tendência com a previsão de falha do equipamento, em função dos diagnósticos em datas anteriores.



Fonte: Os autores (Souza e Aires, 2024)

Com base no gráfico da Fig.3 podemos observar, um desbalanceamento, que ocorre quando há uma distribuição desigual de massa em torno da linha central de rotação de um eixo, gerando cargas nos mancais como resultado das forças centrífugas. Esse fenômeno ocorre em certo grau em todas as máquinas rotativas. O desbalanceamento pode ser identificado no espectro de frequências conforme a Fig. 3(a), com um pico de valor igual ao valor de rotação do eixo. A amplitude é proporcional à quantidade do desbalanceamento, tendendo sempre a crescer com o passar do tempo. A distribuição desigual de massa se deu, por se tratar de uma máquina agrícola, pelo acúmulo de terra e pelo desgaste que esta provocou no equipamento.

O gráfico da Fig.3 (b) mostra a curva de tendência, através dela, pode-se prever como evoluirá a falha, e com isso, determinar a parada programada do equipamento para intervenção, antes do colapso da estrutura e parada repentina do equipamento. Devido à condição da máquina ser nova, houve um período de "run-in", também chamado de amaciamento. Neste período a vibração é alta e tende a diminuir. Quando a vibração tende a se elevar novamente, já é consequência de desgastes.

4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que a manutenção preditiva é uma ferramenta essencial para o diagnóstico antecipado de possíveis falhas em equipamentos industriais. Esse tipo de manutenção permite à empresa uma gestão mais eficiente de seus recursos, proporcionando economia de tempo, redução de custos financeiros e otimização da alocação de recursos humanos. Além disso, ao evitar falhas inesperadas, contribui significativamente para o aumento da vida útil dos equipamentos e a melhoria da segurança operacional.

Entre as diversas técnicas de monitoramento utilizadas na manutenção preditiva, a análise por meio de vibrações se destaca pela sua capacidade de identificar anomalias na frequência natural de trabalho das máquinas. Esse método não apenas possibilita a detecção precoce de problemas, mas também auxilia na identificação precisa da origem das falhas, permitindo que intervenções corretivas sejam realizadas antes que danos mais severos ocorram.

Problemas como folgas excessivas e desbalanceamentos acima do limite aceitável podem gerar esforços adicionais não previstos no projeto original dos equipamentos. Quando esses esforços não são identificados a tempo, podem se propagar para outros componentes do sistema, resultando em desgaste acelerado, falhas estruturais e, em casos mais extremos, falhas catastróficas. Nessas situações, a necessidade de interrupção emergencial das atividades para substituição ou reparo de peças se torna inevitável, impactando diretamente a produtividade e a eficiência operacional.

No caso analisado, a avaliação das vibrações revelou a presença de picos anormais nos componentes do sistema. Esses picos foram atribuídos a dois fatores principais: um desbalanceamento no rotor do extrator e uma folga excessiva na caixa de engrenagens. O desbalanceamento do rotor gerou forças dinâmicas adicionais que comprometeram o funcionamento adequado do equipamento, enquanto a folga na caixa de engrenagens contribuiu para instabilidades que afetaram o desempenho do conjunto mecânico. Como consequência, essas condições adversas impuseram cargas extras ao sistema original, aumentando os riscos de falha prematura e reduzindo a confiabilidade operacional.

Portanto, a análise da vibração demonstrou ser uma ferramenta indispensável para a detecção e mitigação de falhas mecânicas. A adoção contínua dessa técnica na manutenção preditiva não apenas melhora a disponibilidade dos equipamentos, mas também minimiza custos com reparos emergenciais, evita paradas não programadas e contribui para a eficiência global dos processos industriais. Dessa forma, investir em monitoramento preditivo se torna uma estratégia fundamental para garantir maior competitividade e sustentabilidade às operações industriais.

REFERÊNCIAS

- BENEVENUTI, E. de L. **Metodologia para monitoração e diagnóstico de vibração das bombas moto-operadas do circuito primário de refrigeração do reator IEA-R1**. Diss. Dissertação de Mestrado, IPEN/USP, 2004.
- DUBE, A. V; DHAMANDE, L. S.; KULKARNI, P. G. Vibration Based Condition Assessment of Rollingelement Bearings With Localized Defects. **International Journal of Scientific & Technology Research**, Vol. 2, 2003, pp. 149–155.
- GARCIA, M.S. **Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações**. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- JUNIOR, G.M. **Análise das vibrações em exaustores de fornos de fábrica de cimento para identificar seus modos de falha**. Monografia de especialização em Engenharia de Confiabilidade Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- PEREIRA, P.M.S. **Planos de Manutenção Preventiva Manutenção de Equipamentos Variáveis na BA Vidro**. Projecto de Dissertação em Empresa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2009.