



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ-CAMPUS SOBRAL
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO VINÍCIUS MIRANDA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COMO TÉCNICA DE PREDITIVA EM
MOTORES DE UM PARQUE INDUSTRIAL.

SOBRAL
2022

PAULO VINÍCIUS MIRANDA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COMO TÉCNICA DE PREDITIVA EM
MOTORES DE UM PARQUE INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eber de castro Diniz

SOBRAL

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R615a Rodrigues, Paulo Vinícius Miranda.
Aplicação da Análise de Vibração como Técnica de Preditiva em Motores de um Parque Industrial /
Paulo Vinícius Miranda Rodrigues. – 2022.
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.
Orientação: Prof. Eber de Castro Diniz.

1. Preditiva, motores elétricos. I. Título.

CDD 621.3

PAULO VINÍCIUS MIRANDA RODRIGUES

APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO COMO TÉCNICA DE PREDITIVA EM
MOTORES DE UM PARQUE INDUSTRIAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica

Aprovada em: __ / __ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eber de Castro Diniz (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Reuber Regis de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Paulo José de Machado de Azevedo

A Deus.

Aos meus pais, Paulo e Vicente,
A minha Mãe Maria da Penha (em
memória).

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir e me dar sabedoria e força para enfrentar momentos de dificuldades e os desafios dessa longa trajetória.

Aos meus pais, Vicente de Paulo, Paulo Sérgio e Maria da penha, pelo apoio incondicional e por nunca medir esforços para que eu tivesse condições chegar até aqui, essa vitória também é de vocês.

À minha mãe Alexsandra, que sempre me ouviu, apoiou e me deu sua amizade incondicional.

À minha família, na figura dos meus Tios e Primos, que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial.

À Grendene, que me abriu as portas e me deu oportunidade e confiança, sendo peça fundamental na minha formação como Engenheiro e como pessoa. Além de me fornecer todas as condições para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos, que foram meus companheiros de batalha, que tornaram essa jornada mais leve, em especial ao Neto que sempre esteve comigo nas batalhas diárias.

“Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.”

Charles Darwin

RESUMO

O presente trabalho, tem como objetivo demonstrar as atividades de manutenção preditiva, através da análise de vibração em motores elétricos no parque industrial, localizado na cidade de Sobral - CE. Neste sentido, selecionamos equipamentos críticos ao processo industrial, tais como bombas e exaustores. Dessa forma, aplicamos o método preditivo, para identificar as causas responsáveis pela geração de alteração no funcionamento dos equipamentos. Como resultado, apresentamos dois estudos de caso. No primeiro caso, avaliamos uma bomba centrífuga enquanto, no segundo caso, um exaustor industrial. Para realizar a análise vibracional, utilizamos instrumentos que avaliam os níveis de vibração global e que aplicam a transformada rápida de Fourier, para diagnosticar as possíveis falhas através do espectro vibracional apresentado pelos equipamentos. Através destes resultados, podemos discutir os impactos gerados pela realização da manutenção preditiva associada a gestão de manutenção dos equipamentos. Concluímos que, a aplicação da manutenção preditiva, associada aos conceitos de gestão, proporciona um resultado extraordinário, sem a necessidade de aumentar os custos de manutenção e, além disso, reduz o risco da quebra repentina dos equipamentos, o que impactaria diretamente na produção. O uso da matriz de criticidade favoreceu a maior eficiência na realização da manutenção preditiva, uma vez que, devido ao número de equipamentos não seria possível realizar todas as avaliações com a mesma periodicidade.

Palavras-chave: manutenção preditiva; análise de vibração; análise de espectros.

ABSTRACT

The present work aims to demonstrate the activities of predictive maintenance, through the analysis of vibration in electric motors in the industrial park, located in the city of Sobral - CE. In this sense, we select equipment critical to the industrial process, such as pumps and exhaust fans. In this way, we apply the predictive method to identify the causes responsible for generating changes in the operation of the equipment. As a result, we present two case studies. In the first case, we evaluated a centrifugal pump while, in the second case, an industrial exhaust fan. To perform the vibrational analysis we use instruments that assess global vibration levels and apply the fast Fourier transform to diagnose possible failures through the vibrational spectrum presented by the equipment. Through these results, we can discuss the impacts generated by carrying out predictive maintenance associated with equipment maintenance management. We conclude that the application of predictive maintenance, associated with management concepts, provides an extraordinary result, without the need to increase maintenance costs and, in addition, reduces the risk of sudden equipment breakdown, which would directly impact production. The use of the criticality matrix favored greater efficiency in carrying out predictive maintenance, since, due to the number of equipment, it would not be possible to carry out all evaluations with the same frequency.

Keywords: predictive maintenance; vibration analysis; spectrum analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva PF apresentando o intervalo entre a falha potencial e a falha funcional	1
Figura 2 - Representação esquemática do rotor do tipo gaiola de esquilo	19
Figura 3 - Representação esquemática das partes construtivas de um motor de indução trifásico.....	2
Figura 4 - Representação esquemática da vista explodida com os componentes de um rolamento.....	2
Figura 5 - Representação de uma placa de identificação de um motor de indução trifásico.....	2
Figura 6 - Representação da Defasagem dos Parâmetros de Vibração.....	23
Figura 7 - Representação gráfica de Nível de Vibração.....	21
Figura 8 - Representação dos sinais no domínio do tempo.....	26
Figura 9 - Sinais no domínio do tempo.....	27
Figura 10 - Representação do espectro de desbalanceamento.....	2
Figura 11 - Desalinhamento paralelo.....	2
Figura 12 - Representação do espectro de desbalanceamento paralelo.....	21
Figura 13 - Desalinhamento angular.....	21
Figura 14 - Desalinhamento combinado.....	29
Figura 15 - Rotor excêntrico e seu espectro.....	30
Figura 16 - Tipos de folgas mecânicas em máquinas rotativas.....	31
Figura 17 - Espectro dos tipos de folgas mecânicas.....	30
Figura 18 - Espectro de vibração em um mancal de rolamento para os quatro estágios de falhas.....	3
Figura 19 - Pontos de medição em máquinas rotativas definido pela norma ISO 10816-1.....	3
Figura 20 - Limites de vibração segundo a norma ISO 10816.....	34
Figura 21 - Níveis de envelope de aceleração por classes de rolamentos.....	34
Figura 22 - Classes de isolamento dos motores elétricos.....	3
Figura 23 - Quantidade de motores por classe de criticidade.....	3
Figura 24 - Caneta de vibração utilizada durante as inspeções.....	31
Figura 25 - Pirômetro utilizado nas inspeções.....	3
Figura 26 -- Analisador de espectro usado durante as inspeções.....	38
Figura 27 - Sensor triaxial que faz coleta de dados no domínio da frequência.....	39

Figura 28 - Exaustor e a localização de seus mancais.....	39
Figura 29 - Motores elétricos sistema de exaustão e suas potências.....	4
Figura 30 - Motores elétricos sistema de bombeamento de água.....	4
Figura 31 - Espectro de vibração coletada no dianteiro do motor de indução.....	4
Figura 32 - Espectro de vibração horizontal do mancal próximo à polia.....	4
Figura 33 - Desgastes do mancal próximo a polia do exaustor em estudo.....	4
Figura 34 - Histórico de velocidade de vibração dos mancais do exaustor.....	4
Figura 35 - Conjunto motor bomba em estudo e seus pontos de medição.....	4
Figura 36 - Desgaste no rotor da bomba centrifuga.....	4
Figura 37 - Níveis de vibrações em mm/s nos pontos de coletas da bomba e estudo.....	4
Figura 38 - Temperatura no centro de carcaça do motor.....	4
Figura 39 - Histórico de manutenções emergências em motores de indução.....	48
Figura 40 - Histórico de manutenções planejadas em motores de indução.....	48
Figura 41 - Modelo de base metálica que foi escolhido.....	4
Figura 42 - Equipamento antes e após manutenção na sua estrutura de fixação.....	4
Figura 43 - Número de motores queimados entre os anos de 2020 e 2021.....	5

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência de rotação dos rotores e suas harmônicas.....	42
Tabela 2 - Valores de velocidade de vibração medidos nos pontos de coleta.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Manutenção Industrial	16
2.1.1	Manutenção preditiva	17
2.2	Motores Elétricos de Indução	18
2.2.1	Dados de placa	21
2.2.2	Modos de falhas em motores elétricos	22
2.2.3	Preditiva aplicada a motores elétricos	22
2.2.4	Análise de vibração em motores elétricos	23
2.2.4.1	Conceitos básicos sobre vibração	23
2.2.4.2	Níveis de vibração	23
2.2.4.3	Analisadores de frequência por Transformada de Fourier	23
2.2.5	Principais causas de vibração e seus espectros	27
2.2.5.1	Desbalanceamento	27
2.2.5.2	Desalinhamento	27
2.2.5.3	Excentricidade	27
2.2.5.4	Folgas mecânicas	33
2.2.5.5	Falha nos rolamentos	33
2.3	Pontos de coletas de vibração e níveis de vibração	33
2.4	Análise de temperatura	35
3	OBJETIVO	36
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1	Análise da Criticidade.....	36
4.2	Realização da Manutenção Preditiva de Vibração.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
6	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

As condições, requisitos e obrigações, exigem rápidas mudanças nas organizações. Neste sentido, as empresas sempre estão avaliando novos cenários, seus concorrentes, mudanças nos requisitos, tendência dos negócios, inovação tecnológica, complexidade dos sistemas, exigências ambientais, entre outros. Todos estes obstáculos devem ser remediados pela empresa como um todo, isto é, todas as funções administrativas e produtivas devem fazer o seu melhor esforço. A produção e a manutenção são as funções administrativas e operacionais mais relevantes, visto que, ambas têm a missão de garantir o funcionamento e a melhoria da infraestrutura produtiva da empresa. Além disso, precisam entregar os produtos ou serviços dentro dos prazos, com a qualidade solicitada e a quantidade projetada (SWANSON, 2001).

Na indústria contemporânea, há uma maior atenção em reduzir o custo de manutenção, sem alterar o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. Existem muitas metodologias para realizar, tanto a manutenção, quanto a gestão dos equipamentos. De acordo com as características dos equipamentos que se pretende avaliar, a gestão ou a manutenção a ser realizada, será mais eficiente e mais vantajosa. Os motores elétricos críticos no processo precisam de uma atenção especial, pois são equipamentos presentes em grande quantidade nas plantas industriais, e estão diretamente ligadas a produtividade de uma fábrica. Desta forma a manutenção desempenha um papel fundamental no apoio para manter a logística da empresa, estando diretamente relacionada com a competitividade do sistema industrial (TEIXEIRA, 2001).

A manutenção preditiva tem como objetivo identificar as falhas nos equipamentos e descobrir as possíveis causas dessas falhas, antes que o equipamento perca totalmente a sua função. Essa manutenção é realizada através de técnicas de detecção de falhas, sendo a técnica de análise de vibração a mais difundida na indústria, permitindo tanto a detecção de falhas mecânicas quanto elétricas. Neste contexto, a aplicação da metodologia de manutenção preditiva através da técnica de análise de vibração nos motores de um parque industrial, é o foco do estudo neste trabalho, objetivando a redução de paradas de manutenção não programadas e a diminuição da queima dos motores, proporcionando um aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

O conhecimento sobre a estrutura e funcionamento de um motor de indução é de extrema importância para o desenvolvimento desse trabalho. Para a aplicação da

técnicas de análise de vibração, é preciso entender como as vibrações se desenvolvem nos equipamentos e como cada estado pode estar relacionado com um determinado defeito. Em campo, foram realizadas medidas dos níveis de velocidade de vibração e temperatura de funcionamento da máquina. Essas quantificações, foram acompanhadas através de gráficos de tendência, permitindo a detecção e o acompanhamento na tendência da apresentação de falhas. Quando se detectam os defeitos antes que o equipamento perca sua função, é possível programar a manutenção de forma planejada, reduzindo as perdas de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção Industrial

O termo “manutenção” tem origem no vocabulário militar e significava manter nas unidades de combate, o efetivo e o material em nível constante. Esta terminologia aplicada na indústria ocorreu em 1950 nos Estados Unidos da América. Na França, por exemplo, o termo “manutenção” está relacionado à palavra “conservação” (MONCHY, 1989). Antigamente, as referências mais conhecidas da manutenção se caracterizavam por serviços repetitivos e de rotina, apenas com troca de peças, pouca técnica, improvisações e emergências. Entretanto, devido a sua grande influência na parada de produção, por causas gerenciais e técnicas, a manutenção vem ganhando maior importância.

Os processos produtivos industriais precisam de um elevado número de máquinas essenciais para produção de bens. Com isso, em um ambiente globalizado onde a alta qualidade e atendimento a prazos significam aumento da competitividade a manutenção tem um papel essencial para garantir a continuidade e a eficiência da produção. Neste sentido, a manutenção organizada possibilita a melhoria da disponibilidade dos equipamentos, além de introduzir modificações que possibilitam a melhoria no desempenho com o aumento da confiabilidade e da segurança. Desta forma, os custos são controlados, visto que, os trabalhos de manutenção são programados para serem executados no momento mais oportuno (SEELING, 2000).

As atividades de manutenção podem ser divididas em três tipos: manutenções corretiva, preventiva e preditiva. Existem relatos da manutenção corretiva com sua aplicação antes da segunda guerra mundial. A indústria não era mecanizada e, o princípio de funcionamento do equipamento, era o seu uso até a falha (KARDEC, 2009). As linhas de produção de baixo custo e equipamentos redundantes, a manutenção corretiva pode trazer retorno financeiro. Em muitos dos casos, a linha de produção é composta por equipamentos de alto custo e que não contam com o privilégio da redundância. Com isso, é fundamental o monitoramento das condições dos equipamentos críticos, acompanhando a saúde do maquinário para prever o momento da ocorrência de falhas.

A manutenção preventiva, pode ser entendida como a ação realizada para buscar a redução ou evitar a falha potencial ou funcional de um equipamento, seguindo um plano previamente elaborado e para um intervalo de tempo (KARDEC, 2009). Este tipo de abordagem preventiva, corresponde à segunda geração da manutenção. Essa

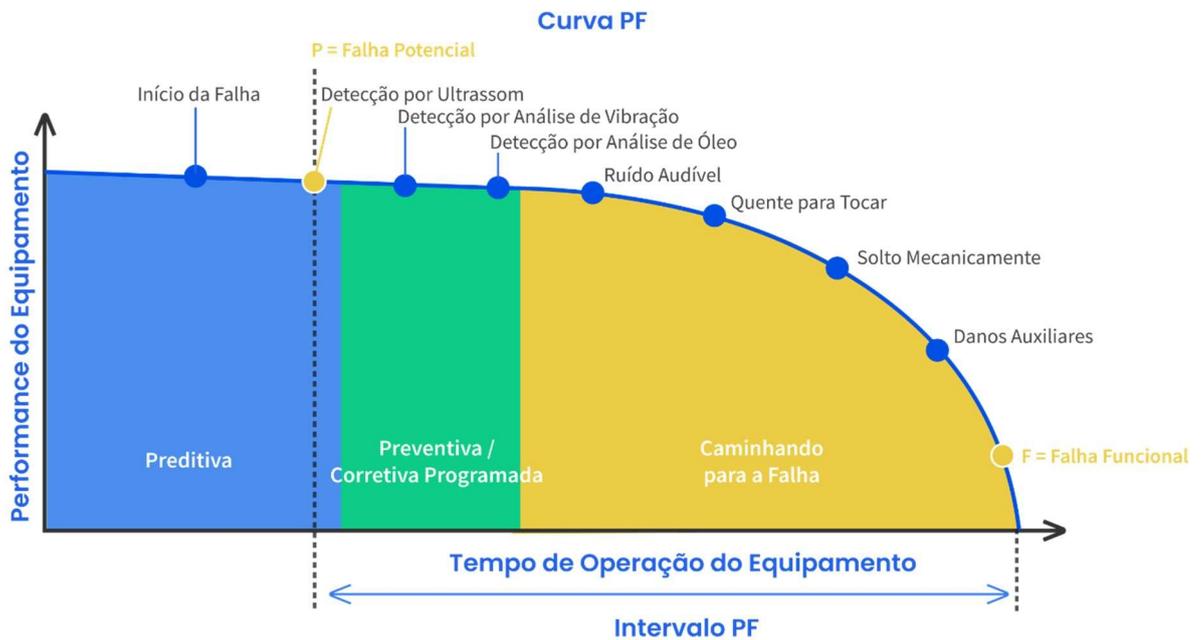
análise começou nas décadas de 50 e 60, em virtude do aumento da complexidade das plantas fabris e, desta forma, houve o aumento da necessidade em prevenir paradas de fabricação não programadas. Essa técnica de manutenção é aplicável apenas ao maquinário onde as taxas de falha estão relacionadas à idade do equipamento (GAGORA, 2016). Visto que, nem todo tipo de equipamento pode ser tratado de maneira preventiva, se faz necessária a aplicação de um método específico para avaliar as condições operacionais de máquina. A manutenção preditiva tem a finalidade em garantir o controle de qualidade do serviço, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando supervisões centralizadas ou de amostragem, com o objetivo de reduzir a manutenção corretiva (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

2.1.1 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é realizada com o objetivo de estabelecer o estado futuro de um equipamento, através da análise dos dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica (TELES, 2022). Desta forma, podemos prever e/ou encontrar falhas potenciais, com a finalidade de repará-los antes que o defeito agrave e se transforme em uma falha funcional.

A falha potencial é definida como o momento em que a falha surge no ativo, não comprometendo completamente o funcionamento do equipamento, mas diminuindo o seu desempenho. A cada instante que se passa por sua vez a falha funcional acontece quando o equipamento possui incapacidade para atender a um padrão de desempenho especificado em projeto (TELES, 2022). Na Figura 1 é apresentado um exemplo de curva PF (Potential failure). Esta curva tem como objetivo principal evidenciar o intervalo entre a falha potencial e a falha funcional. O eixo horizontal (abcissas) representa a vida útil do ativo enquanto que, o eixo vertical (ordenadas), está relacionando o desempenho do equipamento. A curva PF demonstra que, o desempenho ou condição de um recurso ou componente, diminui ao longo do tempo, levando a falha funcional.

Figura 1 – Curva PF apresentando o intervalo entre a falha potencial e a falha funcional.



Fonte: TELES (2021).

As principais informações coletadas para avaliação dos equipamentos durante a manutenção preditiva são através da análise de vibração, termografia, análises de óleo e ultrassom. Dentre estas técnicas, a análise de vibração é o método mais difundido nas indústrias. Esta técnica permite a detecção de um extenso número de falhas, através do uso de sensores de vibração mecânica, instalados em locais estratégicos nos equipamentos (GAGORA, 2016).

2.2 Motores Elétricos de Indução

O motor de indução, devido a sua robustez e baixo custo, é o motor mais utilizado, visto que, aproximadamente 90% dos motores empregados na indústria são motores de indução (SILVA, 2015).

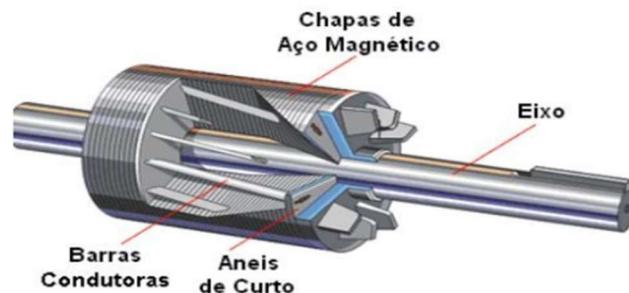
O funcionamento do motor de indução, ocorre através de um sistema elétrico trifásico, fundamentado na geração de um campo eletromagnético produzido no estator, através da circulação de corrente elétrica polifásica. A variação do fluxo da corrente elétrica, produz uma corrente induzida no rotor que, se opõe ao campo girante, fazendo com que ele seja arrastado (CHAPMAN, 2013). A velocidade de rotação do campo magnético é calculada pela resolução da equação 1.

$$n = \text{---} \quad (1)$$

Os motores de indução são divididos em duas partes principais, o estator e o rotor. No estator, estão localizadas as bobinas responsáveis pela criação do campo magnético girante, que induzem as correntes no rotor. Já o rotor, este pode ser do tipo bobinado ou do tipo gaiola de esquilo. O motor presente no sistema em estudo é um motor do tipo de indução trifásico com o rotor gaiola de esquilo.

Na Figura 2 é possível visualizar o rotor do tipo gaiola de esquilo. Este tipo de rotor é constituído por um núcleo de chapas de material ferromagnético, isoladas umas das outras, onde são colocadas chapas de material condutor ligadas em curto-circuito por dois anéis nas extremidades do rotor (FRANCHI, 2008).

Figura 2 - Representação esquemática do rotor do tipo gaiola de esquilo.

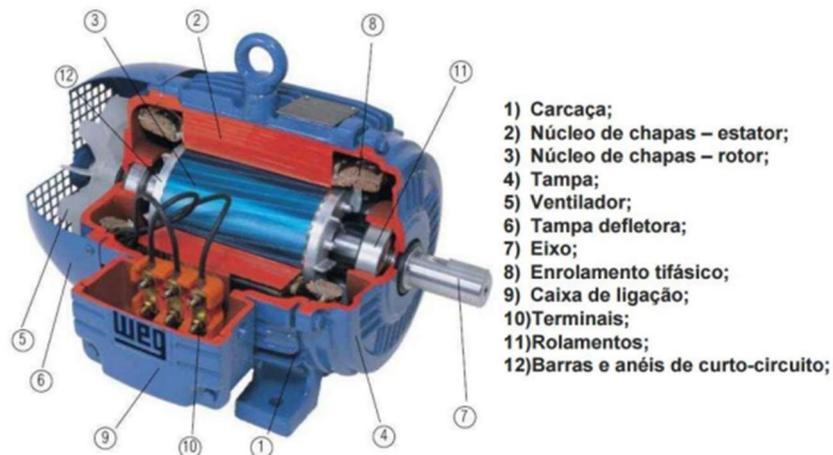


Fonte: WEG (2016).

Na Figura 3 observamos uma perspectiva de corte de um motor de indução trifásico (MIT). O estator é constituído de chapas de material ferromagnético empilhadas e isoladas entre si, acomodadas através de um conjunto de espiras de fios de cobre isolados, chamados de bobinas que são alimentadas por corrente alternada. Outra parte essencial de um motor de indução, são os seus rolamentos presentes nas extremidades do eixo do rotor. Eles são responsáveis por sustentar o rotor e proporcionar a possibilidade de giro livre, para fornecer potência mecânica na ponta do eixo (BHADESHIA, 2012). Os rolamentos consistem em elementos rolantes (esferas, cilindros ou formas de cano) e anéis que formam as pistas. Sua função é manter contato das duas partes que se movimentam, isoladamente, de forma a ter o menor atrito possível. Os elementos rolantes rodam entre as pistas (externa e interna).

guiados pela gaiola. A gaiola, por sua vez, é responsável por manter os elementos rolantes equidistantes e guiá-los, sendo os materiais mais utilizados para sua confecção aço, latão e plástico.

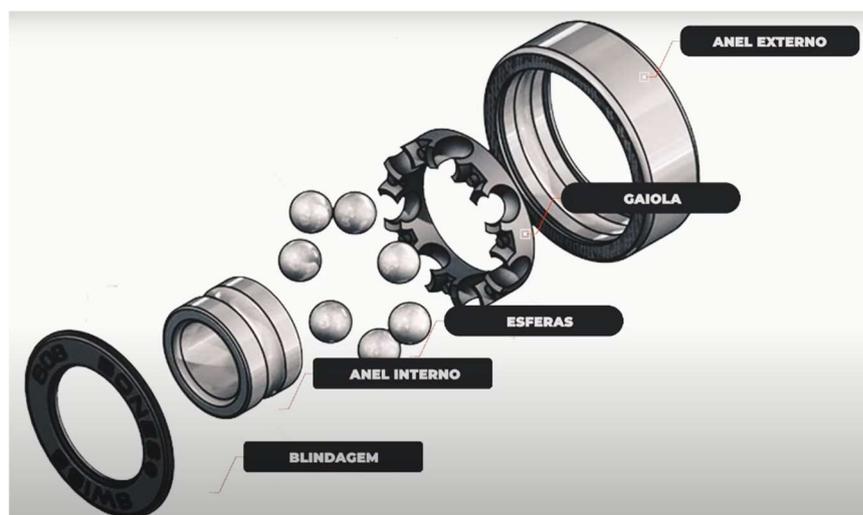
Figura 3 - Representação esquemática das partes construtivas de um motor de indução trifásico.



Fonte: WEG (2016).

A Figura 4 ilustra a vista detalhada de um rolamento de esferas, sendo os seus componentes: proteção, pista interna, esferas, gaiola e pista externa.

Figura 4 - Representação esquemática da vista explodida com os componentes de um rolamento.



Fonte: Disponível em: <http://www.longboardingguide.com/best-longboard-bearings/>. Acesso em: 10 de dezembro 2020.

Os MITs possuem várias formas de partida, sendo a mais simples, a partida direta, onde seus terminais de bobina são conectados diretamente na rede de alimentação. Operando em sua tensão nominal, esses motores possuem elevadas correntes de partida, estando entre quatro à oito vezes maiores que a sua corrente nominal. Desta forma, foram criadas metodologias para contornar esse problema. A partida estrela-triângulo, é a forma mais difundida em sistemas mais robustos.

Com o advento da eletrônica de potência, foram criadas chaves eletrônicas de partidas que possuem rampa de energização, buscando a diminuição das correntes de partidas, como por exemplo a soft-star e o inversor de frequência. Os inversores de frequência se sobressaem devido ao seu controle escalar entre tensão e frequência. Este controle garante que não ocorra perda de conjugado durante a partida e controle contínuo da velocidade do motor, podendo variar entre velocidades m baixas e a sua velocidade nominal.

2.2.1 Dados de placa

Entender os dados técnicos de um motor são fundamentais para que possamos avaliar as condições de operação na qual o equipamento se encontra. Os principais dados técnicos são encontrados na sua placa de identificação representada na Figura 5.

Figura 6 - Representação de uma placa de identificação de um motor de indução trifásico.



Fonte: WEG (2016).

2.2.2 Modos de falhas em motores elétricos

Um modo de falha é uma causa de falha ou uma forma possível pela qual um sistema pode falhar. Nos motores elétricos, seus modos de falha podem ser divididos pelo tipo de sua origem, sendo elas de origem elétrica ou de origem mecânica. De origem elétrica, podemos citar o desbalanceamento entre fases, baixa resistência de isolamento das bobinas, espaço curto entre as espiras, barras de rotor quebradas e o mau contato das caixas de ligação. Por sua vez, os modos de falha de origem mecânica são representados pelos rolamentos defeituosos, folgas mecânicas, desalinhamento e/ou desbalanceamento do rotor e/ou da carga.

A detecção e diagnóstico dos modos de falha permitem, a preservação dos motores elétricos de indução, traduzindo-se em aumento do desempenho e confiabilidade, associado à redução dos custos de manutenção. A detecção tem como objetivo encontrar as falhas, enquanto o diagnóstico se propõe a descobrir o tipo de falha e sua respectiva causa (CHOW, 2000).

2.2.3 Manutenção Preditiva aplicada a motores elétricos

Com objetivo de identificar os modos de falhas, existem várias técnicas de inspeção preditiva. Essas técnicas são divididas em dois grupos:

- Inspeções invasivas: são inspeções que apresentam a necessidade de retirar o equipamento de funcionamento para serem realizadas;
- Inspeções não invasivas: são inspeções onde não existe a necessidade de remover o equipamento de seu funcionamento.

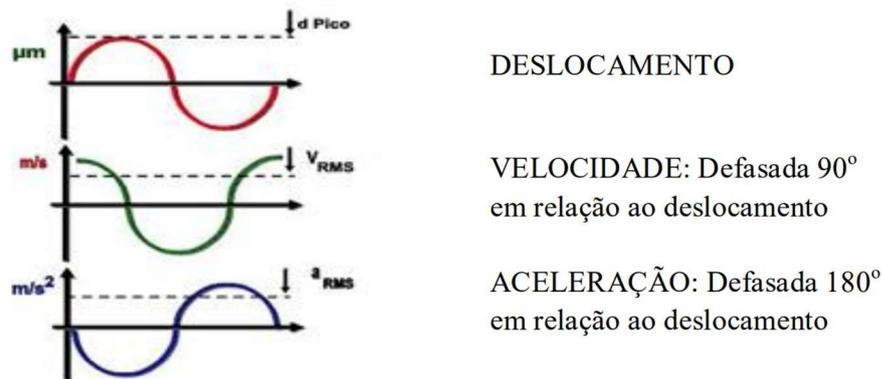
2.2.4 Análise de vibração em motores elétricos

Na indústria, a análise de vibração é, provavelmente, a técnica diagnóstica mais difundida e tipicamente empregada para avaliar as falhas de origem mecânica, e em alguns casos, falhas de origem elétrica (ANTONINO-DAVIU et al., 2017). Para a realização da análise da vibração como condição monitorada, devem ser levados em consideração três princípios: (i) todas as máquinas rotativas vibram em operação; (ii) a vibração aumenta ou diminui à medida que a condição do equipamento se deteriora e (iii) a vibração pode ser mensurada com precisão e interpretada (MAZUR et al., 2015).

2.2.4.1 Conceitos básicos sobre vibração

Para se entender os princípios da análise de vibração, é necessário compreender o que é vibração mecânica. A vibração mecânica é definida como um movimento, no qual se considera uma massa reduzida a um ponto submetido a uma força. A ação dessa força faz com que o ponto execute um movimento oscilatório. Para que o movimento oscilatório do ponto se constitua na vibração, ele deverá percorrer uma trajetória completa ou ciclo, conhecida como período de oscilação (BENEDETTI, 2002). Os parâmetros para mensurar os níveis de vibração são, na maioria das vezes, expressos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, cujas representações estão ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Representação da defasagem dos parâmetros de vibração



Fonte: SKF (1997).

O deslocamento (x) é medido em micrometros (μm) e pode ser medido pelo grau de distanciamento do ponto em relação à sua posição de repouso, sendo indicado para medições menores que 10 Hz. A equação 2 apresenta a fórmula utilizada para calcular o deslocamento (x).

$$X = A \text{ sen}(wt + \phi) \quad (2)$$

A velocidade de vibração, normalmente escolhida para avaliação da severidade de vibração, está compreendida entre 10 Hz e 1000 Hz. O deslocamento do ponto implica na existência de uma velocidade que poderá ser variável. Derivando uma vez a função deslocamento, obtêm-se a velocidade, representada pela equação 3.

$$v = \frac{dx}{dt} = Aw \cos(wt + \phi) \quad (3)$$

Uma vez que a velocidade é variável, existirá uma certa aceleração no movimento. Derivando duas vezes a função do deslocamento ou uma vez a função da velocidade, encontramos a aceleração, representada pela equação 4.

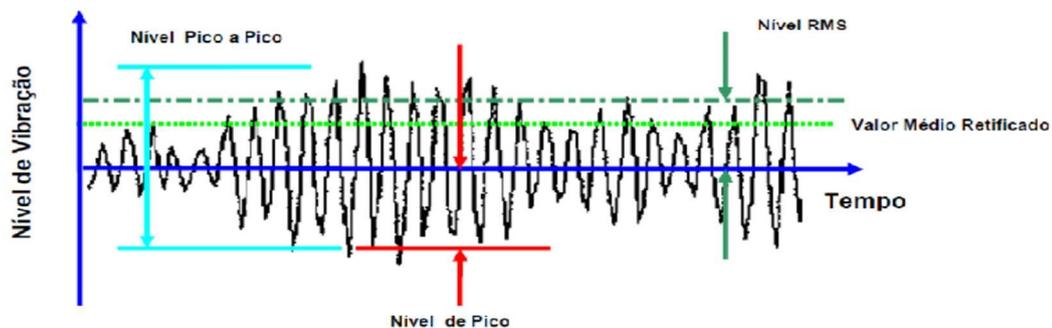
$$a = - = Aw^2 \text{sen}(wt + \emptyset) \quad (4)$$

A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, sua aplicação é recomendada na monitoração de rolamentos, engrenamentos, pulsação de pressão em compressores rotativos, e demais equipamentos que apresentem frequência de defeito entre 1.000 Hz e 10.000 Hz.

2.2.4.2 Níveis de vibração

Existem algumas maneiras para se avaliar os níveis de vibração de um espectro plotado no tempo, sendo eles: o valor pico a pico, valor de pico e o valor RMS (raiz média quadrática) (SPAMER, 2009), conforme representados na Figura 7.

Figura 7 - Representação gráfica dos níveis de vibração



Fonte: NEPOMUCENO (1989).

O valor de pico é utilizado para identificar choques de curta duração. Entretanto, indica somente a ocorrência do pico, sem levar em consideração o histórico da onda no tempo. O valor de pico a pico indica o percurso máximo da onda, isto é, o maior ciclo, podendo ser aplicado para identificar a falha no estágio prematuro e avançado. O valor de pico e o valor de pico a pico, não consideram o histórico da onda no tempo. Com isso, uma maneira de solucionar esse problema seria a utilização do valor de RMS ou valor médio quadrático. O valor RMS considera o histórico da onda no tempo, evidenciando a severidade da energia contida no sinal, ou seja, a capacidade destrutiva desta vibração (GARCIA, 2005).

Em muitos casos, principalmente em rolamentos, a vibração ocorre em altas frequências e baixas amplitudes. Desta forma, os choques ficam mascarados pelos eventos de amplitude maior e em frequências menores. Com isso, é utilizado parâmetro conhecido como envelope de aceleração. Nesta técnica, os eventos harmônicos em baixa frequência são filtrados, ressaltando eventos harmônicos altas frequências. Falhas com características impulsivas (choques), como as iniciais de rolamento, engrenamentos e alguns tipos de folga, são detectadas por esse parâmetro (SKF, 2010). Por exemplo, se um rolamento possui um defeito em sua pista externa, cada esfera que passar por esse defeito gera um pequeno sinal de vibração. Entretanto, esse sinal possui uma energia tão pequena que, em um monitoramento comum, é perdido por vibrações estruturais e componentes móveis na máquina (SKF, 2010). A unidade do envelope de aceleração foi desenvolvida pela empresa fabricante de rolamentos SKF.

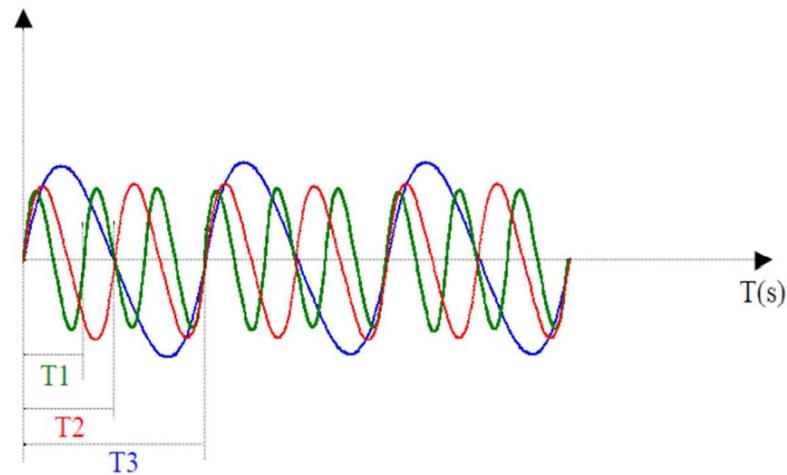
2.2.4.3 Analisadores de frequência por Transformada de Fourier

Durante o funcionamento de uma máquina rotativa, existem diversas fontes geradoras de vibração, fazendo com que as ondas de sinais no tempo não possibilitem os diagnósticos de defeitos precisamente. Para que os dados de vibração possam ser divididos nas componentes individuais que os originaram, é necessária a utilização de um algoritmo conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT) do inglês - Fast Fourier Transform.

A análise, utilizando a técnica de FFT, promove a avaliação dos sinais no domínio da frequência, com a separação exata de cada sinal, podendo assim, conhecer e avaliar separadamente cada um. O sinal obtido é conhecido como espectro de frequência, sendo uma representação gráfica do movimento vibratório. Este é apresentado através de um diagrama que possui a frequência como abscissa e a amplitude como ordenada.

Na Figura 8 observamos os três sinais que ocorrem no mesmo intervalo de tempo, mas em diferentes frequências. Eles são harmônicos entre si, sendo que dois ocorrem em frequências múltiplas do primeiro sinal.

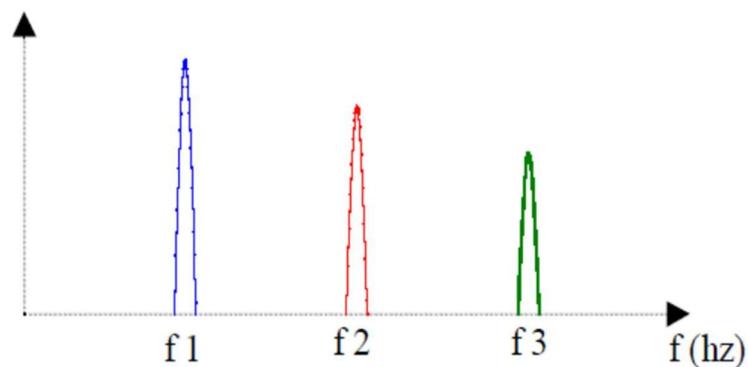
Figura 8 - Representação dos sinais no domínio do tempo.



Fonte: (PAIVA, 2000)

No domínio da frequência estas três formas de onda seriam representadas como no espectro da Figura 9.

Figura 9 - Sinais no domínio da frequência.



Fonte: PAIVA (2000).

2.2.5 Principais causas de vibração e seus espectros

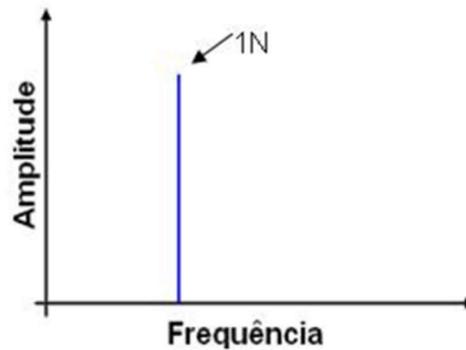
A seguir serão apresentadas as causas mais frequentes de vibrações em motores elétricos de indução.

2.2.5.1 Desbalanceamento Mecânico

O desbalanceamento mecânico ocorre quando existe uma distribuição desigual de massa em torno da linha central de rotação de um eixo. Essa má distribuição gera

cargas nos mancais por meio da ação das forças centrífugas. O desbalanceamento está presente em todas as máquinas rotativas, sendo identificado no espectro de frequências por um pico com valor igual ao valor de rotação do eixo. A Figura 10 ilustra um eixo com uma massa provocando o desbalanceamento, a ordem de grandeza da amplitude depende do sinal coletado.

Figura 10 - Representação do espectro de desbalanceamento.

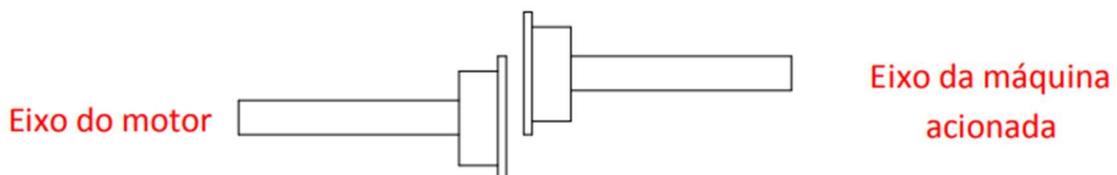


Fonte: BANDEIRA (2000).

2.2.5.2 Desalinhamento

Uma outra causa de vibração, bastante comum, é o desalinhamento. Existem três tipos de desalinhamento: paralelo, angular e combinado. O desalinhamento paralelo ocorre quando as linhas de centro são paralelas, porém deslocadas entre si, conforme Figura 11.

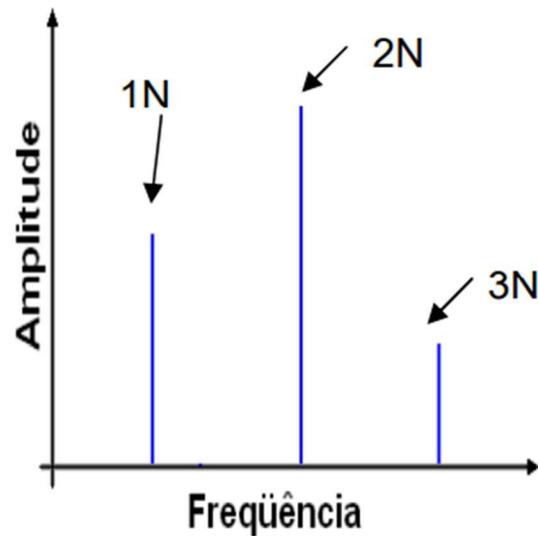
Figura 11 - Representação do desalinhamento paralelo.



Fonte: SKF (2010).

A representação do espectro de vibração para o desalinhamento paralelo (Figura 12), apresenta picos na frequência de rotação da máquina e em seu segundo e terceiro harmônico (BANDEIRA, 2000).

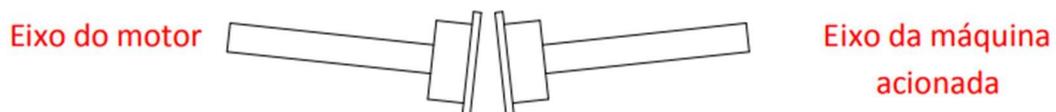
Figura 12 - Representação do espectro de desbalanceamento paralelo.



Fonte: BANDEIRA (2000).

O desalinhamento angular acontece quando as linhas de centro dos dois eixos fazem um ângulo. Ele é caracterizado pela alta vibração axial. Ocorrerá alta vibração axial tanto na frequência fundamental como na sua segunda harmônica. Na Figura 13 são mostrados dois eixos com desalinhamento angular.

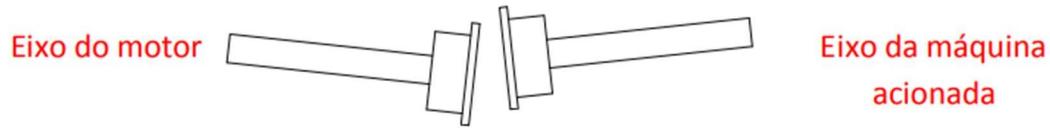
Figura 13 - Representação do desalinhamento angular.



Fonte: BANDEIRA (2000).

O desalinhamento combinado é caracterizado pela ocorrência simultânea do desalinhamento paralelos e angular. No espectro é possível visualizar a vibração axial alta na direção axial. Na Figura 14 é possível visualizar o desalinhamento combinado entre dois eixos.

Figura 14 - Representação do desalinhamento combinado.



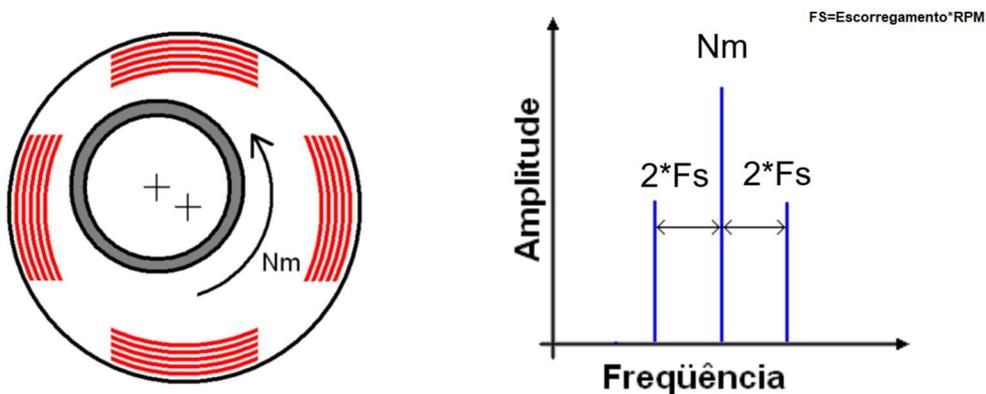
Fonte: BANDEIRA (2000).

2.2.5.3 Excentricidade

A excentricidade ocorre quando a linha de centro do eixo não é a mesma linha de centro geométrico do rotor, mesmo com a peça balanceada (PAIVA, 2000). A Figura 15 apresenta a ilustração de um motor elétrico com rotor excêntrico e seu respectivo espectro.

A excentricidade pode ser facilmente confundida com desbalanceamento, por isso muitas vezes é analisado a vibração no momento em que a alimentação elétrica da máquina é interrompida. Se a amplitude de vibração diminuir bruscamente, a partir do instante do corte de energia, o problema é elétrico e será, possivelmente, devido a excentricidade do rotor dentro do estator (SPAMER, 2009). Outras falhas elétricas estão associadas às frequências da rede, suas harmônicas e a frequência de escorregamento, como é o caso de desbalanceamento de tensão, rotor trincado e curto-circuito nas espiras do estator.

Figura 15 - Representação do rotor excêntrico e seu espectro.



Fonte: BANDEIRA (2000).

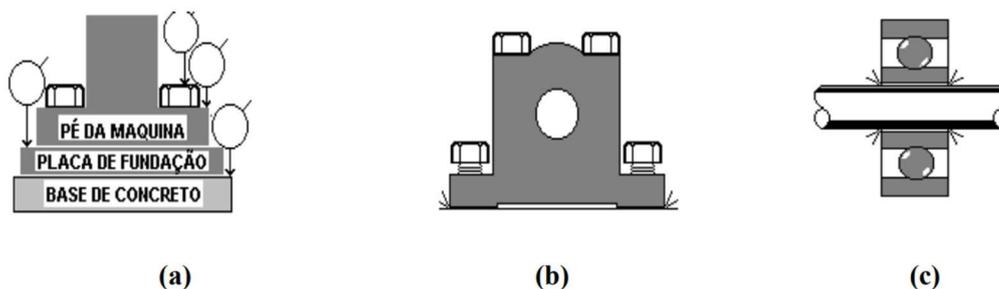
2.2.5.4 Folgas mecânicas

As folgas mecânicas estão sempre presentes entre as rotativas e as partes fixas da máquina. Entretanto, à medida que as folgas vão evoluindo para níveis não aceitáveis, podem aparecer problemas. As folgas em máquinas podem ser divididas em três tipos:

- ⌚ Tipo A: ocasionado tanto pela fragilidade estrutural nos pés, base ou fundação da máquina, quanto pela folga de parafusos que sustentam a base.
- ⌚ Tipo B: ocasionado por parafusos soltos ou trincas no apoio da base de mancais.
- ⌚ Tipo C: provocado por uma folga linear do mancal em sua tampa, folga excessiva em uma bucha ou de elemento rolante de um mancal de rolamento ou ainda, um rotor solto com folga em relação ao eixo (McGrawHill, 1991).

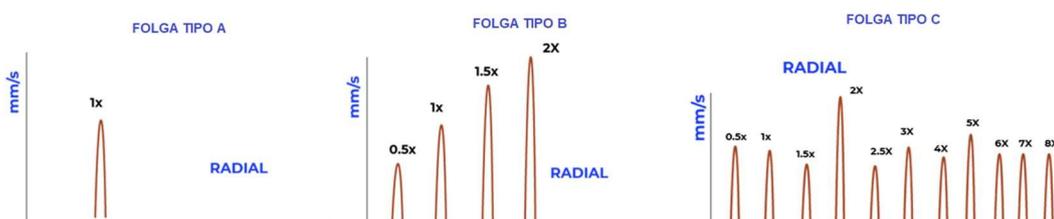
Na Figura 16 representa os tipos de folgas e, na Figura 17 os seus respectivos espectros.

Figura 16 - Tipos de folgas mecânicas em máquinas rotativas.



Fonte: MCGRAWHILL (1991)

Figura 17 - Espectro dos tipos de folgas mecânicas.

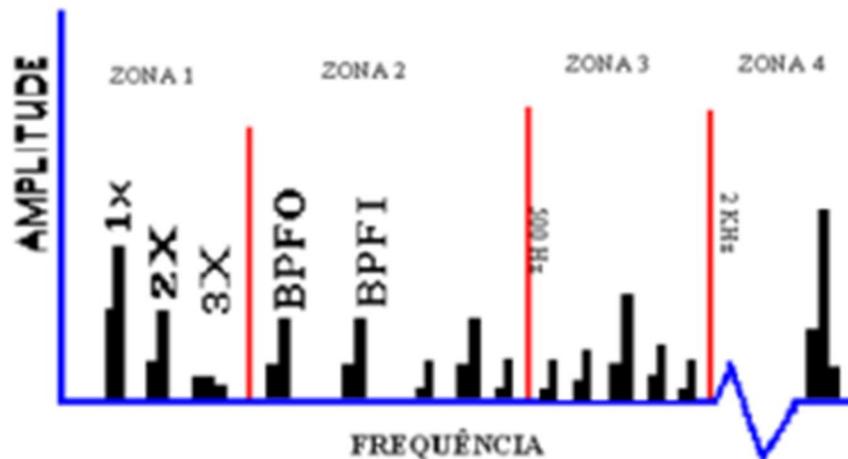


Fonte: SKF (2010).

2.2.5.5 Falha nos rolamentos

O início das falhas em rolamentos geralmente acontece precocemente, à medida que as pistas começam a se desgastar e desenvolver micro cavidades na zona de carga do rolamento. As micro cavidades, geralmente não reduzem a vida de operação do rolamento, porém indicam a progressão para o primeiro estágio de falha do rolamento é iminente (SKF, 2010). Com o passar do tempo as micro cavidades progredem até a formar cavidades na pista interna, onde se inicia o primeiro estágio. A partir dessa condição, esses pequenos defeitos nem sempre geram impactos com força suficiente para gerar sinais de vibração mensuráveis para tecnologias comuns (SKF, 1997). No segundo estágio as micro cavidades geram pequenas descamações na pista externa. Em termos de análise de vibração, na medida que os harmônicos se desenvolvem e aumentam de amplitude, é recomendado o aumento da frequência de coleta de dados de vibração (SKF, 1997). No terceiro estágio, quando já é indicada a troca do rolamento, os gráficos espectrais FFT, mostram que a frequência fundamental de defeito e seus harmônicos começam a apresentar bandas laterais na velocidade de rotação do eixo (SKF, 2010). Quando os rolamentos entram no quarto estágio de falha, suas vidas residuais são extremamente curtas e requerem uma ação corretiva imediata. A evolução dos estágios e os seus respectivos espectros podem ser visualizados na Figura 18.

Figura 18 - Espectro de vibração em um mancal de rolamento para os quatro estágios de falhas.



Fonte: SKF

(2010).

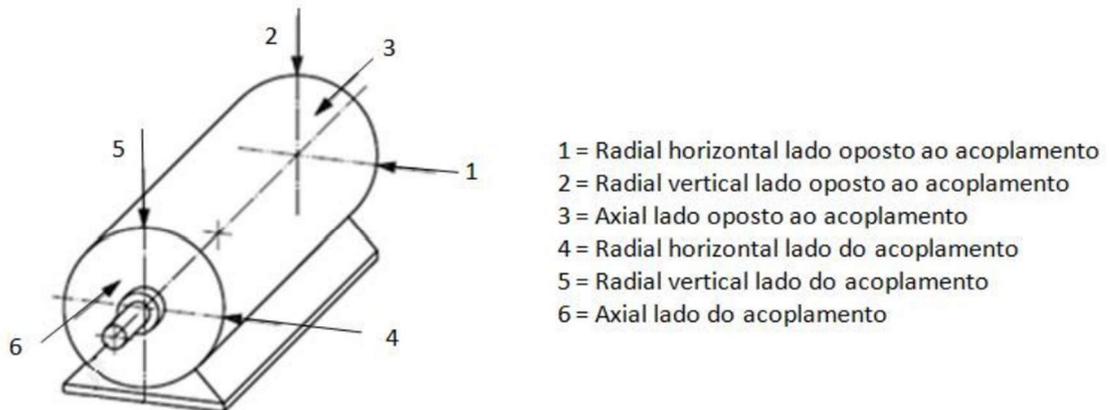
No chão de fábrica, quando se precisa de um diagnóstico rápido para realizar a troca do rolamento, uma análise de defeito aprofundada não é ideal. Uma ferramenta de diagnóstico da falha de rolamento é o acampamento de tendência do envelope de aceleração. O envelope de aceleração progride à medida que os estágios dos rolamentos vão avançando.

2.3 Pontos de coletas de vibração e níveis de vibração

Para a realização das medições de vibração, devemos escolher pontos para que possamos adquirir o melhor sinal para análise, garantindo a repetibilidade das medições. Em um motor elétrico, por exemplo, onde o foco são os mancais, podemos detectar praticamente todos os problemas. Nos equipamentos montados horizontalmente, as medições devem ser realizadas (em cada mancal), na direção das linhas de centro do mancal de rolamento nas duas direções: horizontal e vertical. Além disso, no mínimo uma posição axial de monitoramento para cada eixo de um sistema de vários eixos (SKF, 1997).

Normalmente, os pontos de medição devem ser descritos por um número sequencial, que está relacionado com o seu local, seguido por uma letra que determina o sentido de medição. Na Figura 19 são visualizados os pontos de medição em máquinas rotativas definidas pela norma ISO 10816-1.

Figura 19 - Pontos de medição em máquinas rotativas definido pela norma ISO 10816-1.



Fonte: ISO 10816-1 (2016)

O sucesso no diagnóstico consiste na análise de tendência, observado através da coleta periódica dos dados, com o objetivo de observar a evolução dos níveis de vibração (SKF, 1997). A norma ISO 10816, apresenta os valores aceitáveis de vibração, de acordo com o tipo de equipamento. Na Figura 20 são mostrados os níveis aceitados para classe de máquinas e o tipo de fundação.

Figura 20 - Limites de vibração segundo a norma ISO 10816.

ISO 10816-3		Machinery Groups 2 and 4		Machinery Groups 1 and 3	
Velocity		Rated power			
CMAS 100-SL		15 kW – 300 kW		Group 1: 300 kW – 50 MW Group 3: Above 15 kW	
in/sec eq. Peak	mm/sec RMS				
0.61	11.0	DAMAGE OCCURS			
0.39	7.1	RESTRICTED OPERATION			
0.25	4.5	UNRESTRICTED OPERATION			
0.19	3.5				
0.16	2.8	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
0.13	2.3				
0.08	1.4				
0.04	0.7	NEWLY COMMISSIONED MACHINERY			
0.00	0.0				
Foundation		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

Fonte: SKF (1997).

Para referênciado envelope de aceleração, a SKF define três classes referentes aos tamanhos dos rolamentos e a velocidade de rotação.

- ⌚ CL1: Rolamentos com um diâmetro interno entre 200 mm e 500 mm e velocidade do eixo abaixo de 500 RPM
- ⌚ CL2 (padrão): Rolamentos com um diâmetro interno entre 200 mm e 300 mm e velocidade do eixo entre 500 RPM e 1800 RPM.
- ⌚ CL3: Rolamentos com um diâmetro interno entre 20 mm e 150 mm e velocidade do eixo de 1800 RPM a 3600 RPM.

A Figura 21 apresenta os níveis de severidade, de acordo o valor da aceleração de envelope. Esta tabela foi baseada no banco de dados da SKF, e a unidade g se refere a aceleração da gravidade.

Figura 21- Níveis de envelope de aceleração por classes de rolamentos

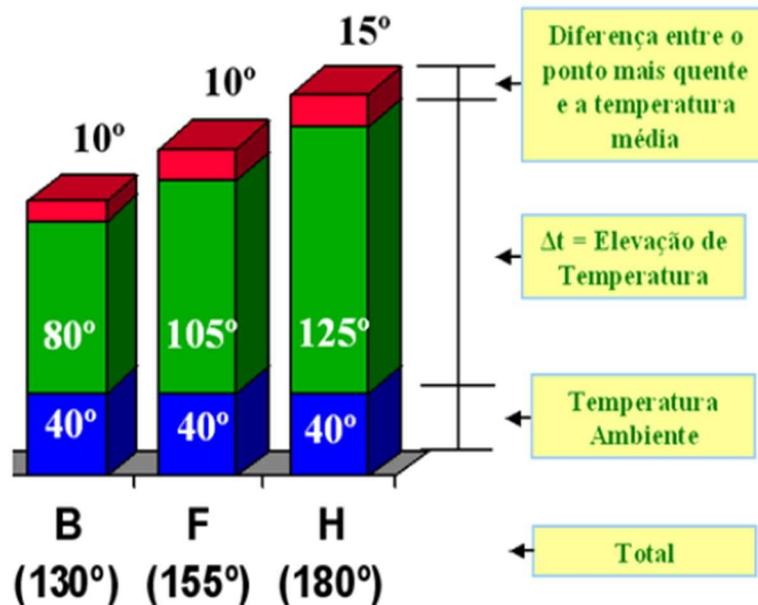
Classe	OK	Alerta	Perigo
CL1	0-1 gE	1-2 gE	acima de 2 gE
CL2	0-2 gE	2-4 gE	acima de 4 gE
CL3	0-4 gE	4-10 gE	acima de 10 gE

Fonte: SKF (1997).

2.4 Análise de temperatura

A vida útil do motor está diretamente ligada à vida útil do isolamento do seu bobinado. Por isso, os motores são classificados de acordo com a temperatura máxima de trabalho sem redução de vida útil do isolamento (WEG, 2016). As classes de isolamento e sua temperatura máxima para o ponto mais quente são representadas na Figura 22.

Figura 22 – Classes de isolamento dos motores elétricos



Fonte: WEG (2016)

A temperatura é um dos parâmetros de maior compreensão, visto que, o acompanhamento de sua tendência, ajuda a constatar uma alteração na condição dos motores elétricos. A elevação de temperatura dos mancais, pode estar relacionada com o aumento de potência consumida pela máquina gerada por uma pré-carregada oriunda dos desgastes dos rolamentos ou a um desbalanceamento de tensão que acaba gerando um maior consumo de corrente e, conseqüentemente, um aumento na perda de joules nos bobinados. Para o acompanhamento de temperatura de trabalho podemos utilizar os pirômetros ou termovisores.

3. OBJETIVO

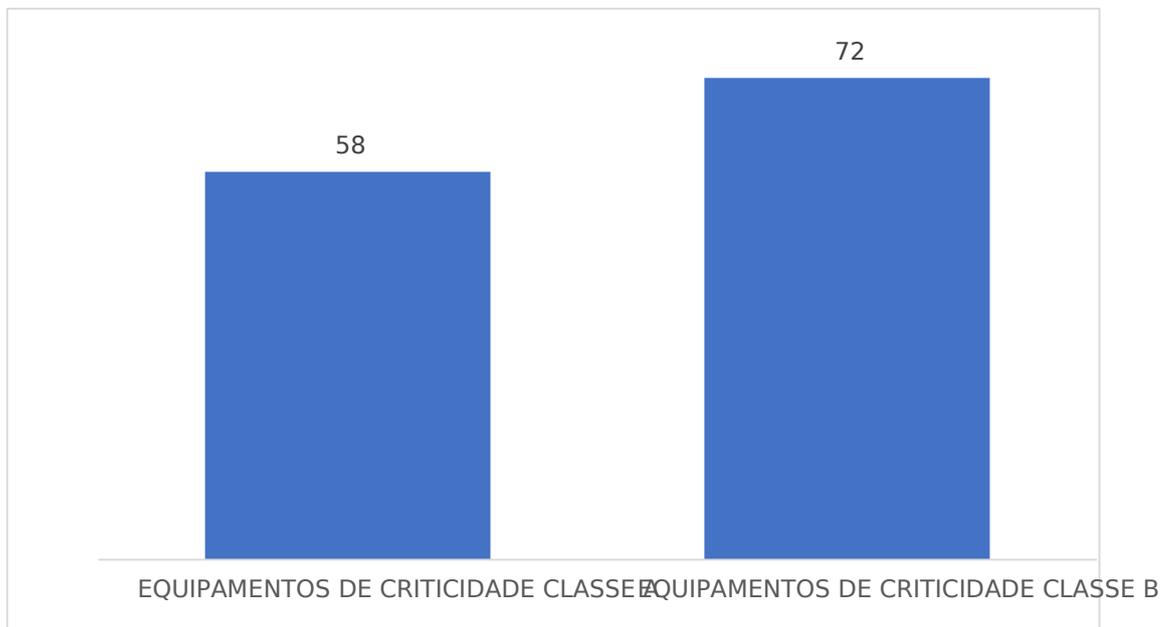
Avaliar a aplicação da manutenção preditiva em motores elétricos do setor de manutenção patrimonial de uma indústria do ramo de calçados localizada na cidade de Sobral no Ceará.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Análise da Criticidade

Para avaliar as criticidades dos motores elétricos, aplicamos uma matriz de criticidade, onde são levados em considerações os seguintes critérios: impacto na produção, impacto na qualidade final do produto, frequência de falhas e segurança das pessoas no parque industrial. Ao final, definimos duas classes de equipamentos, sendo elas classe A, englobando equipamentos de alta prioridade e, os de classe B, que possuem baixa prioridade e pouco afetam no processo. Foram então definidos 4 conjuntos motor-bomba e 18 motores de exaustores de classe A. A classe B foi composta por 72 motores de bombas. Na Figura 23 apresentamos a quantidade de motores por cada classe.

Figura 23 - Quantidade de motores por classe de criticidade



4.2 Realização da Manutenção Preditiva de Vibração

Para a realização da atividade de manutenção preditiva de vibração em campo, se fez necessário a criação de um plano de manutenção, com a finalidade de direcionar a atividade e obtenção dos resultados. As atividades dos planos de manutenção consistem em coletar os dados de vibração e do envelope de aceleração nos pontos indicados pela norma ISO 10816-1. Além desses dois parâmetros, o plano

também abrange a coleta dos dados de temperatura na região central da carcaça do motor. O instrumento utilizado para a coleta dos dados de vibração é do tipo caneta, produzida pela SKF modelo CMAS100SL. Esse instrumento apresenta duas importantes leituras de vibração da integridade da máquina, sendo uma a vibração de velocidade em RMS e, a outra, a medição do envelope de aceleração. Para a medição da temperatura, é utilizado um pirômetro da marca FLUKE, modelo 62 MAX - 424101. Nas Figuras 24 e 25, é possível visualizar os instrumentos utilizados para a realização do plano de manutenção.

Figura 24- Caneta de vibração utilizada durante as inspeções.



Figura 25 - Pirômetro utilizado nas inspeções



4.3 Periodicidade e ações

A periodicidade de realização e o plano de manutenção, dependem de alguns fatores. O mais importante é o conhecimento de um histórico de falhas e obtenção de dados dos equipamentos. Como não existia um histórico, foi preciso que o plano de manutenção fosse executado por um tempo mais curto para que, posteriormente, au

mentássemos ou diminuíssemos a periodicidade da atividade. A periodicidade foi definida fundamentada a partir da criticidade apresentada pelos equipamentos. Quando detectamos anormalidades nos equipamentos, imediatamente enviamos as informações para a equipe de manutenção corretiva, indicando a necessidade da manutenção. Em alguns casos, para um melhor direcionamento da atividade, realizamos uma segunda inspeção, utilizando um analisador de espectro vibração da marca FLUKE modelo 810. O analisador de vibração é capaz de capturar a velocidade de vibração e por meio do algoritmo da transformada rápida de Fourier demonstrá-lo no domínio da frequência. Na Figura 26 apresentamos o equipamento em questão e, na Figura 27 o sensor triaxial de vibração que acompanha o equipamento. A periodicidade de realização e o plano de manutenção foi realizada semanalmente com os equipamentos com criticidade A, enquanto os de classe B, mensalmente.

Figura 26 - Analisador de espectro usado durante as inspeções.



Figura 27 – Sensor triaxial que faz coleta de dados no domínio da frequência.



Os pontos de coleta de vibração dos motores de bomba consistem nos indicados norma ISO 10816-1 mostrados na figura 20, com exceção da posição axial frontal. A coleta de dados dos motores da exaustão, possuíam dois pontos a mais de coleta de dados de vibração. Esses dois pontos estão localizados nos dois mancais de apoio do eixo movido do sistema de acoplamento, do tipo polias e correia. O exaustor em estudo, é acionado por um motor de 60 cv e, seus pontos de coleta de vibração dos mancais, são mostrados na Figura 28.

Figura 28 – Exaustor e a localização de seus mancais.



5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os equipamentos do nosso estudo, compreendem motores elétricos do setor de manutenção patrimonial de uma indústria do ramo de calçados. Por se tratar de um setor de manutenção patrimonial, existem diversos equipamentos que, vão desde motores de portões até motores de compressores de ar com alta criticidade de dentro do processo. Definimos com a equipe de manutenção que, as inspeções de análise de vibrações, seriam realizadas nos motores do sistema de exaustão e nos motores das bombas de água presentes nos blocos de utilidade das 8 fábricas presentes no parque industrial. Desta forma, foram analisados 130 motores, sendo 18 motores do sistema de exaustão e 112 motores do sistema de bombeamento de água. Na Figura 29, é possível visualizar a potência dos motores do sistema de exaustão, e no gráfico 30 as potências dos motores do sistema de bombeamento.

Figura 29 - Motores elétricos sistema de exaustão e suas potências.

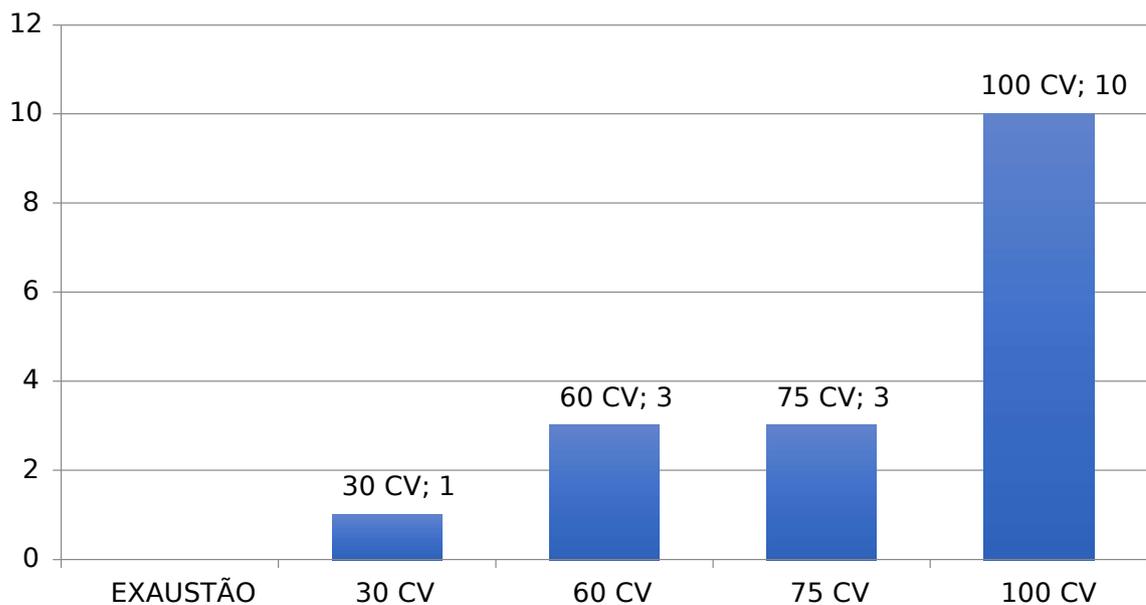
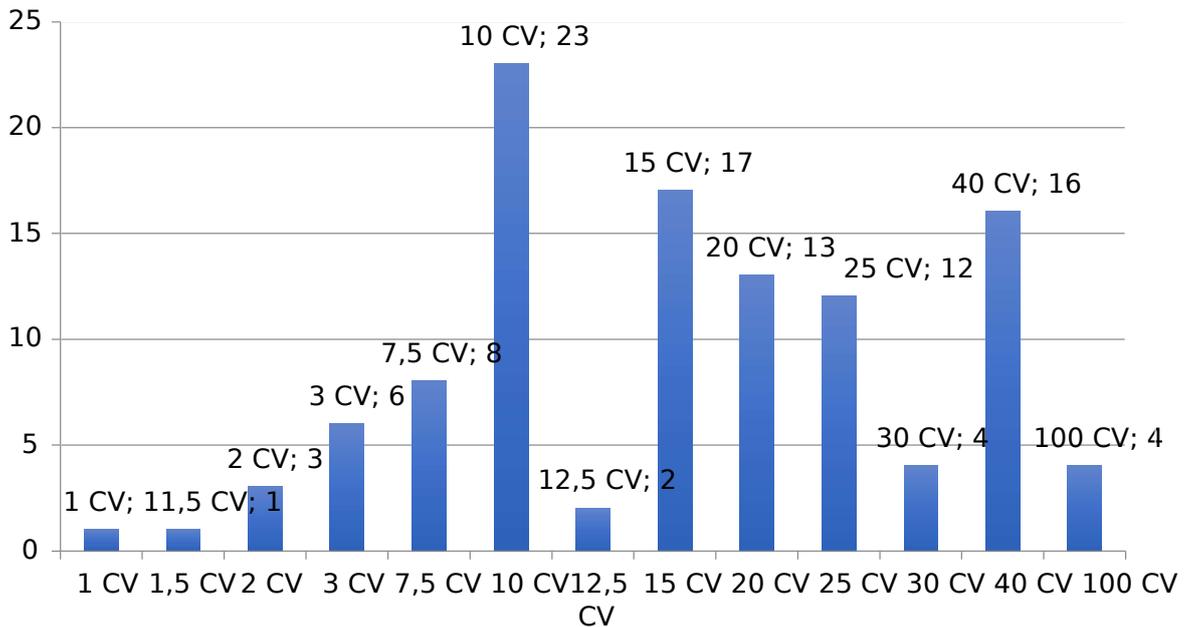


Figura 30 - Motores elétricos sistema de bombeamento de água



Observando os gráficos, é possível notar o grande valor financeiro que os equipamentos têm para empresa, já que possuem motores de alta potência. Além do valor financeiro, existe também um valor relacionado ao processo, uma vez que, a queima de um equipamento pode gerar significativa perda de produção. A implantação de técnicas preditivas é essencial quando se deseja economia na manutenção e no aumento da confiabilidade dos equipamentos. Grande parte desses motores, possuíam inspeções com técnicas preditivas que avaliam a deterioração do sistema de isolamento do bobinado no estator. Entretanto, por ser uma técnica invasiva executada com o equipamento desligado, sua periodicidade de realização é baixa, o que proporciona a ocorrência de falhas nesse intervalo. Uma maneira de contornar esse problema é a aplicação de técnicas não invasivas, que possam ser realizadas com equipamento em operação, como por exemplo a análise de vibração e pirometria.

Através das rotinas de inspeção com a caneta de vibração, observamos que os valores de vibração estavam em uma tendência de crescimento em um dos exaustores. Estes valores apresentaram níveis de velocidade de vibração críticos no motor e nos mancais, indicando a necessidade de uma intervenção antes que a máquina quebrasse e interrompesse a produção.

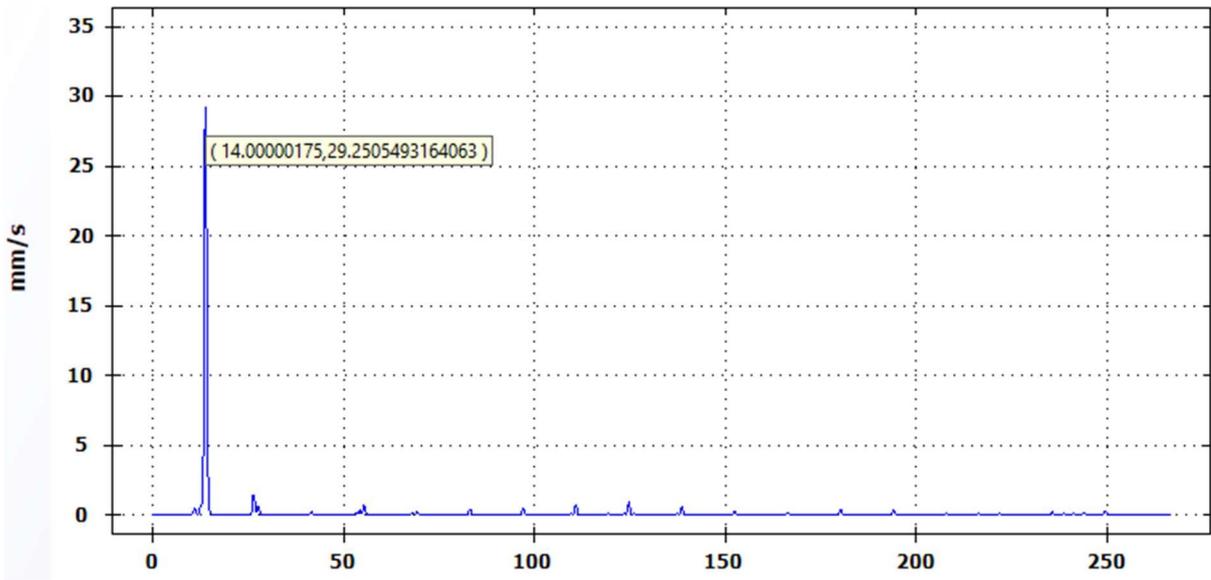
Para melhor direcionar, a intervenção foi realizada com a coleta do espectro de vibração nos sete pontos. A Tabela 1 apresenta as frequências de rotação do ventilador, do motor e suas harmônicas:

Tabela 1 - Frequência de rotação dos rotores e suas harmônicas.

Dados do motor		Dados rotor do ventilador	
Velocidade do motor (rpm)	1600	Velocidade do ventilador (rpm)	840
Frequência fundamental (Hz)	26.67	Frequência fundamental (Hz)	14.00
Segunda harmônica (Hz)	53.33	Segunda harmônica (Hz)	28.00
Terceira harmônica (Hz)	80.00	Terceira harmônica (Hz)	42.00
Quarta harmônica (Hz)	106.67	Quarta harmônica (Hz)	56.00
Quinta harmônica (Hz)	133.33	Quinta harmônica (Hz)	70.00
Sexta harmônica (Hz)	160.00	Sexta harmônica (Hz)	84.00
Sétima harmônica (Hz)	186.67	Sétima harmônica (Hz)	98.00
Oitava harmônica (Hz)	213.33	Oitava harmônica (Hz)	112.00

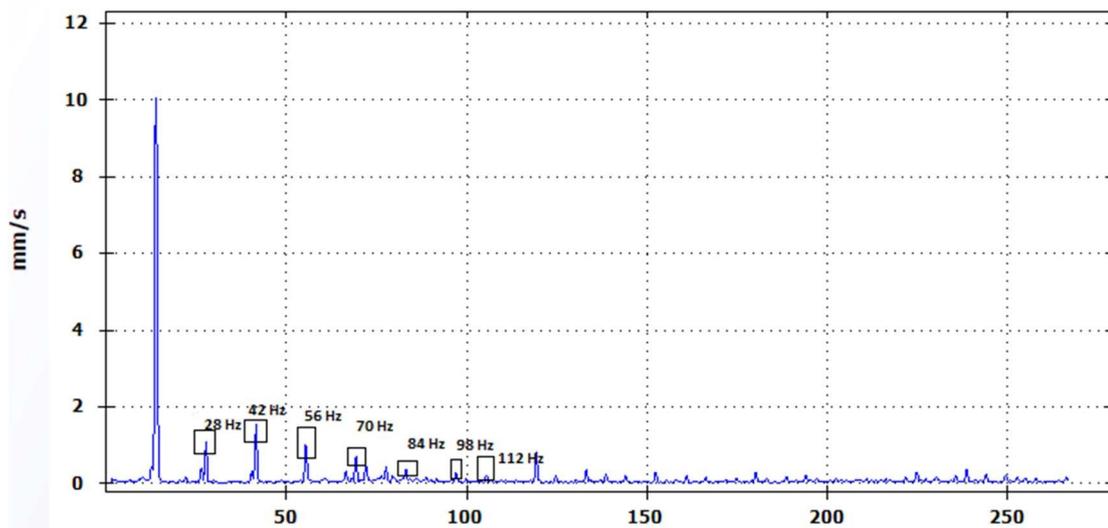
A Figura 31 apresenta o espectro coletado na dianteira do motor na posição horizontal. A frequência dominante foi a de rotação do ventilador, chegando próximo aos 30 mm/s. Essas características indicam um grave desbalanceamento do rotor do ventilador.

Figura 31 - Espectro de vibração coletada no dianteiro do motor de indução.



Constatamos uma possível folga entre o mancal e rolamento. Ao analisarmos o espectro de vibração na posição horizontal no mancal próximo a polia movida, encontramos picos de baixas amplitudes da segunda a oitava harmônica da frequência de rotação do ventilador. Na Figura 32 é apresentado o respectivo espectro com suas harmônicas.

Figura 32 - Espectro de vibração horizontal do mancal próximo à polia.



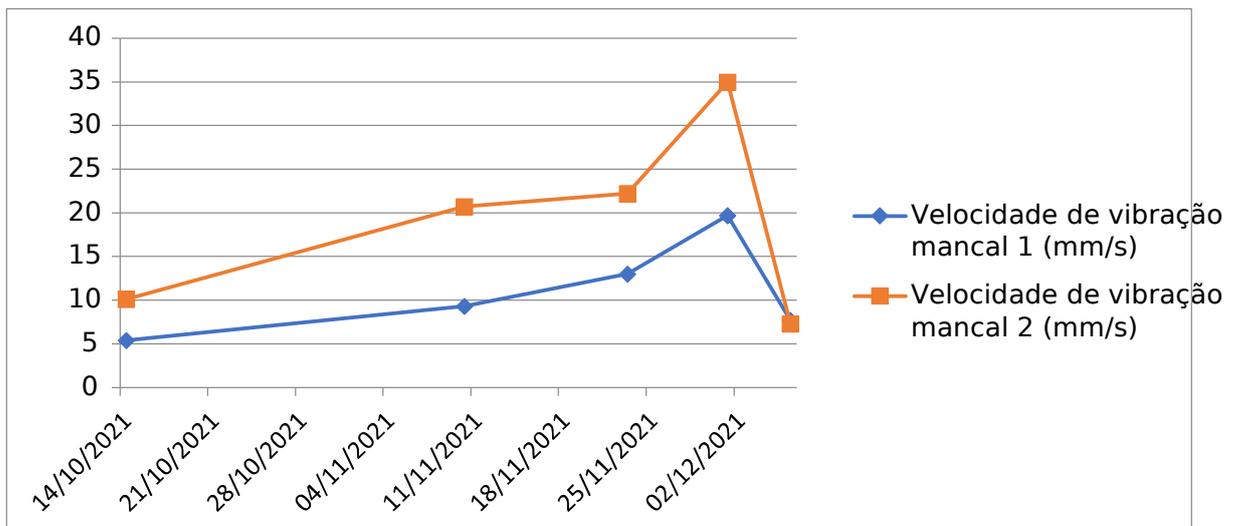
Por meio de inspeção, constatamos a folga no mancal, visualizadas na Figura 33. Foi então, realizada a troca do mancal e, o balanceamento do rotor não foi realizado, visto que a empresa não possuía técnicos especializados para essa atividade.

Desta forma, foi realizada a limpeza dos tubos da exaustão para reduzir a velocidade de trabalho do equipamento. Após a limpeza, a velocidade foi reduzida de 1600 RPM para 1200 RPM, de acordo com os dados apresentados na Figura 34. A partir das intervenções, foi possível reduzir os níveis de vibração nos mancais e nos pontos críticos do equipamento, para níveis aceitáveis.

Figura 33 - Desgastes do mancal próximo a polia do exaustor em estudo.



Figura 34- Histórico de velocidade de vibração dos mancais do exaustor



A coleta dos dados de vibração das bombas possui somente cinco pontos de medição, já discutidos anteriormente. Na Figura 35, é possível visualizar o equipamento em estudo e a indicação dos pontos de medição de vibração.

Figura 35 - Conjunto motor bomba em estudo e seus pontos de medição



De acordo com a figura, trata-se de uma bomba da marca King acionada por um motor de 40 Cv da fabricante Weg, responsável por realizar a distribuição de água industrial em uma das unidades produtivas do parque industrial em estudo. Nas primeiras rotinas de inspeção do equipamento, detectamos que seria necessária uma intervenção. Ele apresentava níveis de vibração axiais elevados em torno de cinco vezes os valores encontrados nas outras direções. Além disso, também apresentava temperatura de operação superior ao indicado pela sua classe de isolamento B. Na Tabela 2, são expostos os dados obtidos nas duas primeiras inspeções realizadas no equipamento.

Tabela 2 - Valores de velocidade de vibração e temperatura aferidos nos pontos de coleta.

DATA	PONTO 1 (mm/s)	PONTO 2 (mm/s)	PONTO 3 (mm/s)	PONTO 4 (mm/s)	PONTO 5 (mm/s)	Temp °C CENTRO DA CARCAÇA
08/12/20	1,9	2,4	3,2	3	11,9	84
15/12/20	2,2	2,2	2,7	3,2	13	84

Solicitamos uma inspeção do conjunto motor-bomba, para verificar uma possível folga ou desbalanceamento do rotor. Ao se realizar a inspeção, constatamos que se encontrava com rotor desbalanceado, devido a um processo de cavitação, visualizado na Figura 36. Medimos o rotor com auxílio de um paquímetro e, a partir dessa medição, realizada a compra de um novo rotor. Ao instalar um novo rotor, os níveis de vibração axial foram reduzidos para níveis aceitáveis pelas normas e a temperatura de funcionamento do equipamento reduziu consideravelmente, atendendo a sua classe de isolamento. Na Figura 37 têm-se os níveis de vibração axial antes e após a intervenção, e na Figura 38 a temperatura de funcionamento medida no centro da carcaça do motor.

Figura 36 - Desgaste no rotor da bomba centrífuga.



Figura 37 - Níveis de vibrações em mm/s nos pontos de coletas da bomba em estudo.

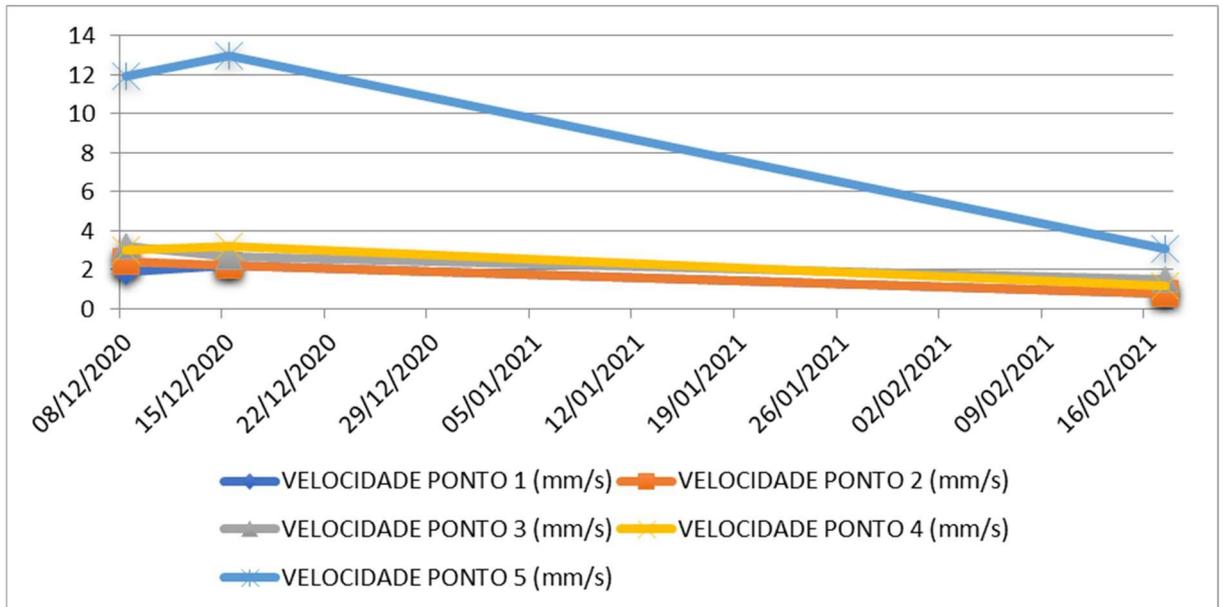
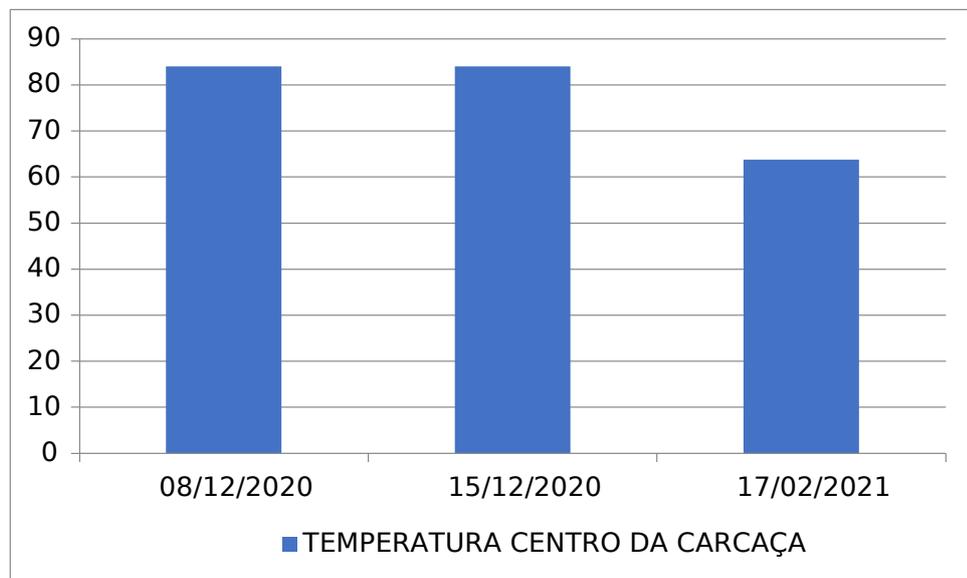
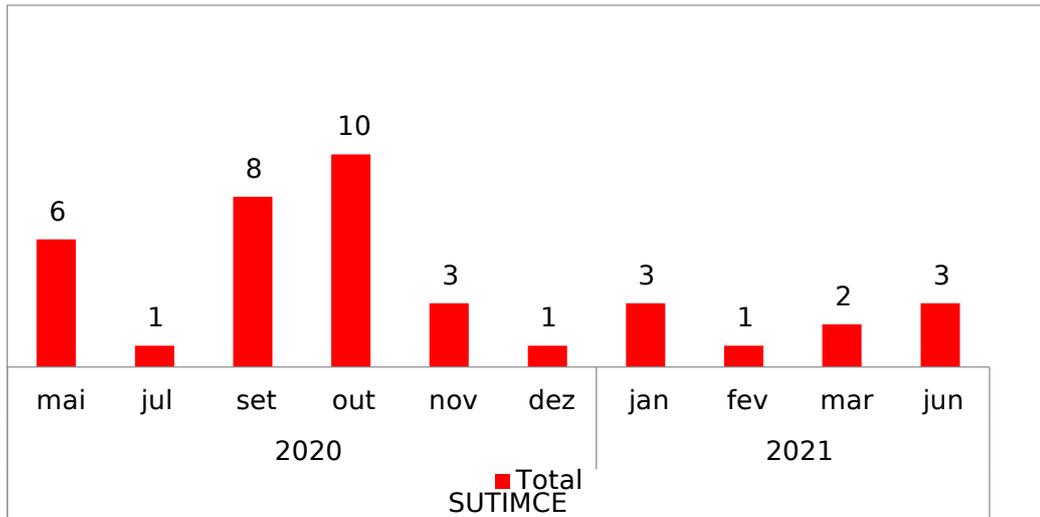


Figura 38 - Temperatura no centro de carcaça do motor.



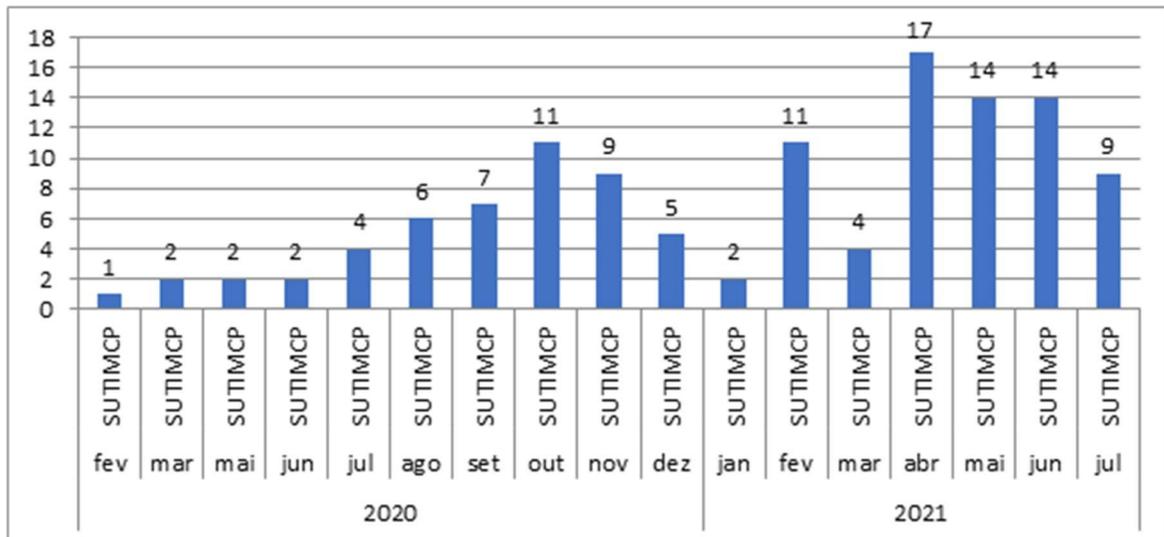
Através da implantação das inspeções preditivas, foi possível detectar falhas potenciais antes que os equipamentos evoluíssem para falhas funcionais. Com isso, foram reduzidos os números de manutenções emergenciais e passou-se a agir de forma planejada, garantindo uma melhor eficiência da manutenção. Na Figura 39, es exposto o número de manutenções emergenciais que ocorreram por mês, entre os anos de 2020 e 2021, sendo o início da análise de vibração em setembro de 2021.

Figura 39 – Histórico de manutenções emergências em motores de indução.



À medida que as manutenções emergenciais decresceram, as atividades programadas reagiram de maneira inversa, isto é, a partir do momento que podemos prever quando o equipamento precisa de manutenção, é possível realizá-la de maneira planejada e programada. A Figura 40 apresenta o aumento de intervenções programadas entre os anos de 2020 e 2021.

Figura 40 – Histórico de manutenções planejadas em motores de indução.



O grande número de manutenções programadas ocorreu de acordo com as ações indiretas da preditiva de vibração, uma vez que detectamos que muitos motores estavam sem estrutura de fixação adequada e precisavam passar por um retrofit, para garantir completa fixação das carcaças e facilidade na hora da manutenção. Na Figura

41 é apresentado, o desenho do modelo da base do motor, que foi pensado para facilitar as atividades de manutenção. Na Figura 42, visualizamos um dos equipamentos que não possuíam fixação adequada e que, após a manutenção, encontra-se com toda sua estrutura de acordo com as normas.

Figura 41 - Modelo de base metálica que foi escolhido

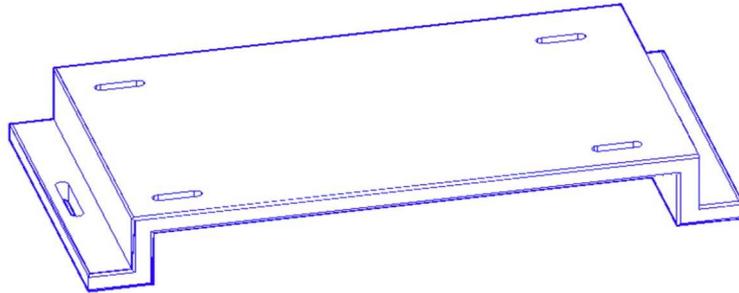
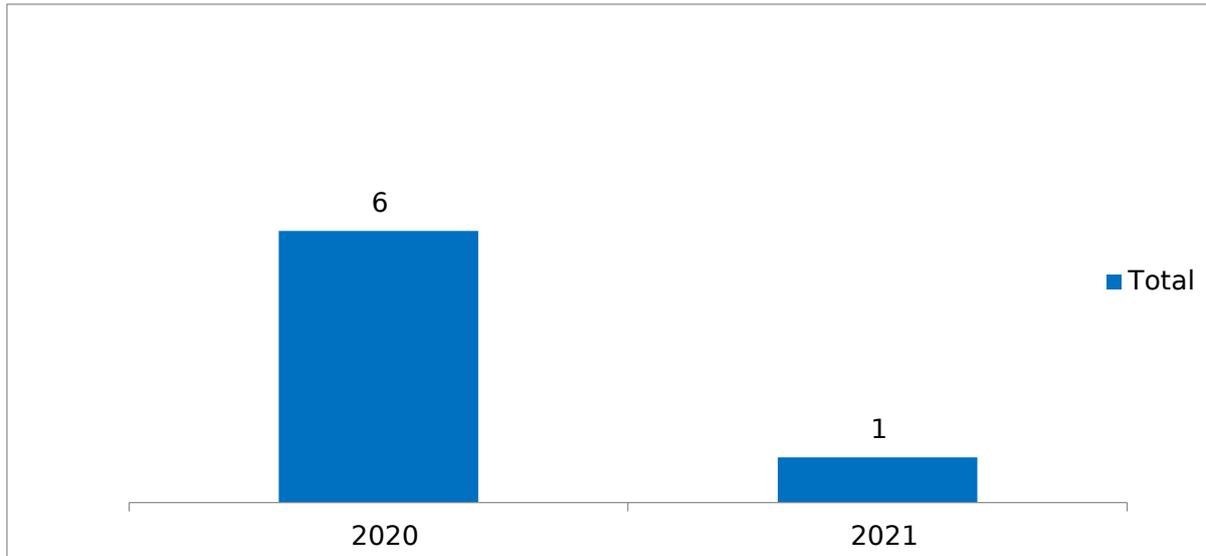


Figura 42 - Equipamento antes e após manutenção na sua estrutura de fixação.



Além da redução de atendimentos emergenciais, que trazem prejuízos financeiros incalculáveis, foi também reduzido o número de queima de motores elétricos. grande importância de impedir que o motor chegue a queimar, além do preço do rebobinamento, é a perda de eficiência elétrica. Motores que passam por rebobinamento perdem cerca de 3% de eficiência (WEG, 2016). A Figura 43 representa o número de motores queimados entre os anos de 2020 e 2021.

Figura 43 - Número de motores queimados entre os anos de 2020 e 2021.



6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados alcançados, através da aplicação da manutenção preditiva de análise de vibração em motores elétricos, podemos afirmar que, associada aos conceitos de gestão, trouxeram resultados extraordinários, sem a necessidade de aumentar os custos de manutenção e reduzindo o risco de quebras repentinas dos equipamentos, o que impactaria diretamente na produção. A literatura utilizada se mostrou adequada para a realização do trabalho, uma vez que, os defeitos observados foram diagnosticados adequadamente. Consegue-se exemplificar, durante as análises do caso, que os equipamentos estavam em estados inadequados de funcionamento, onde, do ponto de vista técnico, a substituição de componentes era iminente. Desta forma, estes puderam ser analisados e melhorados, evitando futuros problemas, o qual acarretariam custos elevados não programados.

Não indicamos a utilização apenas do estudo da técnica preditiva isoladamente, pois somente após um estudo completo dos equipamentos com outras técnicas serem aplicadas, é que a manutenção preditiva será eficiente e trará grandes resultados. Como os equipamentos estudados se tratava de equipamentos que não possuíam a sua vida útil diretamente relacionadas a horas de trabalho e, impactavam diretamente na produção, a técnica de manutenção preditiva foi perfeitamente associada. Além disso, percebemos que a utilização da matriz de criticidade, proporcionou uma manutenção mais eficiente, uma vez que, devido ao número de equipamentos, não seria possível realizar todos com a mesma periodicidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade. p. 37. 1994.

ANTONINO-DAVIU, J.; QUIJANO-LOPEZ, A.; FUSTER-ROIG, V. Case stories of induction motors fault diagnosis based on current analysis. IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. p. 1 - 8. 2017.

BANDEIRA, G.; ABREU, G.; GIANELLI, R. Vibração e ruído em manutenção preditiva. Disponível em: http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_1A.pdf Acesso em: 19 de dezembro de 2000.

BENEDETTI, J. A. Manutenção centrada em confiabilidade e análise de vibração. 2002. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

BHADESHIA, H. K. D. H. Steels for Bearings. Progress in Materials Science, v. 57, p. 268 - 435. 2012.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. Porto Alegre: AMGH. 2013.

CHOW, M. Guest editorial special section on motor fault detection and diagnosis. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 982 - 983. 2000.

GAGORA, W. S. Neural approach to fault detection in three-phase induction motors. IEEE Latin America Transactions, p. 1279 - 1288. 2016.

GARCIA, M. S. Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações. 2005. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

ISO 10816-1/ISO. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on nonrotating parts. ISO, 2016.

KARDEC, A. Manutenção: Função Estratégica. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras. 2009.

MAZUR, D.; KAY, J.; MAZUR, K. Advancements in Vibration Monitoring for the Mining Industry. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 51, p. 4321 - 4328. 2015.

MCGRAWHILL, V. Manutenção Preditiva - Caminho para Zero Defeitos. São Paulo: McGrawHill. 1991.

MONCHY, F. A função manutenção: formação para a gerência da manutenção industrial. Rio de Janeiro: Durban, 1989.

NEPOMUCENO, L. X. Técnicas de Manutenção Preditiva. São Paulo: Editora

Blucher. 1989.

PAIVA, O. G. Apostila de Análise das vibrações mecânicas. tajuá: FUPAI. 2000.

SEELING, X. M. Desenvolvimento de um sistema de gestão da manutenção em uma empresa de alimentos do Rio Grande do Sul. 2000. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2000.

SILVA, M. F. Análise de desempenho em motores de indução monofásicos com longo período de utilização. 2018. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga. Caratinga. 2018.

SKF. Manual SKF de Manutenção de Rolamentos. China: Porex Int. AB. 1997.

SKF. Manual SKF de Manutenção de Rolamentos. China: Porex Int. AB. 2010.

SPAMER, F. R. Técnicas preditivas de manutenção de máquinas. 2009. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia Elétrica. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

SWANSON, L. An information-processing model of maintenancemanagement. International Journal of Production Economics, v. 83, n. 1. p. 45 - 64, 2003.

TELES, J. Manutenção Preditiva: O que é e como ela pode te ajudar. 2022. Disponível em: <https://engeteles.com.br/manutencao-preditiva/>. Acesso em: 01 março de 2022.

TELES, J. Curva PF: O que é e como usar. 2021. Disponível em: <https://engeteles.com.br/curva-pf/>. Acesso em: 16 dezembro de 2021.

TEIXEIRA, A. Multicriteria decision on maintenance: spares and contract planning. European Journal of Operational Research, v. 129. 2001.

WEG. Guia técnico: motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. p. 37. 2016.