

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
JOE LUIZ ROSSDEUTSCHER JUNIOR

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS

LAGES
2018

JOE LUIZ ROSSDEUTSCHER JUNIOR

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário UNIFACVEST como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp. Paulo Fernando Schmidt Spieker.

Coorientador: Prof. Esp. Alisson Ribeiro de Oliveira.

LAGES
2018

JOE LUIZ ROSSDEUTSCHER JUNIOR

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário UNIFACVEST como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Esp. Paulo Fernando Schmidt Spieker.

Coorientador: Prof. Esp. Alisson Ribeiro de Oliveira.

Lages, SC ____/____/2018. Nota: _____
Prof. Esp. Paulo Fernando Schmidt Spieker

Prof. Dr. Rodrigo Botan, Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

LAGES
2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que tenho em minha vida. Ele é o principal responsável por podermos conhecer, entender e estudar os segredos do universo.

Aos meus pais pela educação, dedicação, carinho e exemplos depositados em mim. Certamente sem eles como pilares da minha fundação como indivíduo, eu não estaria apto a concluir esse objetivo.

Aos professores Paulo Fernando Schmidt Spieker, meu orientador, e Alisson Ribeiro de Oliveira, meu coorientador, por toda a dedicação e conhecimentos fornecidos para a minha pesquisa, pelos valiosos conselhos e cuidadosas revisões.

Ao meu supervisor de estágio e diretor da empresa RPM SUL Análises Técnicas, Rodney Luis Vissoci Junior, por todos os ensinamentos repassados sobre a manutenção preditiva durante o período de estágio e após o mesmo, primordiais para o desenvolvimento do presente trabalho.

A minha namorada, Mariana, pela sua paciência e compreensão em todos os momentos, principalmente nos finais de semana, em que não foi possível estar ao seu lado para completar essa tarefa.

E por fim, a todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia,
frequência e vibração.*

Nikola Tesla

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS

Joe Luiz Rossdeutscher Junior¹
Paulo Fernando Schmidt Spieker²
Alisson Ribeiro de Oliveira³

RESUMO

O principal objetivo da manutenção preditiva é evitar quebras e prolongar a vida útil do equipamento ou sistema. Para alcançá-lo, é necessário realizar acompanhamentos periódicos das condições reais de funcionamento, de forma a identificar potenciais reduções de eficiência que, em estágios avançados, podem ocasionar a falha. Um dos princípios da manutenção preditiva é analisar o equipamento em seu regime regular de trabalho. Esse fator é justamente uma das grandes vantagens do emprego da abordagem preditiva, não sendo necessário parar a produção. A aplicação da técnica de análise de vibração em rolamentos proporciona resultados extremamente importantes que identificam quaisquer anomalias. Os rolamentos são utilizados para transferir movimento e transmitir força. São componentes amplamente encontrados em diversos setores industriais e, dentre as distintas construções que apresentam, dividem-se em rolamentos axiais e radiais. O presente trabalho realiza uma fundamentação teórica das diferentes abordagens de manutenção, destacando a manutenção preditiva e a técnica de análise de vibração, relacionando-a com a detecção de falhas em rolamentos através de um estudo de caso.

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

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica, 10ª fase, disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Centro Universitário UNIFACVEST.

² Professor do Centro Universitário UNIFACVEST, orientador.

³ Professor de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Centro Universitário UNIFACVEST, coorientador.

ANALYSIS OF VIBRATION IN INDUSTRIAL BEARINGS

Joe Luiz Rossdeutscher Junior⁴
Paulo Fernando Schmidt Spieker⁵
Alisson Ribeiro de Oliveira⁶

ABSTRACT

The main purpose of predictive maintenance is to prevent breakages and prolong the life of the equipment or system. In order to achieve this, it is necessary to carry out periodic monitoring of the actual operating conditions in order to identify potential efficiency reductions that may lead to failure in the advanced stages. One of the principles of predictive maintenance is to analyze the equipment in your regular work regime. This factor is precisely one of the great advantages of using the predictive approach, and it is not necessary to stop production. The application of vibration analysis technique in bearings provides extremely important results that identify any anomalies. The bearings are used to transfer movement and transmit force. They are components widely found in several industrial sectors and, among the different constructions they present, are divided into axial and radial bearings. The present work makes a theoretical foundation of the different maintenance approaches, highlighting the predictive maintenance and the vibration analysis technique, relating it to the detection of failure in bearings through a case study.

Keywords: predictive maintenance; vibration analysis; bearings.

⁴ Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica, 10ª fase, Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Centro Universitário UNIFACVEST.

⁵ Professor do Centro Universitário UNIFACVEST, orientador.

⁶ Professor de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Centro Universitário UNIFACVEST, coorientador.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de falhas x tempo	18
Figura 2 - Procedimentos efetuados pela manutenção preditiva.....	19
Figura 3 - Analisador de vibrações portátil	22
Figura 4 - Forma de onda senoidal no tempo.....	24
Figura 5 - Onda no tempo com as diferentes leituras para amplitude	24
Figura 6 - Amplitude sendo tomada em deslocamento, velocidade e aceleração.....	25
Figura 7 - Diferenças em um domínio temporal	26
Figura 8 - O traço de uma caneta preso a um sistema massa-mola	26
Figura 9 – O sinal de vibração pode ser visto através do domínio do tempo e domínio da frequência.....	28
Figura 10 – Exemplo de forma de onda, mostrando o sinal variando no tempo.....	28
Figura 11 – Um exemplo de espectro, mostrando amplitude em função da frequência	30
Figura 12 - Carga radial.....	31
Figura 13 - Carga axial.....	32
Figura 14 - Classificação dos rolamentos radiais	33
Figura 15 - Classificação dos rolamentos axiais	34
Figura 16 - Modulação de amplitude (a esquerda) e espectro de um sinal modulado (a direita)	36
Figura 17 – Espectro e forma de onda característicos de desbalanceamento	40
Figura 18 – Espectro característico de desbalanceamento.....	40
Figura 19 – Representação dos tipos de desalinhamento – paralelo e angular	41
Figura 20 – Espectro da vibração axial para o desalinhamento angular e da vibração radial para o desalinhamento paralelo	41
Figura 21 – Espectro característico de empenamento de eixos.....	42
Figura 22 – Espectro e forma de onda característicos de folgas.....	43
Figura 23 – Espectro característico de roçamento	44
Figura 24 – Exemplo de espectro de velocidade característico de falhas em mancais de rolamento	45
Figura 25 – Defeito alterando a assinatura de vibração do equipamento.....	46
Figura 26 - Analisador de vibração PRUFTECHNIK VIBXPART II.....	48
Figura 27 - Acelerômetro RPM-SR110.....	48
Figura 28 – Procedimento de medição.....	49
Figura 29 – Pontos de coleta 1V e 1H.....	53
Figura 30 – Pontos de coleta 3V, 3H e 3A	54
Figura 31 – Pontos de coleta 7V, 7H, 7A e 8H.....	54
Figura 32 – Tendência indicando características de desgaste do rolamento	55

Figura 33 – Sinal no tempo mostrando a medição anterior a evolução.....	55
Figura 34 – Sinal no tempo indicando a presença de falha.....	56
Figura 35 – Espectro de aceleração indicando quebra do filme lubrificante.....	56
Figura 36 – Espectros de aceleração em cascata.....	57
Figura 37 – Espectro de envelope da aceleração indicando desgaste no rolamento	57
Figura 38 – Espectros de envelope da aceleração em cascata	58
Figura 39 – Espectro de envelope do ponto 3H	58
Figura 40 – Tendência indicando a redução dos níveis de vibração	59
Figura 41 - Exemplo de um rolamento axial de rolos cônicos	60
Figura 42 - Características de pitting de acordo com NSK Bearing Doctor	60
Figura 43 - Forma com que o pitting apresenta-se.....	61
Figura 44 - Ocorrência de pitting na pista interna.....	61
Figura 45 - Ocorrência de pitting nos elementos rolantes	62
Figura 46 - Características de descascamento de acordo com NSK Bearing Doctor	62
Figura 47 - Forma com que o descascamento apresenta-se	63
Figura 48 - Ocorrência de descascamento na pista interna	63
Figura 49 - Ocorrência de descascamento nos elementos rolantes.....	64
Figura 50 - Características de escamamento de acordo com NSK Bearing Doctor ..	64
Figura 51 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel interno de rolamento de contato angular.....	65
Figura 52 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel interno de rolamento fixo de uma carreira de esferas	65
Figura 53 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel externo e esferas	66
Figura 54 - Ocorrência de escamamento nos elementos rolantes	66
Figura 55 - Evolução das falhas nos elementos girantes	67
Figura 56 - Características de fraturas de acordo com NSK Bearing Doctor	67
Figura 57 - Forma com que as fraturas apresentam-se	68
Figura 58 - Ocorrência de fratura no rolamento	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	MANUTENÇÃO	13
2.1	Tipos de manutenção	13
2.1.1	Manutenção corretiva	13
2.1.1.1	Manutenção corretiva não planejada	14
2.1.1.2	Manutenção corretiva planejada	14
2.1.2	Manutenção preventiva	15
2.1.3	Manutenção preditiva	16
2.1.4	Manutenção detectiva.....	19
2.1.5	Engenharia de manutenção.....	20
3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	21
3.1	Análise de vibração	21
4	VIBRAÇÕES DE MÁQUINAS E SUA RELAÇÃO COM AS ONDAS MECÂNICAS	23
4.1	Principais propriedades de uma onda mecânica	23
4.2	O movimento vibratório	26
5	ROLAMENTOS	31
5.1	Tipos de rolamentos	31
5.2	Análise de vibração em rolamentos	34
5.2.1	Espectro de vibração e frequências características.....	35
5.2.2	Equipamentos envolvidos.....	37
6	PROBLEMAS DE ORIGEM MECÂNICA	39
6.1	Desbalanceamento	39
6.2	Desalinhamento	40
6.3	Empenamento de eixos	42
6.4	Folgas	42
6.5	Roçamentos	43
6.6	Defeitos em mancais de rolamento	44
7	MATERIAIS E MÉTODOS	47
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
8.1	Importância da manutenção preditiva em rolamentos	69
9	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva é aquela que monitora periodicamente componentes e máquinas industriais com o objetivo básico de evitar redução de rendimento e quebras, prolongando a vida útil sempre que possível. Além disso, as técnicas da manutenção preditiva ainda devem indicar as possíveis causas para os desgastes prematuros nos componentes.

Atualmente existem diversas técnicas de manutenção preditiva empregadas nas indústrias. São exemplos: análise de vibração; alinhamento a laser; análise de óleo; balanceamento; MCA (análise de circuito de motores); ESA (análise da assinatura elétrica); termografia; ultrassom; entre outras. O presente trabalho destacará a técnica de análise de vibração.

A análise de vibração é uma técnica da manutenção preditiva que possui o objetivo de identificar vibrações provenientes de outras partes da máquina as quais afetam prejudicialmente os rolamentos.

Os rolamentos são componentes utilizados com o objetivo principal de minimizar a fricção entre as peças móveis da máquina e suportar a carga. Logo, é possível pensar nas mais variadas aplicações dentro das mais distintas indústrias. Pode-se destacar o emprego de rolamentos em motores elétricos, motores de combustão interna, redutores, turbinas, ventiladores, entre muitos outros. Porém, como muitos componentes mecânicos, os rolamentos possuem uma determinada vida útil e conseqüentemente precisam ser substituídos. O grande problema é que em certas vezes este componente pode falhar, reduzindo a eficiência do processo, ou até mesmo quebrar, e como o movimento de rotação está presente, as chances de provocar danos não esperados em outras partes das máquinas são altas, os quais deverão ser analisados pela equipe de manutenção.

O emprego da manutenção preditiva nos rolamentos é de extrema importância pois é possível acompanhar periodicamente as condições reais de operação destes componentes, evitando a redução da eficiência, substituições desnecessárias e principalmente as quebras, procurando ainda prolongar a vida útil dos mesmos. Ainda é objetivo da manutenção preditiva identificar as causas potenciais de desgastes prematuros, os quais reduzem a vida útil dos componentes. A análise de vibração é uma técnica fortemente empregada para diagnosticar falhas em rolamentos.

A produção de estudos e conteúdos a respeito do tema é muito importante, uma vez que a manutenção preditiva, especialmente no Brasil, mesmo estando em crescimento ainda possui um ritmo lento em relação a outros países. Dessa forma é necessário difundir essas técnicas da manutenção preditiva procurando destacar a importância da mesma no processo de otimização e redução de gastos.

Como a manutenção preditiva é relativamente nova, uma limitação encontrada ao longo das pesquisas para a produção deste trabalho está no número de bibliografias existentes que tratem do tema em questão. O trabalho está delimitado em realizar a fundamentação teórica e levantar estudos reais para comprovar a importância e a eficácia da técnica aplicada. Os estudos reais somente serão possíveis graças aos equipamentos e softwares disponibilizados pela empresa RPM SUL Análises Técnicas.

Com o desenvolvimento deste estudo, pretende-se conhecer as diferentes abordagens de manutenção destacando a manutenção preditiva e sua técnica de análise de vibração, salientando os fatores que levam os rolamentos a falha e/ou desgaste prematuro no ambiente natural de trabalho, ressaltando as técnicas de manutenção preditiva empregadas para detectar esses fatores, validando assim, a eficácia da utilização de análise de vibração.

Para atingir esses objetivos, o presente trabalho aborda sucintamente a manutenção como um todo, identificando os tipos de manutenção e destacando a importância da manutenção preditiva como a principal abordagem no processo de otimização e redução de gastos. O trabalho ainda apresenta alguns conceitos sobre vibrações de máquinas e identifica os dois grandes grupos de rolamentos, axiais e radiais, ressaltando o emprego da técnica de análise de vibração na identificação das principais causas de falhas em rolamentos, bem como os principais problemas de origem mecânica.

O estudo está construído sob autores de grande relevância no tema, possibilitando que os leitores venham a conhecer e adquirir noções sobre o assunto, transmitindo aos mesmos conteúdos científicos, explicativos e ilustrativos, de forma a demonstrar o que é inerente ao conteúdo.

2 MANUTENÇÃO

A definição formal de manutenção é o ato ou efeito de manter-se. (FERREIRA, 2010). Ajustando essa definição, é possível chegar a uma descrição técnica de manutenção, que de acordo com Santos (2007, p.13) é “Manter em perfeito estado de conservação e funcionamento: equipamento, acessórios e tudo o que está ligado ao setor fabril de uma indústria.”

Segundo Rodrigues (2009, p.7) “Atualmente a manutenção é mais que uma necessidade nas organizações, pois sua função estratégica é atuar como participante dos resultados da empresa para o atingimento de metas da qualidade, produtividade e competitividade.”

Weber et al. (2009, p.14) destaca que “O tipo de manutenção ideal a ser aplicado em uma empresa é aquele que melhora a disponibilidade das máquinas ou equipamentos para a produção a um custo adequado.”

De acordo com Nepomuceno (1989, p.15-16) “A finalidade precípua da manutenção é conservar os equipamentos e máquinas em condições satisfatórias de operação e as suas atividades cobrem uma faixa bastante ampla de funções.” O mesmo autor, Nepomuceno (1989, p.16), ainda destaca que “Como todo equipamento apresenta desgaste, tal desgaste leva, invariavelmente, ao rompimento ou quebra de um ou mais componentes.”

Dessa forma grande parte dos componentes, especialmente no âmbito industrial, precisam sofrer uma intervenção para que a manutenção seja realizada, cedo ou tarde, dependendo do componente e da abordagem de manutenção adotada pela indústria.

2.1 Tipos de manutenção

A manutenção se divide nas seguintes abordagens: manutenção corretiva (não planejada e planejada), manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

2.1.1 Manutenção corretiva

Segundo Rodrigues (2009, p.16) “A manutenção corretiva é a intervenção realizada após a ocorrência da falha ou a apresentação de desempenho menor que o

esperado.” Esta forma é a que representa quase que a totalidade das operações de manutenção industrial, desde que a primeira fábrica entrou em funcionamento. (Rodrigues, 2009).

A manutenção corretiva, segundo Santos (2007, p.13) “Representou o princípio, em que os mecânicos simplesmente consertavam o que estava quebrado, não se preocupando com as causas ou efeitos que ocasionaram o defeito.”

2.1.1.1 Manutenção corretiva não planejada

Segundo Rodrigues (2009, p.17) “Esta é a forma mais reativa que a manutenção pode ter. Uma planta industrial usando este modelo de gerência em sua manutenção corretiva não gasta qualquer valor com manutenção, até que uma máquina ou sistema pare de operar.” A palavra reativa destaca que este tipo de abordagem provoca uma reação que muitas vezes passa despercebida pela empresa, reação esta que consiste na elevação do custo final, pois quando ocorre uma falha inesperada, além dos danos com o próprio equipamento que falhou, ainda é necessário avaliar os danos causados em outras partes da máquina, que possivelmente foram afetadas.

De acordo com Kardec e Nascif (2009, p.39) a “Manutenção corretiva não planejada é a correção da falha de maneira aleatória. [...] Caracteriza-se pela atuação da manutenção em fato já ocorrido, seja este uma falha ou um desempenho menor do que o esperado.”

Após o deslocamento da equipe de manutenção, uma nova etapa de análise é iniciada, levando em conta a dimensão dos danos, a verificação de peças no almoxarifado que serão utilizadas na substituição ou ainda a emissão de ordens de compra de emergência.

Dessa forma, segundo Kardec e Nascif (2009, p.39), “Normalmente, a manutenção corretiva não planejada implica altos custos, pois a quebra inesperada pode acarretar perdas na produção, perda da qualidade do produto e elevados custos indiretos de manutenção.”

2.1.1.2 Manutenção corretiva planejada

Segundo Rodrigues (2009, p.18) “Esta forma de manutenção é realizada quando o equipamento apresentou um defeito que foi identificado pelas práticas

preventivas ou preditivas.” Em outras palavras, esta técnica possui custos significativamente inferiores se comparada com a técnica não planejada, justamente em decorrência do planejamento.

Kardec e Nascif (2009, p.41) descreve que “Um trabalho planejado é sempre mais barato, mais rápido e mais seguro do que um trabalho não planejado. E será sempre de melhor qualidade.”

2.1.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva, segundo Santos (2007, p.14), é aquela em que “[...] o mecânico deve prever a vida do equipamento.” O mesmo autor, Santos (2007, p.14), destaca que “Para este tipo de manutenção exige-se do mecânico uma ‘intuição’ e um conhecimento técnico maior. Os mecânicos deixam de ser meros trocadores de peças, tornando-se profissionais realmente qualificados.”

Weber et al. (2009, p.35) salienta que:

A manutenção preventiva obedece a um padrão previamente esquematizado, que estabelece paradas periódicas com a finalidade de permitir a troca de peças que apresentam desgaste, ou não, por novas, assegurando, assim, o funcionamento perfeito da máquina por um período predeterminado. (WEBER et al., 2009, p.35).

A garantia de um certo ritmo de trabalho, além do equilíbrio necessário ao bom desenvolvimento das atividades, são fatores proporcionados pelo método preventivo. (WEBER et al. 2009).

Para Rodrigues (2009, p.19), a “Manutenção preventiva é a intervenção realizada de forma a evitar a falha ou queda no desempenho do equipamento, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo.”

Kardec e Nascif (2009, p.43) destaca que “Evidentemente, ao longo da vida útil do equipamento não pode ser descartada a falha entre duas intervenções preventivas, o que, obviamente, implicará uma ação corretiva.”

Dessa forma, em comparação com a manutenção corretiva, a abordagem preventiva traz um número notavelmente maior de benefícios, tanto para os equipamentos, quanto para a produção e para a equipe de manutenção.

2.1.3 Manutenção preditiva

Uma vez que o presente trabalho possui o objetivo de destacar a análise de vibração, a manutenção preditiva será apresentada com um aprofundamento maior, bem como técnica principal de estudo que será abordada na seção 3.

Segundo Santos (2007, p.18) na manutenção preditiva “É possível determinar ciclos, ou seja, determinar de quanto em quanto tempo se deve abrir a máquina.” O mesmo autor, Santos (2007, p.18), ainda destaca que “São criados históricos (fichas) onde todos os dados referentes à máquina são registrados e analisados conseguindo assim, prever quando acontecerão determinadas falhas [...]”

Para Rodrigues (2009, p.21) “A manutenção preditiva [...] pode ser definida como a atuação realizada com base em modificação de parâmetros de condição ou desempenho, submetido a uma sistemática de acompanhamento.”

Nepomuceno (1989, p.159) defende que “A manutenção preditiva consiste, então, na coleta de dados com relação às variáveis de interesse, comparar tais dados em função do tempo de funcionamento e interpretar tais variações e informações visando intervir no momento adequado [...]” Vale destacar que o instante adequado leva em conta, além da segurança e da confiabilidade de operação, algumas variáveis econômicas. (NEPOMUCENO, 1989).

A manutenção preditiva, para Weber et al. (2009, p.15):

É aquela que indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo seja bem aproveitado. (WEBER et al., 2009, p.15).

Rodrigues (2009, p.21) destaca que “O grande trunfo da utilização da manutenção preditiva é o fato de não necessitar parar o processo produtivo para ser realizada. Pelo contrário, para aplicação do monitoramento se faz necessário que os sistemas estejam em pleno funcionamento.” Dentre outros fatores, um ponto forte da manutenção preditiva está justamente nesta não obrigatoriedade da parada dos equipamentos, proporcionando monitoramento com exatidão enquanto a produção continua normalmente.

Kardec e Nascif (2009, p.45) defendem que “Através de técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição e a ação de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção corretiva planejada.”

De acordo com Weber et al. (2009, p.43), a manutenção preditiva possui os seguintes objetivos:

- a) determinar, antecipadamente, a necessidade de serviços de manutenção numa peça específica de um equipamento;
- b) eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- c) aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- d) reduzir o trabalho de emergência não planejado;
- e) impedir o aumento das falhas;
- f) aproveitar a vida útil total dos componentes e de um equipamento;
- g) aumentar o grau de confiança no desempenho de um equipamento ou linha de produção;
- h) determinar, previamente, as interrupções de fabricação para cuidar dos equipamentos que precisam de manutenção.

Através desses objetivos, é possível perceber que eles estão orientados a finalidades maiores e importantes, como a diminuição de custos de manutenção e a elevação da produtividade.

A utilização de aparelhos adequados é de extrema importância para que a manutenção preditiva possa ser executada, e assim, segundo Weber (2009), seja capaz de registrar diversos fenômenos, como os listados abaixo:

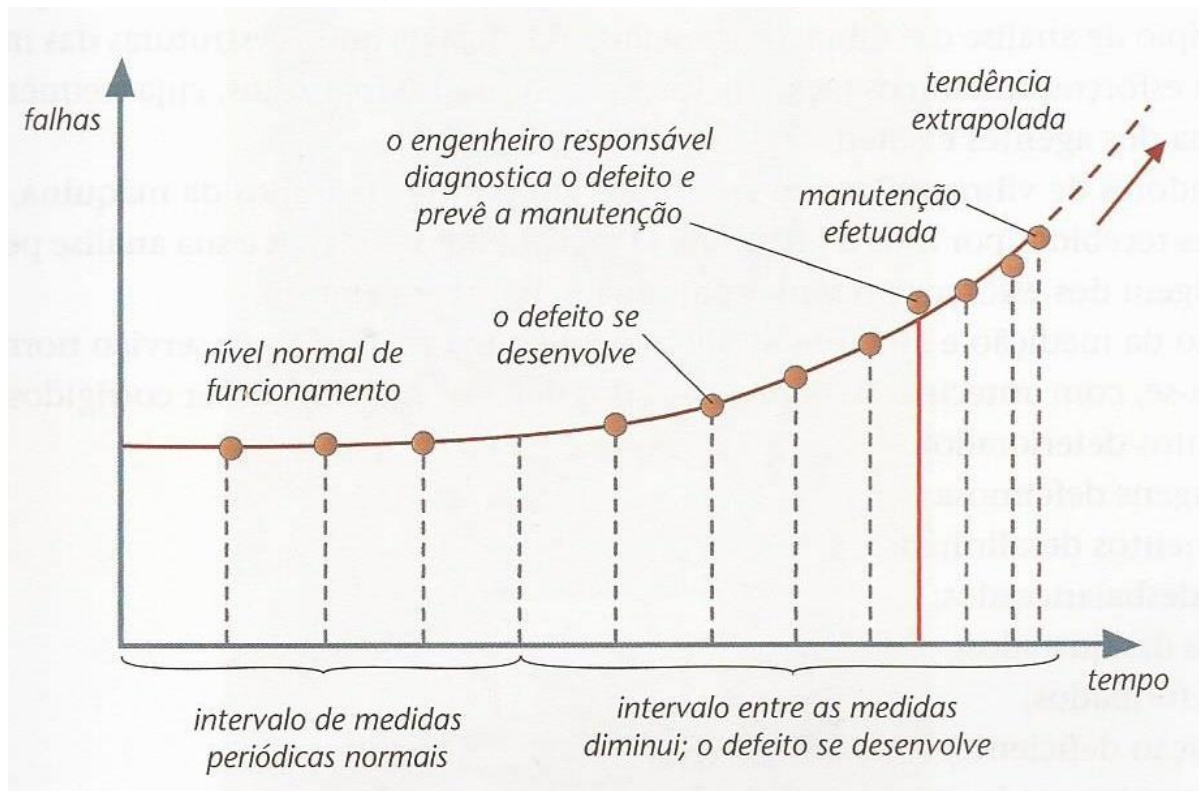
- a) vibrações das máquinas;
- b) pressão;
- c) temperatura;
- d) desempenho;
- e) aceleração.

Levando em conta o conhecimento e analisando os fenômenos, é possível apontar, de forma antecipada, potenciais defeitos ou falhas nas máquinas e equipamentos.

Weber et al. (2009, p.44) ressalta que “A manutenção preditiva, após a análise dos fenômenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências.” O diagnóstico apontado por Weber (2009, p. 44) “Detecta a irregularidade, o responsável terá o encargo de estabelecer, na medida do possível, um diagnóstico referente à origem e à gravidade do defeito constatado. Esse diagnóstico deve ser feito antes de se programar o reparo.” Já a etapa da análise da tendência da falha, de acordo com

Weber et al. (2009, p.45) “[...] consiste em prever com antecedência o defeito ou a falha, por meio de aparelhos que exercem vigilância constante, predizendo a necessidade do reparo.”

Figura 1 - Gráfico de falhas x tempo

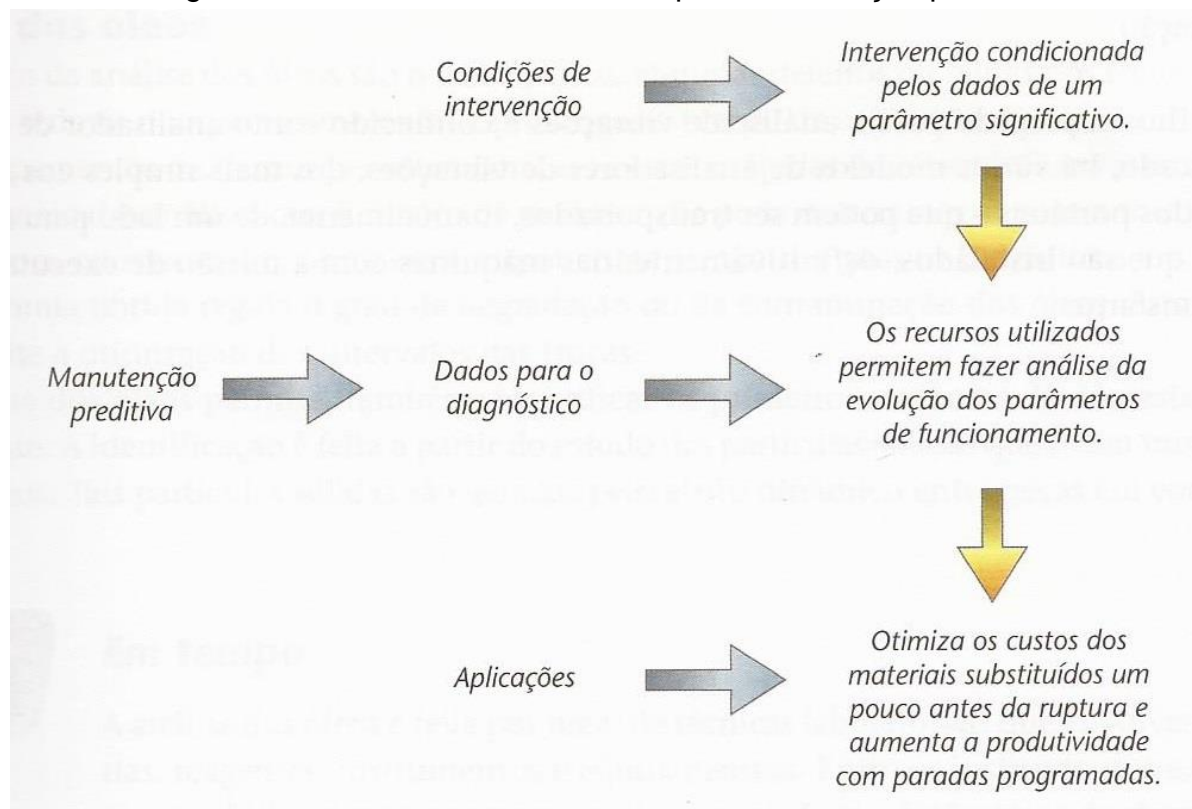


Fonte: Weber et al. (2009).

A Figura 1 estabelece uma relação das falhas com o tempo, e através dela é possível notar que, à medida que o tempo evolui, existe a necessidade de reduzir os intervalos entre as medidas periódicas normais, com o objetivo de controlar os defeitos, minimizando as falhas.

A Figura 2 descreve as etapas desenvolvidas ao longo da manutenção preditiva, levando em conta as condições de intervenção, os dados para o diagnóstico e as aplicações, em que o conjunto destes fatores resultam na otimização dos custos e conseqüente melhoria da produção.

Figura 2 - Procedimentos efetuados pela manutenção preditiva



Fonte: Weber et al. (2009).

2.1.4 Manutenção detectiva

Segundo Kardec e Nascif (2009, p.47) a “Manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.”

Rodrigues (2009, p.24) descreve que “[...] este tipo de manutenção consiste em fazer a verificação dos sistemas de proteção do equipamento, os quais nos avisarão que outros sistemas estão com problemas.” Kardec e Nascif (2009, p.48) destacam que “A identificação de falhas ocultas é primordial para garantir a confiabilidade. Em sistemas complexos essas ações só devem ser levadas a efeito por pessoal da área de manutenção, com treinamento e habilitação para tal [...]”

Dessa forma, o objetivo da manutenção detectiva está em identificar sistemas que, em decorrência de uma falha, podem deixar de cumprir com suas funções, não interrompendo a produção ou o equipamento de imediato, mas colocando-os em risco, como por exemplo uma lâmpada que indica que a temperatura do motor de um veículo está acima da recomendada. Caso a mesma esteja queimada, o motor pode entrar

em um estado de risco se operar em temperaturas acima da ideal de trabalho. (RODRIGUES, 2009).

2.1.5 Engenharia de manutenção

A engenharia de manutenção, de acordo com Kardec e Nascif (2009, p.50) “[...] é o suporte técnico da manutenção que está dedicado a consolidar a rotina e a implantar a melhoria.”

Segundo Rodrigues (2009, p.25) a engenharia de manutenção ainda se fundamenta em “[...] deixar de conviver com problemas crônicos, melhorar padrões e sistemáticas, desenvolver e melhorar a manutenibilidade dos equipamentos e instalações, dar feedback (retorno) aos projetistas e participar ativamente de novos projetos [...].”

Rodrigues (2009, p.25) descreve que:

“Baseando-se no histórico de dados do sistema de manutenção, pela evolução dos defeitos monitorados pela manutenção preditiva, a equipe estuda e propõe melhorias para todo o processo, fazendo uso de ferramentas de gestão e análise para se localizar e combater a causa principal de cada falha.” (RODRIGUES, 2009, p.25).

Por fim, para o autor, Rodrigues (2009, p.25), “Na prática, podemos dizer que a engenharia de manutenção é formada por uma equipe multidisciplinar voltada para trabalhar em prol da melhoria contínua do sistema de gerência de manutenção.”

3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Atualmente existem diversas técnicas de manutenção preditiva empregadas nas indústrias. São exemplos: análise de vibração; alinhamento a laser; análise de óleo; balanceamento; MCA (análise de circuito de motores); ESA (análise da assinatura elétrica); termografia; ultrassom; entre outras. O presente trabalho destacará a técnica de análise de vibração.

3.1 Análise de vibração

Segundo Weber et al. (2009, p.46) “Todas as máquinas em funcionamento produzem vibrações que, aos poucos, as levam a um processo de deterioração.” Para o autor, Weber et al. (2009, p.46) a deterioração é “[...] caracterizada por uma modificação na distribuição de energia vibratória pelo conjunto dos elementos que constituem a máquina. Observando a evolução do nível de vibrações, é possível obter informações sobre o estado da máquina.”

Kardec e Nascif (2009, p.244) descrevem que a “Vibração está presente em qualquer sistema à medida que este responde a uma excitação. Isso é válido para um eixo de compressor centrífugo, para a asa de um avião em vôo, [...] ou ainda para uma estrutura sujeita à ação do vento.”

Weber et al. (2009, p.46) descreve que “O princípio de análise das vibrações baseia-se na ideia de que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos (ação de forças) dão sinais vibratórios, cuja frequência será igual à frequência dos agentes excitadores.” O mesmo autor, Weber et al. (2009, p.46), ainda complementa que “Se captadores de vibrações forem colocados em pontos definidos da máquina, eles captarão as vibrações recebidas por toda a estrutura. O registro das vibrações e sua análise permitem identificar a origem dos esforços presentes em uma máquina operando.”

Através da medição e análise das vibrações de uma máquina operando regularmente, detecta-se, de acordo com Weber et al. (2009), de forma antecipada, a existência dos seguintes defeitos que devem ser retificados:

- a) rolamentos deteriorados;
- b) engrenagens defeituosas;
- c) acoplamentos desalinhados;

- d) rotores desbalanceados;
- e) vínculos desajustados;
- f) eixos deformados;
- g) lubrificação deficiente;
- h) folga excessiva em buchas;
- i) falta de rigidez;
- j) problemas aerodinâmicos;
- k) problemas hidráulicos;
- l) cavitação.

O aparelho empregado para a análise de vibrações é chamado de analisador de vibrações. Este mesmo equipamento é popularmente chamado de “coletor de vibrações” entre a equipe de manutenção e os técnicos que fazem uso do mesmo.

A Figura 3 demonstra um analisador de vibrações portátil. Vale destacar que, atualmente, existem diversos fabricantes destes equipamentos, com uma ampla gama de analisadores que variam desde os mais simples, e conseqüentemente com custos menores de aquisição, até os mais completos, com custos mais elevados.

Figura 3 - Analisador de vibrações portátil



Fonte: WEBER et al. (2009).

4 VIBRAÇÕES DE MÁQUINAS E SUA RELAÇÃO COM AS ONDAS MECÂNICAS

Segundo Emerson (2006, p.12) “Todos os sistemas mecânicos possuem massa, rigidez e amortecimento e se comportam de forma semelhante a um sistema massa-mola.” Em outras palavras, é possível sentir quando uma máquina está vibrando, como se a superfície dessa máquina estivesse pulando de um lado para outro. (EMERSON, 2006).

Emerson (2006, p.12) ainda destaca que “[...] o peso ou massa podem representar o componente de máquina que está se movendo sob a ação de uma força, e a mola pode representar as restrições nas quais a massa se move.”

Contudo, pode-se afirmar que é normal as máquinas vibrarem, mas como Emerson (2006, p.13) enfatiza que “[...] com uma regra, um baixo nível de vibração indica que o equipamento está funcionando corretamente. Quando a vibração começa a aumentar, a máquina provavelmente está caminhando para uma possível falha.”

4.1 Principais propriedades de uma onda mecânica

O presente trabalho não possui o objetivo de abordar matematicamente o tema em questão, porém, algumas das principais propriedades das ondas mecânicas serão brevemente apresentadas (amplitude, período, frequência e fase), com o intuito de facilitar o entendimento no momento em que os espectros forem exibidos.

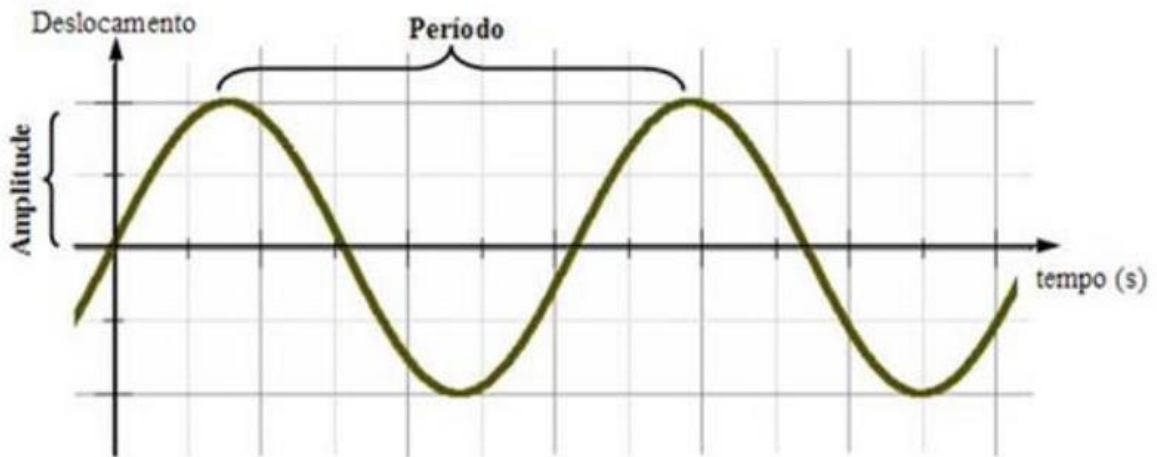
Para Halliday, Resnick e Walker (2015, p.119) “A amplitude [...] de uma onda [...] é o módulo do deslocamento máximo sofrido pelos elementos a partir da posição de equilíbrio quando a onda passa por eles.” Em outras palavras, de acordo com Rocha (2014, p.32) “A amplitude é a medida escalar de oscilação positiva e negativa de uma onda no tempo, podendo ser medida em diferentes formas: pico, pico a pico e RMS (Raiz Média Quadrática).” O mesmo autor, Rocha (2014, p.32), destaca que “A amplitude da vibração é o que caracteriza e descreve a severidade da vibração.” Conceição (2012, p.90) descreve que “Amplitude é a intensidade que acontece um determinado evento mostrando a criticidade e a destrutividade dos eventos presentes.”

De acordo com Emerson (2006, p.4) “Muitas vezes, as vibrações [...] são periódicas, isto é, se repetem em todos os seus particulares após um certo intervalo

de tempo, chamado de período de vibração [...]” Em outras palavras, o período é o tempo decorrido para que um ciclo seja completado.

A Figura 4 ilustra os conceitos de amplitude e período de uma onda mecânica.

Figura 4 - Forma de onda senoidal no tempo



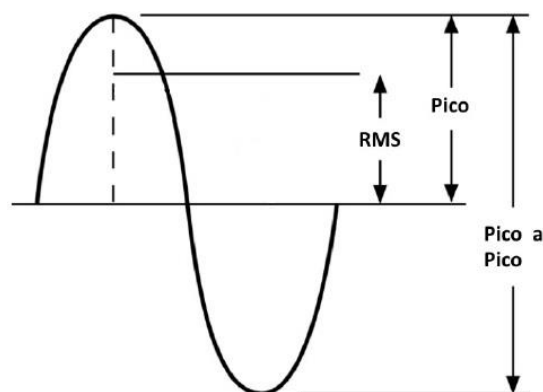
Fonte: ROCHA (2014).

Como já abordado, existem diferentes valores globais de interesse relativos ao sinal de vibração. Segundo Rocha (2014, p.34):

“O valor de pico-a-pico é usado onde o deslocamento vibratório da máquina é a parte crítica, por exemplo, com turbomáquinas com mancal de deslizamento. O valor de pico é usado na indicação de falhas em elementos de alta frequência como falha em rolamentos e dentes de engrenagens. E o de RMS é uma média global da vibração, representa a quantidade de energia contida em uma vibração. É indicada para vibrações de média e baixa frequência relacionadas a dinâmica da máquina.” (ROCHA, 2014, p.34).

A Figura 5 indica a medição da amplitude do sinal de onda de diferentes formas.

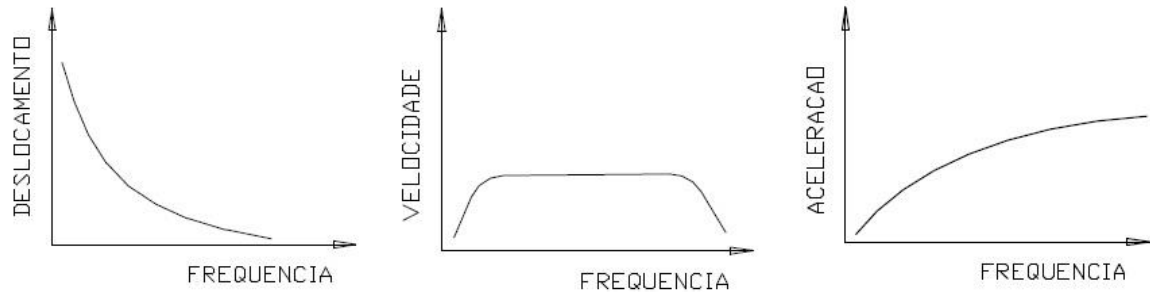
Figura 5 - Onda no tempo com as diferentes leituras para amplitude



Fonte: ROCHA (2014).

A amplitude, segundo Bandeira, Abreu e Gianelli (2010, p.7) “Pode ser tomada em Deslocamento, Velocidade e Aceleração [...]”. As curvas de confiabilidade estão representadas, respectivamente, na Figura 6.

Figura 6 - Amplitude sendo tomada em deslocamento, velocidade e aceleração



Fonte: BANDEIRA, ABREU E GIANELLI (2010).

No ambiente de análise de vibração, utilizando o contexto do sistema métrico de medidas, as amplitudes são representadas conforme o Quadro 1 mostra.

Quadro 1 – Unidades de medida da amplitude no sistema métrico

AMPLITUDE	SISTEMA MÉTRICO
Deslocamento	micrometros (μm)
Velocidade	milímetros por segundo (mm/s)
Aceleração	milímetros por segundo ao quadrado (mm/s^2) / aceleração da gravidade (g)

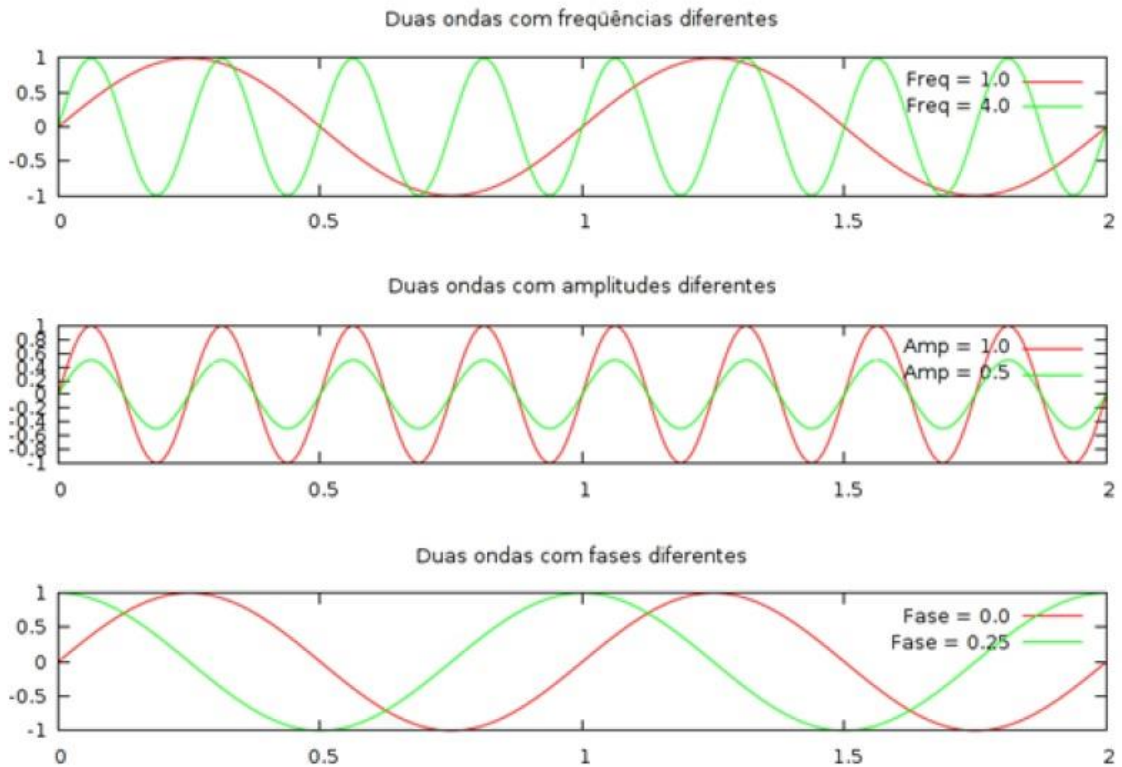
Fonte: Adaptado de BANDEIRA, ABREU E GIANELLI (2010).

Para Emerson (2006, p.4) “O inverso do período corresponde ao número de vezes que o movimento se repete em uma unidade de tempo, denominado frequência de vibração [...]”. Conceição (2012, p.90) descreve que “Frequência é o número de ciclos que um evento acontece em um determinado período [...]”.

Rocha (2014, p.34) descreve que “A fase ou ângulo de defasagem é a diferença entre a excitação da vibração e a resposta no sistema.” Conceição (2012, p.90) descreve que a fase “[...] informa o ângulo em que o sinal se apresenta através da reação física da máquina ou componente.”

A Figura 7 apresenta ondas com diferentes frequências, amplitudes e fases.

Figura 7 - Diferenças em um domínio temporal

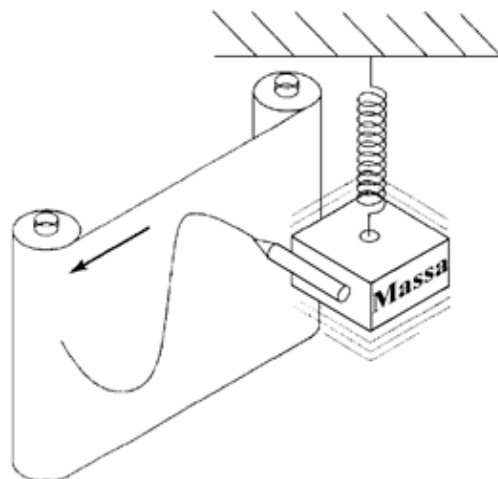


Fonte: ROCHA (2014).

4.2 O movimento vibratório

Emerson (2006, p.13) defende que “Se uma caneta fosse presa à massa e um registrador de tira colocado em posição, um traço da resposta de vibração poderia ser documentado [...]”, como a Figura 8 apresenta:

Figura 8 - O traço de uma caneta preso a um sistema massa-mola



Fonte: EMERSON (2006).

Emerson (2006, p.13) destaca que “Este traço é senoidal, o que foi desenhado é conhecido como uma ‘onda seno’. A onda de seno será usada para definir e descrever várias características de vibração de máquina.”

Na apostila “Treinamento de Vibração Category I”, Mobius (2017, p.87) destaca que, quanto as formas de medir a amplitude (conforme o Quadro 1 anteriormente), e em relação ao sistema massa-mola apresentado na Figura 8, as unidades de vibração são dadas por:

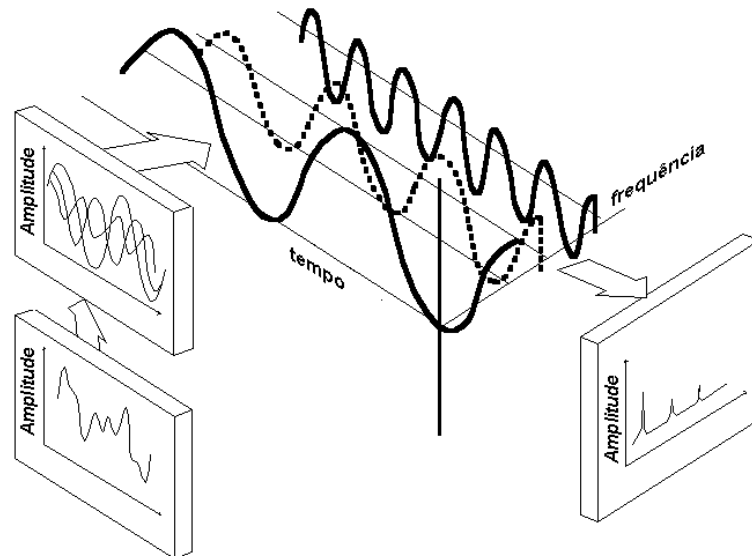
- a) deslocamento: consiste na distante que a mola move para cima e para baixo, e na distante que o eixo move para dentro e para fora;
- b) velocidade: é o qual rápido ele está se movendo em cada instante;
- c) aceleração: é o quão rapidamente está acelerando ou desacelerando.

No contexto de análise de vibração, o deslocamento evidencia as energias de vibrações que ocorrem em baixa frequência; já a velocidade é o parâmetro menos influenciado por ruídos de baixa ou alta frequência, mostrando-se num espectro a mais aplainada das curvas; e por fim, a aceleração é o parâmetro que melhor representa os componentes de alta frequência.

Quanto ao movimento vibratório, existem dois métodos principais de exibi-lo segundo Emerson (2006, p.13), “[...] no domínio de tempo e no domínio de frequência. Esses domínios simplesmente observam o mesmo sinal dinâmico de dois diferentes pontos de vista.” Para determinar qual janela será utilizada, deve-se levar em conta as características do sinal que se pretende avaliar.

Emerson (2006, p.14) apresenta que “O domínio de tempo é uma exibição bidimensional de amplitude no eixo vertical com tempo ao longo do eixo horizontal, enquanto que o domínio de frequência vê a amplitude no eixo vertical com frequência exibida no eixo horizontal.” A Figura 9 ilustra os dois domínios como duas janelas posicionadas a 90° uma em relação a outra.

Figura 9 – O sinal de vibração pode ser visto através do domínio do tempo e domínio da frequência

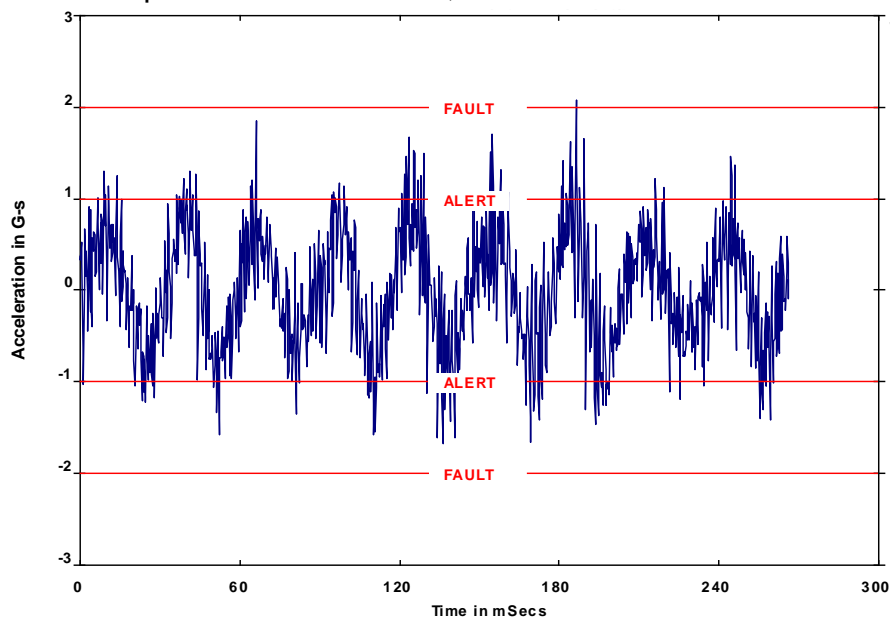


Fonte: EMERSON (2006).

Emerson (2006, p.14) destaca que “A forma de onda é a representação do sinal no domínio do tempo. Ela mostra o que está acontecendo a cada instante. O exame da forma de onda pode revelar detalhes importantes das vibrações que não são visíveis nos espectros de frequência.” O mesmo autor, Emerson (2006, p.14), ainda descreve que “Sua principal aplicação é identificar a ocorrência de eventos de curta duração, como impactos, e determinar a sua taxa de repetição.”

A Figura 10 ilustra uma forma de onda, apresentando o sinal variando no tempo.

Figura 10 – Exemplo de forma de onda, mostrando o sinal variando no tempo



Fonte: EMERSON (2006).

Emerson (2006, p.15) destaca que “Analisar a própria forma de onda no tempo pode ser muito incômodo, trabalhoso e por vezes inviável, quando existem muitas componentes no sinal.” O mesmo autor, Emerson (2006, p.15), enfatiza que “Neste caso é necessário empregar uma exibição no domínio de frequência. A exibição no domínio da frequência é uma das técnicas mais poderosas para monitoramento de condição das máquinas.”

De acordo com Emerson (2006, p.15):

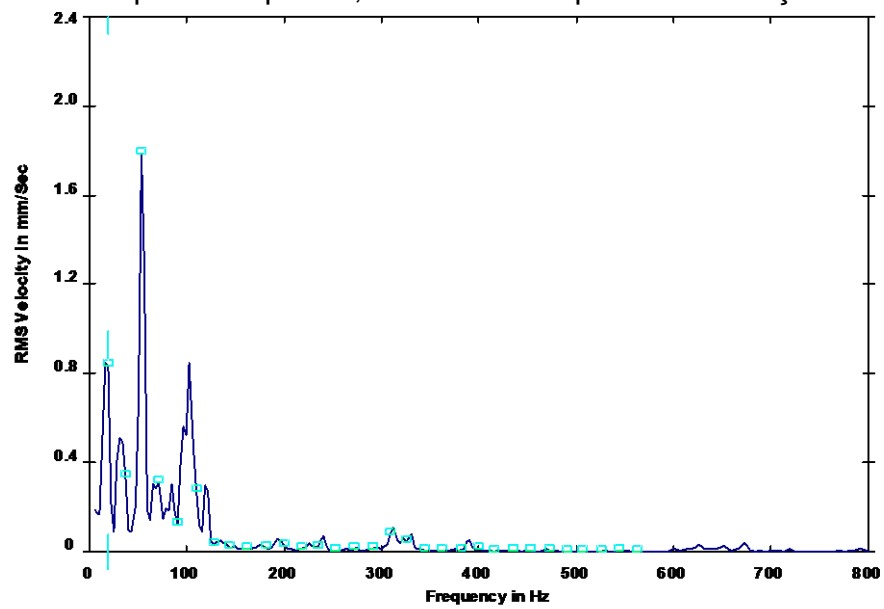
“Para simplificar esse processo, os modernos analisadores de vibração utilizam a Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform). Uma FFT é uma transformação de dados de domínio de tempo (amplitude em função do tempo), em dados de domínio de frequência (amplitude em função da frequência), feita por um computador (microprocessador).” (EMERSON, 2006, p.15).

Para Silva (2013, p.8):

“Muitas das técnicas de processamento consistem de transformações de funções entre dois espaços de definição. Por exemplo a transformada de Fourier, transforma uma função no espaço temporal para um espaço cuja base são as funções seno e cosseno complexas. Assim, o sinal é descrito no domínio da frequência através da sua composição em relação às funções que formam a base do espaço. A Transformada de Fourier se tornou a ferramenta mais importante no processamento de sinais devido ao uso amplo e consolidado do espectro de frequências para análise de um sinal.” (SILVA, 2013, p.8).

Emerson (2006, p.15) descreve que “Inicialmente o sinal captado pelo sensor (forma de onda) é digitalizado. Sobre os dados resultantes da digitalização é aplicado um algoritmo matemático (FFT) obtendo-se a representação no domínio de frequência.” A Figura 11 ilustra um exemplo de espectro de frequência.

Figura 11 – Um exemplo de espectro, mostrando amplitude em função da frequência



Fonte: EMERSON (2006).

5 ROLAMENTOS

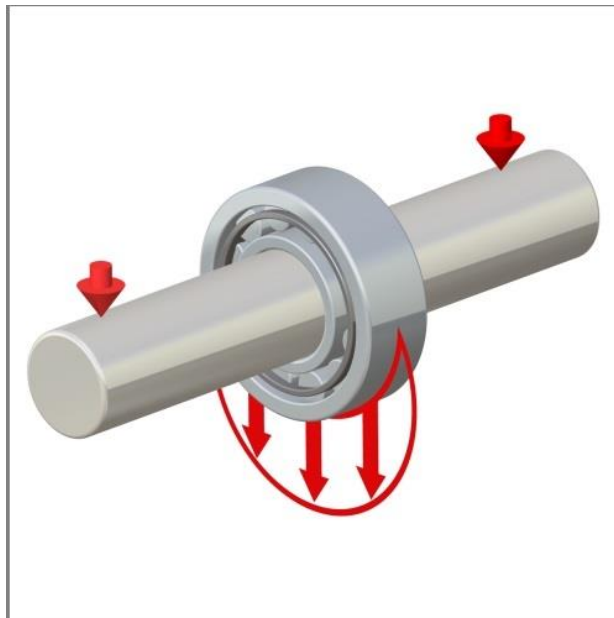
Segundo Santos (2007, p.33) os rolamentos no mundo da manutenção são “Definidos como dispositivos destinados a suportar cargas dinâmicas e transmitir movimento de rotação.” O mesmo autor, Santos (2007, p.33), ainda descreve que o rolamento nas indústrias “Consiste em anéis, externo e interno, esferas ou rolos distribuídos equidistantes (mesma distância) entre os anéis e mantidos separados(as) por um acessório chamado de gaiola.”

A fornecedora de rolamentos DGB destaca que “A função do rolamento é minimizar a fricção entre as peças móveis da máquina e suportar a carga.”

5.1 Tipos de rolamentos

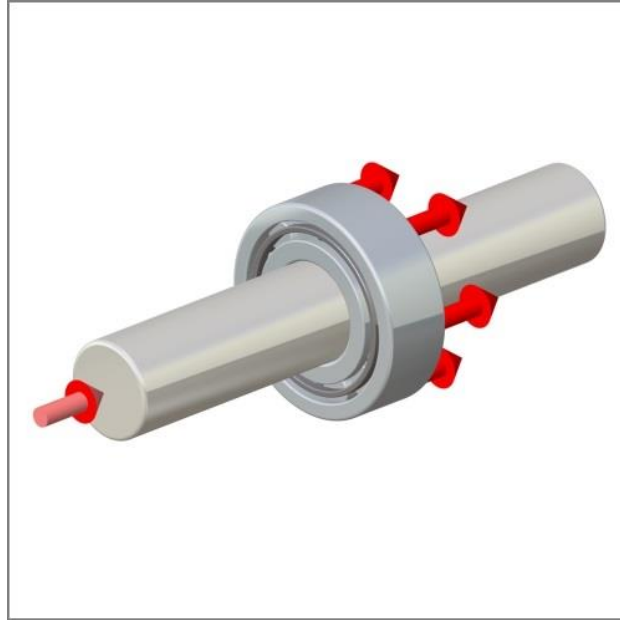
Existem diversos tipos de rolamentos os quais se dividem em dois grandes grupos basicamente de acordo com a direção da carga que irão apoiar: rolamentos radiais e rolamentos axiais. As figuras 12 e 13 ilustram as direções citadas.

Figura 12 - Carga radial



Fonte: NSK Brasil (2018).

Figura 13 - Carga axial

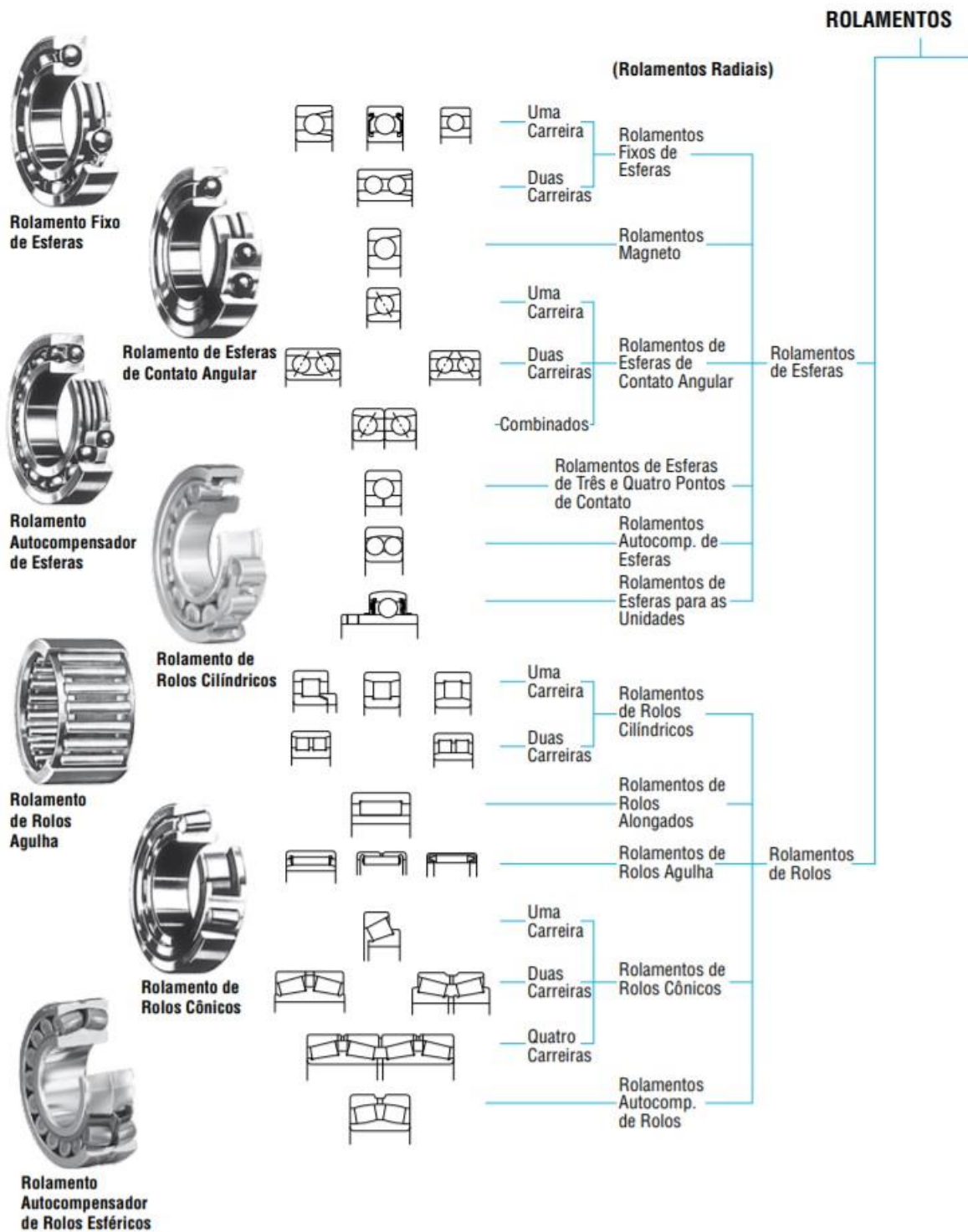


Fonte: NSK Brasil (2018).

A carga radial consiste em uma força que atua na direção transversal ao eixo, enquanto a carga axial consiste em uma força que atua na direção longitudinal do eixo, como as figuras 12 e 13 acima ilustram.

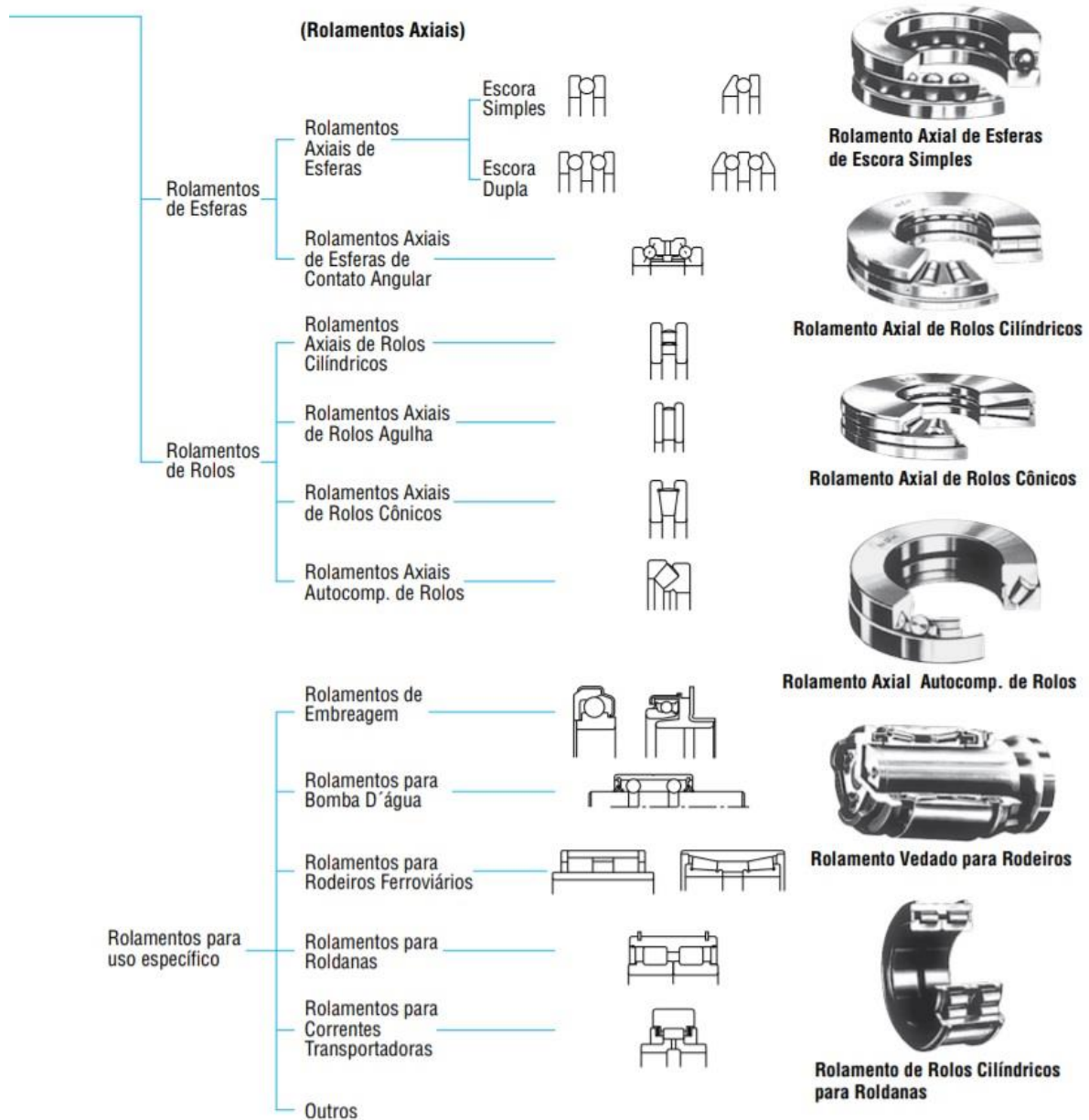
As Figuras 14 e 15 foram retiradas do catálogo geral de rolamentos da fabricante NSK e ilustram detalhadamente os tipos de rolamentos com suas respectivas construções e grupos aos quais pertencem. Vale destacar que, a Figura 14 ilustra os rolamentos radiais, enquanto a Figura 15 exhibe os rolamentos axiais.

Figura 14 - Classificação dos rolamentos radiais



Fonte: NSK Brasil (2013).

Figura 15 - Classificação dos rolamentos axiais



Fonte: NSK Brasil (2013).

5.2 Análise de vibração em rolamentos

Segundo Nepomuceno (1989, p.454):

[...] um rolamento [...] quando apresenta defeito grave, pode paralisar um equipamento no valor de algumas centenas de milhões, como realmente paralisa. Por tal motivo, a manutenção preditiva apresenta resultados altamente compensadores somente quando prediz, com uma antecedência razoável (entre duas e oito semanas) quando um rolamento iniciará a dar problemas ou, em outras palavras, quando um rolamento deverá ser

substituído para evitar interrupção da produção. (NEPOMUCENO, 1989. p.454).

Para Weber et al. (2009, p.311) “Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes.” A emissão destes sinais consiste no objeto de estudo da análise de vibração dentro da manutenção preditiva. O mesmo autor ainda destaca que “Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: riscos nas pistas, nos roletes ou esferas, *pitting*, trincas, corrosão, erosão e contaminação [...]” O fenômeno de *pitting* consiste em uma forma de corrosão altamente destrutiva, que afeta as superfícies metálicas.

Vale destacar que o processo de deterioração de um rolamento pode ter início tanto na pista externa quanto na interna, bem como ainda num dos elementos rolantes ou na gaiola, propagando-se posteriormente para os componentes restantes.

5.2.1 Espectro de vibração e frequências características

Segundo Weber et al. (2009, p.312):

As frequências características de falhas de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: são assíncronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhecem as características do rolamento que está sendo monitorado. (WEBER et al., p.312).

Os componentes do rolamento, ou seja, a pista interna e a externa, os rolos ou esferas e a gaiola possuem comportamentos dinâmicos específicos, que geram as quatro frequências básicas de defeitos em rolamentos. Para Mobius (2017, p.294), essas frequências são:

- a) ball pass inner race (BPFI): frequência de passagem da pista interna;
- b) ball pass outer race (BPFO): frequência de passagem da pista externa;
- c) fundamental train (FTF): frequência fundamental (frequência de gaiola);
- d) ball spin (BSF): frequência de passagem do elemento rolante.

Weber (2009, p.312) destaca que:

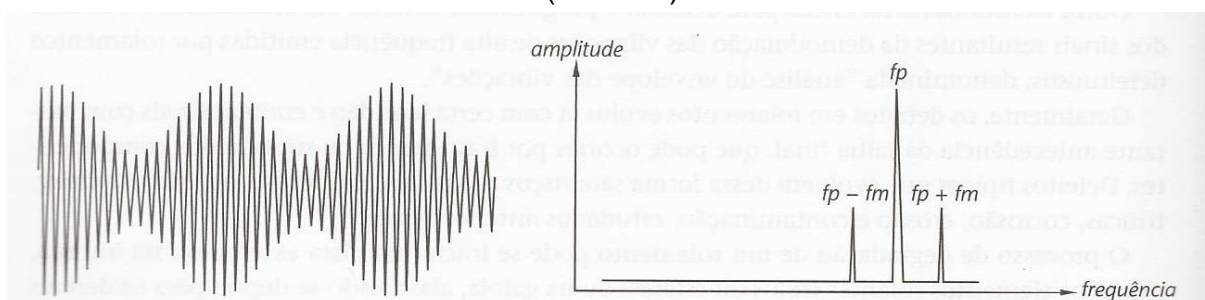
Ao contrário da maioria das frequências de vibrações geradas por componentes mecânicos, essas são, verdadeiramente, frequências de defeitos, isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus

componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha. (WEBER et al., 2009, p.312).

Segundo Mobius (2017, p.294) os “Rolamentos geram vibração em ‘frequências de defeito’ [...]. Elas podem ser calculadas, determinadas a partir de um banco de dados, ou reconhecidas: padrão de harmônicos e sidebands.”

Weber et al. (2009, p.312) descreve que “A modulação de amplitude é a variação com o tempo da amplitude de uma vibração.” A Figura 16 apresenta um gráfico do sinal citado. Da mesma maneira, o autor ainda descreve que “A componente básica é denominada portadora; o sinal que descreve a variação da amplitude da portadora ao longo do tempo é denominado sinal modulante ou componente modulador e sua frequência é denominada frequência de modulação.”

Figura 16 - Modulação de amplitude (a esquerda) e espectro de um sinal modulado (a direita)



Fonte: WEBER et al. (2009).

Como a Figura 16 apresenta, segundo Weber et al. (2009, p.313):

O espectro de um sinal modulado [...] consta de um pico central na frequência da portadora (f_p) e dois picos laterais denominados bandas laterais, que se situam acima e abaixo da portadora. São espaçados entre si e do pico central por um valor igual à frequência de modulação (f_m). (WEBER et al., 2009, p.313).

Weber et al. (2009, p.313) caracteriza que “Se o sinal modulante for senoidal, existem apenas duas bandas laterais, uma de cada lado da portadora. Se o sinal modulante for completo, existe uma série de bandas laterais de cada lado da portadora.”

Como descrito por Weber et al. (2009, p.313):

Os defeitos em rolamentos geram impactos repetitivos que excitam vibrações livres de curta duração (com alto amortecimento) em frequências naturais elevadas (>500Hz), as quais se propagam pela caixa dos mancais e da estrutura da máquina sob a forma de ondas de tensão. (WEBER et al., 2009, p.313).

Como caracteriza Weber et al. (2009, p.313) “Assim, essas vibrações livres geradas pelos defeitos em rolamentos são moduladas em amplitude pela sequência de impactos repetitivos e pelo efeito do amortecimento.” O mesmo autor, Weber et al. (2009, p.313), conceitua que “As portadoras são as frequências naturais dos componentes do rolamento (pistas e elementos rolantes) e da caixa. As modulantes são as frequências básicas de defeitos (BSF, BPFO e BPF1) [...]”

Segundo Weber et al. (2009, p.313):

Na avaliação das vibrações de rolamentos, é fundamental considerar que as amplitudes dos espectros de frequências e o valor rms global são valores médios calculados ao longo de certo tempo de integração, definido pela configuração da instrumentação. Por outro lado, os impactos gerados pelos defeitos de rolamentos são tipicamente transitórios, de curta duração, que inevitavelmente apresentam fatores de crista bastante altos, isto é, valores de pico elevados e valores rms⁷ reduzidos. Por isso, as medidas de amplitude mais adequadas para caracterizar a severidade de um defeito de rolamento são aceleração das vibrações e respectivos fatores de crista. Esses sinais podem ser de pico, ou pico a pico, e devem ser extraídos do histórico da forma de onda. (WEBER et al., 2009, p.313).

5.2.2 Equipamentos envolvidos

Para a captação de vibrações são utilizados, segundo Sequeira (sem data, p.4) “[...] sensores a que se dá o nome de transdutores de vibração mecânica. Existem vários tipos de sensores, sendo o acelerômetro o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se resumem a aplicações muito específicas.”

Kardec e Nascif (2009, p.248) destacam que:

A maioria das medidas de vibração atualmente é feita através da medição de aceleração. Para se obter velocidade ou o deslocamento basta integrar uma ou duas vezes, respectivamente. Existem diversos tipos de acelerômetros, mas basicamente todos utilizam um sistema massa mola e são classificados como transdutores sísmicos. O tipo mais encontrado é o piezoelétrico, constituído por um ou mais cristais piezoelétricos, pré-tensionados por uma massa e montados em uma carcaça [...]. (KARDEC e NASCIF, 2009, p.248).

De acordo com Weber et al. (2009, p.314) os registradores “Medem a amplitude das vibrações, permitindo avaliar a sua magnitude. Medem, também, a sua

⁷ O valor rms citado significa, do inglês, *root mean square* (valor médio quadrático).

frequência, possibilitando identificar a fonte causadora das vibrações. Os registradores podem ser analógicos ou digitais.”

Utilizando os analisadores de espectro em paralelo com os softwares relacionados a eles e ainda com a presença de um computador, Weber (2009) destaca que é possível efetuar:

- a) o *zoom*, que é uma função que possibilita a ampliação de bandas de frequência;
- b) a diferenciação e a integração de dados;
- c) a comparação de espectros;
- d) a comparação de espectros com correção da velocidade de rotação.

Dessa forma, é possível reunir os conhecimentos de manutenção com as técnicas da manutenção preditiva, os sinais apresentados pelos rolamentos com os equipamentos necessários para identificá-los de forma correta, e a análise dos dados coletados com a indicação do potencial defeito relacionado.

6 PROBLEMAS DE ORIGEM MECÂNICA

Diversos problemas podem ser encontrados em máquinas elétricas rotativas. Os problemas de origem mecânica são os mais comuns. Para Silva (2013, p.45) “Entre eles, o desbalanceamento é o que estará sempre presente em algum nível, uma vez que na prática é virtualmente impossível instalar um rotor perfeitamente balanceado.” Os seguintes problemas de origem mecânica serão brevemente abordados e ilustrados: desbalanceamento; desalinhamento; empenamento de eixos; folgas; excentricidade; roçamentos; e defeitos em mancais de rolamento.

6.1 Desbalanceamento

A *International Standards Organization* (ISO) define o desbalanceamento como uma “Condição que existe no rotor quando vibração, força ou movimento é transmitido aos mancais como resultado de forças centrífugas.” O desbalanceamento de um rotor, na apostila de “Análise de Vibração I” de Emerson (2006, p.105), “[...] é causado pela não coincidência entre o seu centro de massa e o seu centro de rotação, devido a erros de montagem, incrustações, desgaste, ruptura ou perda de componentes como, por exemplo, palhetas de turbinas.”

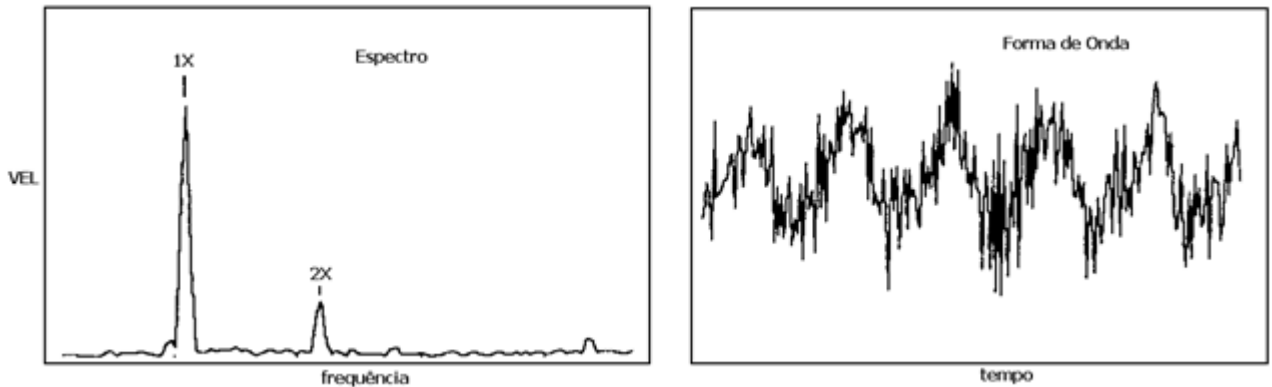
Emerson (2006, p.105) ainda destaca os principais sintomas de desbalanceamento:

- a) vibrações elevadas na direção radial, com predominância da componente 1N;
- b) a amplitude da componente 1N aumenta com o aumento da velocidade de rotação;
- c) as amplitudes das componentes múltiplas de 1N não são elevadas;
- d) as vibrações na direção axial não são elevadas.

É importante salientar que a notação 1N, 2N, 3N, 4N, ..., etc., são utilizadas semelhante a notação 1X, 2X, 3X, 4X, ..., etc., para representar múltiplos da velocidade de rotação da máquina (sendo N e X = frequência de rotação).

A Figura 17 ilustra o espectro e a forma de onda característicos do problema de desbalanceamento.

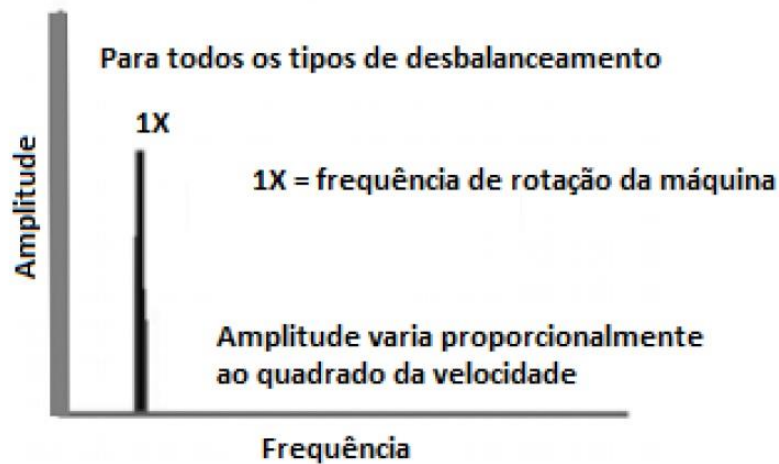
Figura 17 – Espectro e forma de onda característicos de desbalanceamento



Fonte: EMERSON (2006).

Mobius (2017, p.271) descreve que “Espera-se ver um alto pico em 1X no espectro na direção radial”, como ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Espectro característico de desbalanceamento



Fonte: SILVA (2013).

6.2 Desalinhamento

O desalinhamento consiste, de acordo com Emerson (2006, p.106), “[...] quando os eixos de duas máquinas acopladas apresentam um deslocamento angular ou paralelo, quando o centro de um dos mancais não está alinhado com os demais, ou ainda quando um dos mancais está inclinado com relação aos demais [...]”. O mesmo autor, Emerson (2006, p.106), ainda destaca que “O desalinhamento pode ser causado por erros de montagem, recalque de fundações, dilatação térmica, deformação da estrutura ou travamento do acoplamento.”

Mobius (2017, p.279) descreve que “Os eixos estão desalinhados se suas linhas de centro rotacionais não são colineares quando as máquinas estão operando

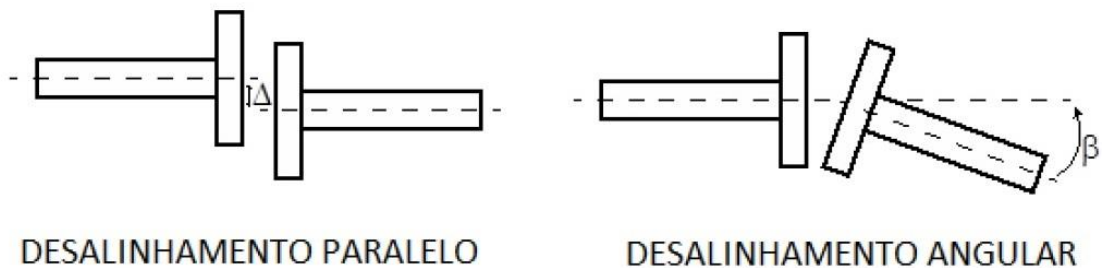
sob condições normais.” Vale ressaltar que um alinhamento preciso resulta em menos tensão nos selos, rolamentos, eixos e acoplamentos. (MOBIUS, 2017).

Para Emerson (2006, p.106), os principais sintomas de desalinhamento são:

- a) vibrações elevadas nas direções radiais e na axial, com predominância das componentes 1N, 2N ou, em certos casos, 3N. Essas componentes apresentam amplitudes estáveis;
- b) as amplitudes das componentes 4 a 10N geralmente não são elevadas.

Existem basicamente dois tipos de desalinhamento, o paralelo e o angular. Para Silva (2013, p.47), o primeiro ocorre quando “A linha de centro dos dois eixos se cruzam formando um ângulo entre elas.” Já o segundo, para o mesmo autor, Silva (2013, p.47), ocorre quando “[...] as linhas de centro dos eixos são paralelas entre si e apresentam um off-set.” A Figura 19 ilustra os desalinhamentos apresentados.

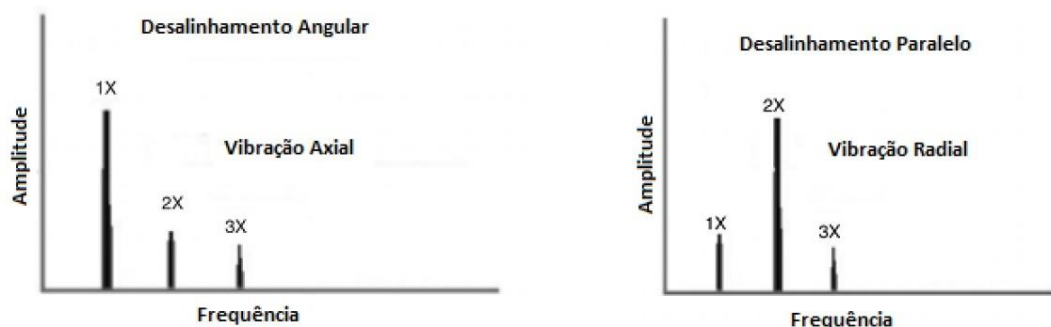
Figura 19 – Representação dos tipos de desalinhamento – paralelo e angular



Fonte: SILVA (2013).

Os espectros de frequência são distintos para os problemas de desalinhamento angular e paralelo, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Espectro da vibração axial para o desalinhamento angular e da vibração radial para o desalinhamento paralelo



Fonte: SILVA (2013).

6.3 Empenamento de eixos

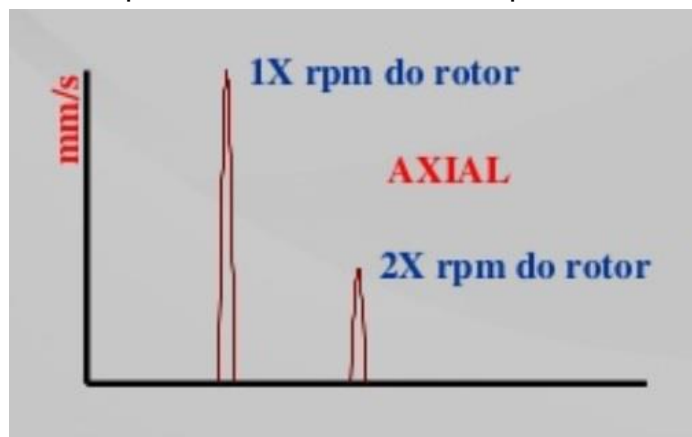
O empenamento de eixo, segundo Rocha (2014, p.46), “[...] pode provocar elevada vibração, sendo um problema comumente confundido com desbalanceamento e desalinhamento. A execução de um balanceamento poderá reduzir a vibração provocada, porém raramente irá eliminá-la.” Emerson (2006, p.107) destaca que o empenamento de eixo “Ocorre devido à má montagem e/ou estocagem inadequada de eixos e rotores ou pelo aquecimento localizado do eixo, geralmente em máquinas térmicas e motores elétricos.” A solução desse problema, para Rocha (2014, p.46), “[...] reside na remoção do empenamento que, quando viável, pode ser realizado mediante aquecimento ou uso de uma prensa.”

Segundo Emerson (2006, p.107), os principais sintomas de empenamento de eixos são:

- a) vibrações elevadas em apenas uma máquina do grupo, com amplitudes elevadas das componentes 1N e/ou 2N, nas direções radiais e axial.

A Figura 21 ilustra o espectro característico do problema de empenamento de eixos.

Figura 21 – Espectro característico de empenamento de eixos



Fonte: CT VIBRAÇÕES (2017).

6.4 Folgas

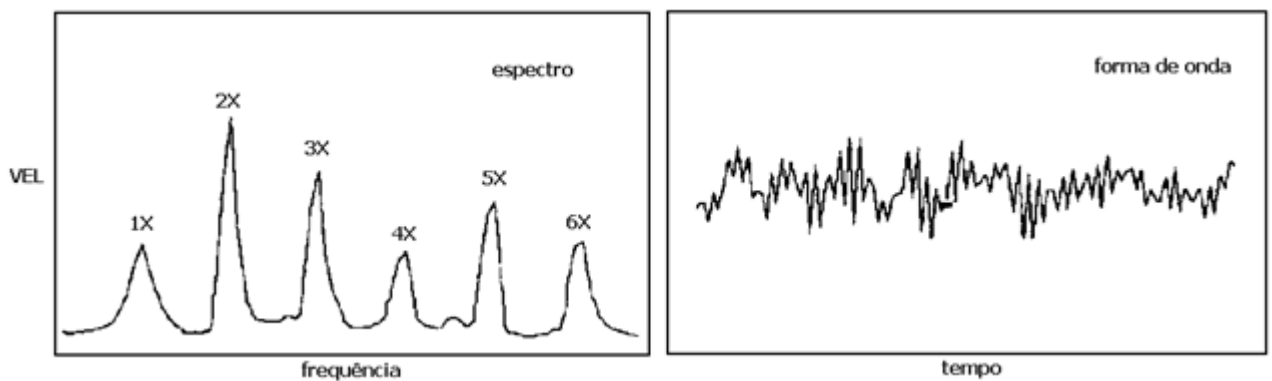
De acordo com Emerson (2006, p.108), “Existem duas categorias de folgas: folgas estruturais ou de elementos rotativos. As folgas podem ser causadas por erros de montagem, desgaste excessivo, danos na fundação ou na base, trincas ou ruptura de componentes de fixação.”

Emerson (2006, p.108) ainda destaca os principais sintomas de folgas:

- a) vibrações elevadas nas direções radiais, com amplitudes elevadas das componentes 3 a 10N;
- b) as vibrações podem ter uma direção predominante, normalmente a vertical;
- c) em certos casos podem ocorrer sub e inter-harmônicos;
- d) geralmente as vibrações axiais não são elevadas.

A Figura 22 ilustra o espectro e a forma de onda característicos do problema de folgas.

Figura 22 – Espectro e forma de onda característicos de folgas



Fonte: EMERSON (2006).

6.5 Roçamentos

Para Rocha (2014, p.47) “O roçamento é o contato eventual entre as partes rotativas e estacionárias de uma máquina podendo provocar vibrações na frequência de rotação, em seu dobro, em seus sub harmônicos e até em altas frequências.” De acordo com Emerson (2006, p.109) “Roçamentos podem ser causados por falta de lubrificação, empenamento de eixo, erros de montagem, deformação da carcaça, desnivelamento dos pedestais por recalque ou danos na fundação e/ou base da máquina.”

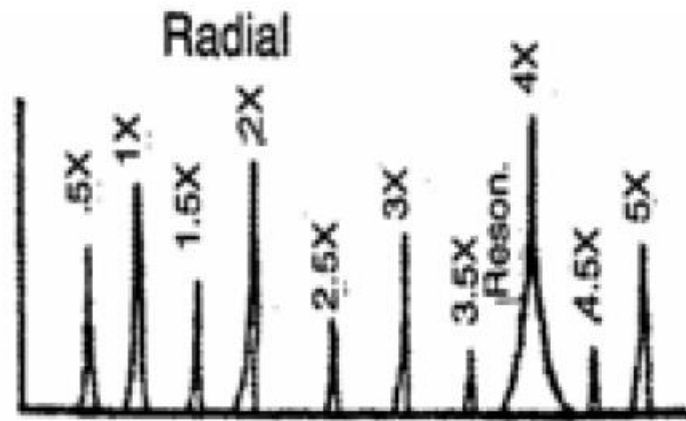
Emerson (2006, p.109) ainda destaca os principais sintomas de roçamentos:

- a) apresentam sintomas semelhantes a folgas, isto é, vibrações radiais elevadas nas frequências de 3 a 10N e, eventualmente, sub e inter-harmônicos;
- b) as vibrações têm normalmente uma direção predominante;

- c) quando o roçamento é mais intenso (raspagem) ocorrem também vibrações aleatórias com um espectro distribuído, em uma faixa de frequência relativamente baixa;
- d) má lubrificação de mancais geralmente acarreta vibrações aleatórias com espectro ao redor de 200 Hz.

A Figura 23 ilustra o espectro característico do problema de roçamento.

Figura 23 – Espectro característico de roçamento



Fonte: ROCHA (2014).

6.6 Defeitos em mancais de rolamento

De acordo com Emerson (2006, p.110), as causas para falhas em mancais de rolamento são “Seleção incorreta, sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, ‘jambragem’, estocagem inadequada, lubrificação inadequada, montagem incorreta, falha de vedação.”

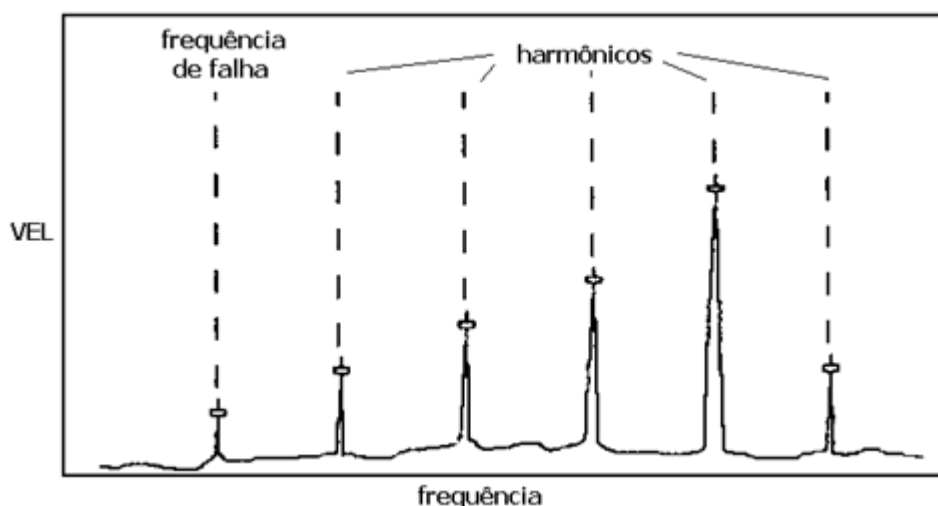
Emerson (2006, p.110) ainda destaca os principais sintomas deste tipo de falha:

- a) deve-se examinar cuidadosamente o espectro de frequência das vibrações radiais e axiais, procurando-se identificar picos harmonicamente relacionados, de frequências não síncronas com a de rotação;
- b) as frequências básicas geradas por defeitos em mancais de rolamento são a frequência de passagem da gaiola (FTF), de rotação das esferas (BSF), e de falha nas pistas externa (BPFO) e interna (BPFI). Uma ou mais destas frequências fundamentais, com seus harmônicos e bandas laterais, podem aparecer no espectro;

- c) geralmente os harmônicos de ordem 4 a 6 são os mais elevados no espectro de velocidade, quando o defeito está no estágio intermediário. Quando o defeito progride as amplitudes das harmônicas de menor ordem aumentam. Geralmente, se as frequências fundamentais são predominantes o defeito é severo e a vida remanescente é bastante curta;
- d) o espectro de aceleração apresenta predominância de harmônicos de ordem ainda mais elevada e de frequências naturais dos componentes do rolamento, na faixa de 1.000 a 20.000 Hz, que podem ser mais facilmente detectados por filtragem e medição do valor de pico (HFD) ou por demodulação do sinal (envelope). Geralmente, esses métodos fornecem detecção bastante antecipada dos defeitos.

A Figura 24 apresenta um espectro de velocidade com a frequência de falha e os seus harmônicos, um dos exemplos característicos do problema em mancais de rolamento.

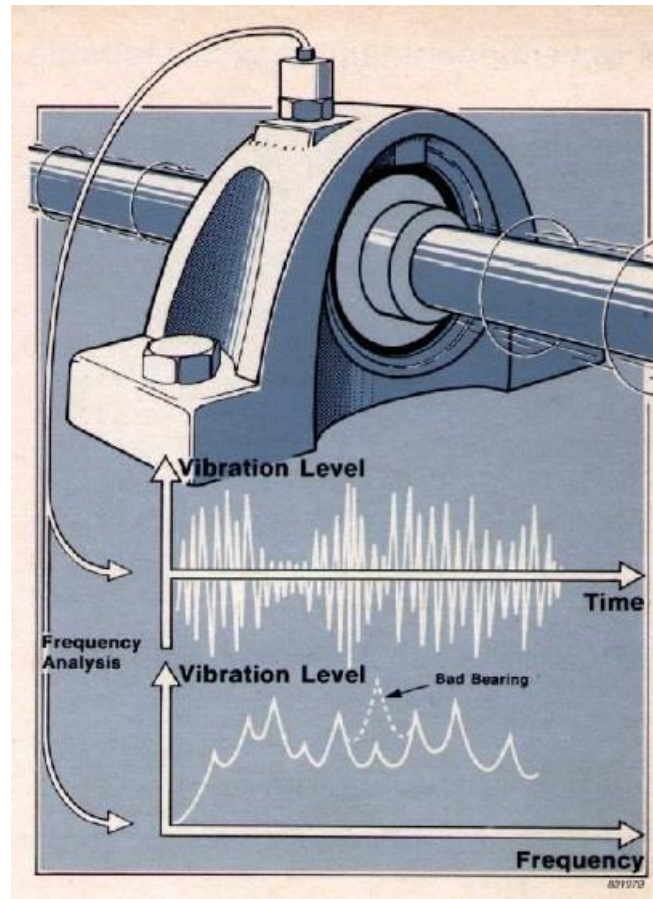
Figura 24 – Exemplo de espectro de velocidade característico de falhas em mancais de rolamento



Fonte: EMERSON (2006).

Salomão (2013, p.31) salienta que “Qualquer defeito em desenvolvimento altera a assinatura da máquina [...] e justamente por isso, a medição de vibração é uma excelente ferramenta para a manutenção preditiva e conseqüentemente, gestão de ativo.”

Figura 25 – Defeito alterando a assinatura de vibração do equipamento



Fonte: SALOMÃO (2013).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Levantamento de fundamentação teórica dos autores, empresas e fabricantes relacionados ao tema, para que seja possível construir os pilares deste trabalho e que o mesmo possua embasamento científico.

Entre os diversos trabalhos realizados ao longo do estágio em indústrias da região Sul do Brasil, notou-se uma limitação quanto à divulgação dos dados dessas empresas, o chamado sigilo industrial, mais conhecido por segredo de fábrica. O autor do presente trabalho já esperava uma certa “resistência” por parte de algumas indústrias, porém o grau do sigilo industrial foi maior que o esperado, limitando o número de estudos de caso. Felizmente, uma das indústrias permitiu trazer para dentro deste estudo um dos trabalhos realizados, que envolveu um relatório de análise de vibração, além do estudo de caso do rolamento deteriorado. A indústria em questão permitiu a divulgação dos dados e de fotos dos equipamentos, exigindo apenas o sigilo de seu nome.

Para a realização do estudo de caso, houve o deslocamento até a indústria e, com os devidos equipamentos como o coletor de vibração e os acelerômetros, ocorreu a coleta dos dados necessários para que posteriormente fosse possível avaliar as condições do equipamento, dando origem ao relatório e ao estudo de caso.

Os seguintes equipamentos foram utilizados para realizar a coleta:

- a) Analisador de vibração PRUFTECHNIK VIBXPERT II nº. série 32017;
- b) Acelerômetro RPM-SR110: acelerômetro industrial com saída axial, 100mV/g dinâmica de 80g, temperatura de trabalho de -40 a 130°C, faixa de aplicação de 0,6Hz a 15kHz com diversas configurações de interface, conector 2 pinos militar, cabo integrado de silicone, poliuretano, inox trançado com teflon e teflon com armadura gramianto inox.

O seguinte software foi utilizado para analisar os dados coletados:

- a) OMNITREND-PRUFTECHNIK;

As Figuras 26 e 27 apresentam o modelo do analisador de vibração e do acelerômetro utilizados para as coletas, respectivamente.

Figura 26 - Analisador de vibração PRUFTECHNIK VIBXPERT II



Fonte: PRUFTECHNIK (2017).

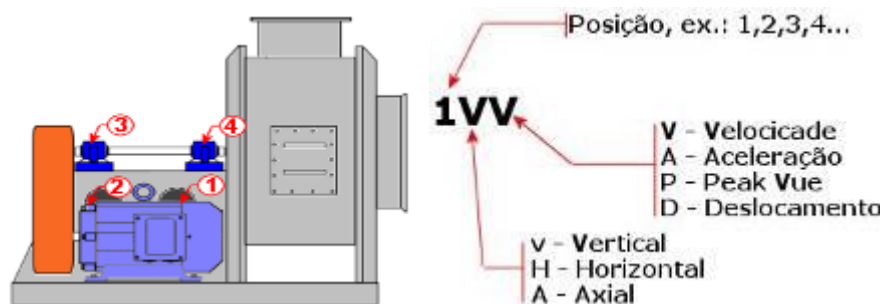
Figura 27 - Acelerômetro RPM-SR110



Fonte: RPM SUL (2018).

O procedimento de medição consiste em realizar as medições nas direções vertical, horizontal e axial. Em equipamentos com vários mancais é determinada a sequência de medição seguindo do equipamento acionador até o acionado, ou seja, seguindo o sentido de força (do mancal traseiro do motor até a parte traseira do equipamento acionado), como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Procedimento de medição



Fonte: RPM SUL (2016).

As seguintes abreviaturas são utilizadas:

- a) LA = Lado Acionado (usado para rolos) ou Lado Acoplado (usado em motores, redutores, bombas, etc.);
- b) LOA = Lado Oposto ao Acionamento ou Lado Oposto ao Acoplamento;
- c) LC = Lado de Comando;
- d) LP = Lado Polia;
- e) LOP = Lado Oposto Polia.

Quanto a classificação, para a realização das análises é utilizado o critério de cores, estes são divididos em quatro classes, de acordo com os níveis de vibração, e características encontradas:

- a) **bom**: o estado operacional é bom (nenhuma falha, níveis baixos de vibração);
- b) **aceitável**: o estado operacional é aceitável para um longo período de funcionamento;
- c) **atenção**: o estado operacional não é aceitável para um longo período de funcionamento;
- d) **crítico**: os níveis de vibração podem causar uma quebra inesperada;
- e) **não monitorado**: equipamento não monitorado.

O Quadro 2 apresenta o critério para julgamento do estado de máquinas, segundo a norma regulamentadora ISO 10816-3:2009.

Quadro 2 – Norma regulamentadora ISO 10816-3:2009

CRITÉRIO PARA JULGAMENTO DO ESTADO DE MÁQUINAS				
Nível de Vibração (mm/s)	até 20CV	de 20CV até 100CV	>100CV Base Rígida	>100CV Base Flexível
	0,28	Bom	Bom	Bom
0,45				
0,71				
1,12	Aceitável	Aceitável	Bom	Bom
1,8				
2,8	Atenção	Aceitável	Aceitável	Bom
4,5				
7,1	Crítico	Crítico	Atenção	Aceitável
11,2			Atenção	Aceitável
18			Atenção	Aceitável
28			Atenção	Aceitável
45			Atenção	Aceitável
			Crítico	Crítico

Fonte: RPM SUL (2016).

O equipamento analisado foi um conjunto de acionamento do tipo motor e redutor.

O motor possui as seguintes características:

- a) modelo: MGI 500B;
- b) RPM: 892 rpm a 1830 rpm
- c) rolamento LOA: 6322
- d) rolamento LA: NU 322
- e) potência: 951kW.

O redutor possui as seguintes características:

- a) pinhão do eixo de entrada: 21 dentes;
- b) coroa do eixo intermediário: 79 dentes;
- c) pinhão do eixo intermediário: 25 dentes;
- d) coroa do eixo de saída: 82 dentes;
- e) rolamento do eixo de entrada: 23138 CC W33;
- f) rolamento do eixo intermediário: 23144 CC W33;

g) rolamento do eixo de saída, lado de entrada: 23068 CC W33;

h) rolamento do eixo de saída, lado do mandril: 23084 CC W33;

Abaixo, realizaram-se os cálculos de rotações e frequências, dando origem ao Quadro 3.

$$Z1 \times N1 = Z2 \times N2 = \text{Frequência de engrenamento 1}$$

$$21 \text{ dentes} \times 18,10 \text{ Hz} = 380,10 \text{ Hz}$$

$$N2 = 380,10\text{Hz} / 79 \text{ dentes} = 4,81 \text{ Hz}$$

$$Z3 \times N2 = Z4 \times N3 = \text{Frequência de engrenamento 2}$$

$$25 \text{ dentes} \times 4,81 \text{ Hz} = 120,28 \text{ Hz}$$

$$N3 = 120,28\text{Hz} / 82 \text{ dentes} = 1,467 \text{ Hz}$$

O Quadro 3 apresenta os cálculos de rotações e frequências.

Quadro 3 – Cálculos de rotações e frequências

(RPM) Entrada	1086
(Hz) Entrada	18,10
(RPM) Intermediário	288,68
(Hz) Intermediário	4,81
(RPM) Saída	88,01
(Hz) Saída	1,467
Frequência (Hz) Engrenamento 1	380,10
Frequência (Hz) Engrenamento 2	120,28

Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Quanto à parametrização, foram realizadas coletas de vibração nos pontos conforme descrição abaixo:

- a) 1 – Vertical Mancal Motor LOA (traseiro)
- b) 2 – Horizontal Mancal Motor LOA (traseiro)
- c) 3 – Horizontal Mancal Motor LA (dianteiro)
- d) 4 – Axial Mancal Motor LA (dianteiro)
- e) 5 – Vertical Mancal LA Entrada Redutor
- f) 6 – Horizontal Mancal LA Entrada Redutor
- g) 7 – Axial Mancal LA Eixo Entrada Redutor
- h) 8 – Vertical Mancal Lado Motor Eixo Saída Redutor

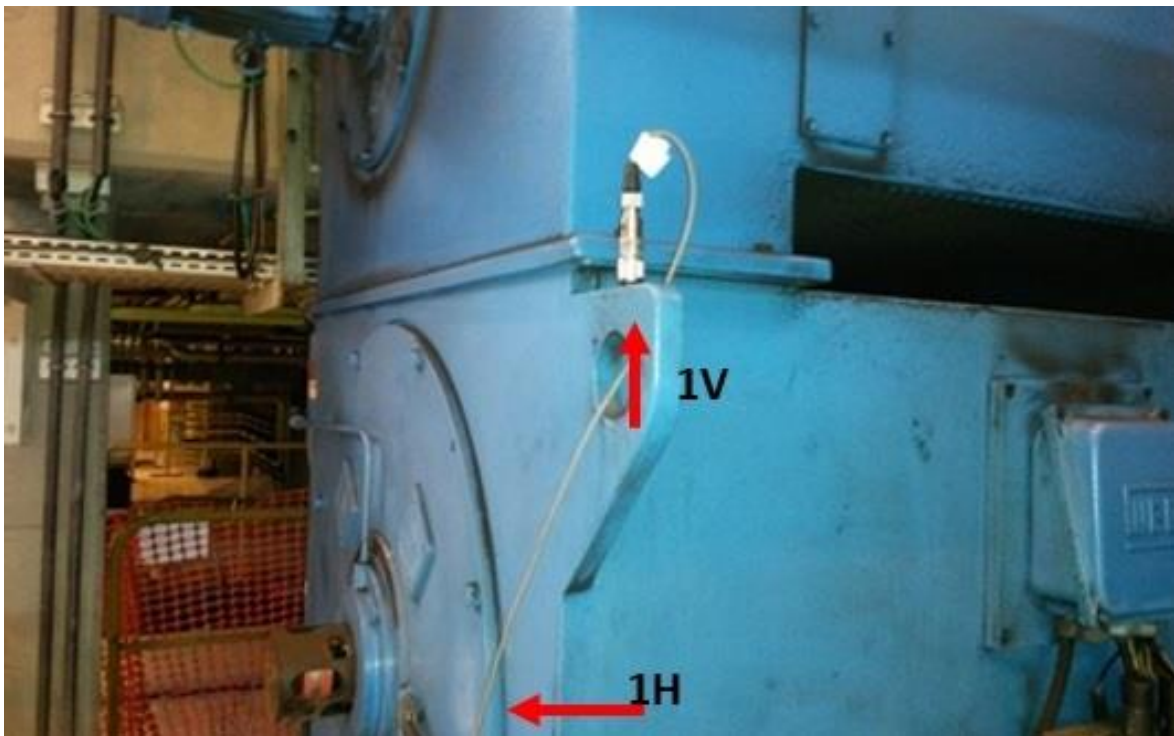
- i) 9 – Horizontal Mancal Lado Motor Eixo Saída Redutor
- j) 10 – Axial Mancal Lado Motor Eixo Saída Redutor
- k) 11 – Horizontal Mancal Lado Mandril Eixo Saída Redutor

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já abordado na fundamentação teórica do presente trabalho, dentre todas as variáveis que podem ser monitoradas de forma não intrusiva na indústria, atualmente a que contém o maior volume de informações é a assinatura de vibração. Com o monitoramento preditivo através dessa ferramenta, podem-se identificar problemas como: desbalanceamentos; desalinhamentos; empenamento de eixos; folgas; excentricidades; roçamentos; defeitos em mancais de rolamento, entre outros.

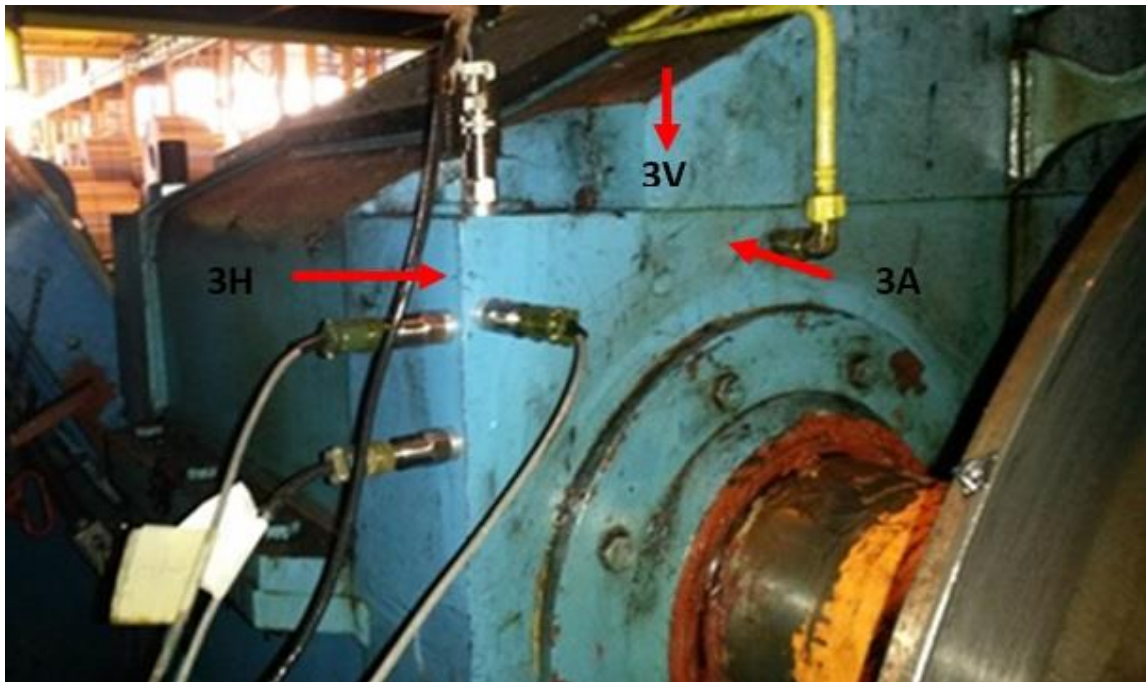
As Figuras 29, 30 e 31 apresentam os pontos de coleta de vibração no redutor.

Figura 29 – Pontos de coleta 1V e 1H



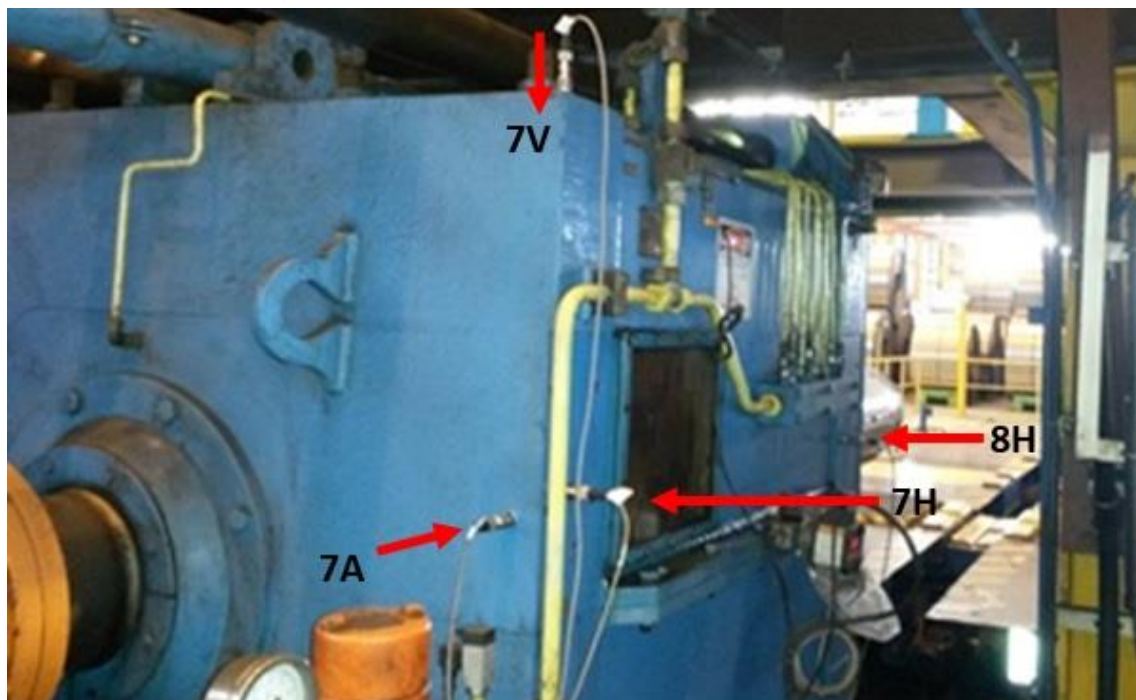
Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 30 – Pontos de coleta 3V, 3H e 3A



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 31 – Pontos de coleta 7V, 7H, 7A e 8H



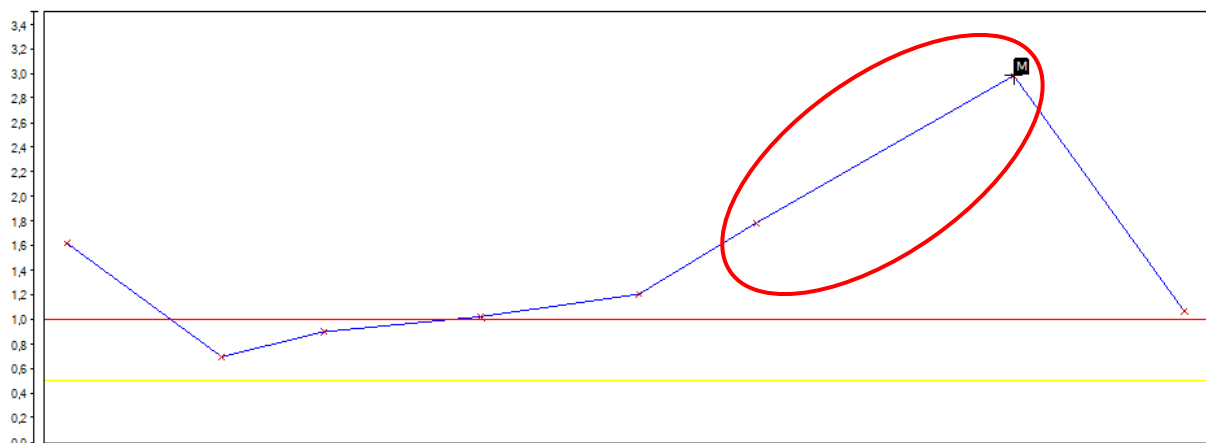
Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Após realizar as coletas de vibração, e com os dados descarregados no software de análise OMNITREND-PRUFTECHNIK, é possível iniciar o diagnóstico do equipamento.

O rolamento operava 24 horas diárias, e segundo a fabricante chinesa DWR, possuía uma vida útil de 40.000 horas, ou cerca de 4 anos e 7 meses. O plano preventivo da empresa era de substituição do rolamento a cada 4 anos ou em torno de 35.000 horas. É importante destacar que a cada 2 anos, ou aproximadamente 17.500 horas, a equipe de manutenção da empresa realizava uma inspeção visual no rolamento. Após a realização da análise, com aproximadamente 26.300 horas de operação, ou cerca de 3 anos, recomendou-se a substituição do rolamento.

Iniciando a análise, conforme a tendência apresentada na Figura 32, houve evolução dos níveis de aceleração e envelope do mancal de entrada do redutor, indicando características de desgaste do rolamento.

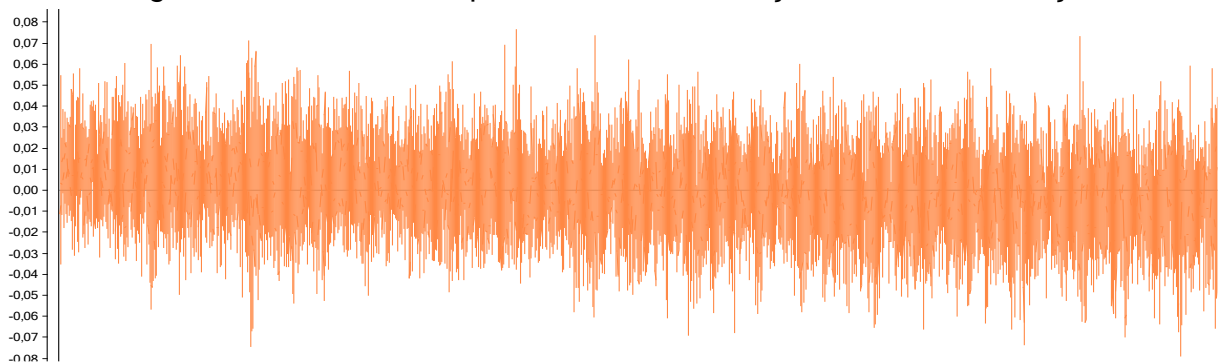
Figura 32 – Tendência indicando características de desgaste do rolamento



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

O sinal no tempo, em laranja, do ponto 3H (entrada do redutor) mostra a medição anterior a evolução, mostrando ainda baixa amplitude e ausência de evidências de picos com repetição de intervalo.

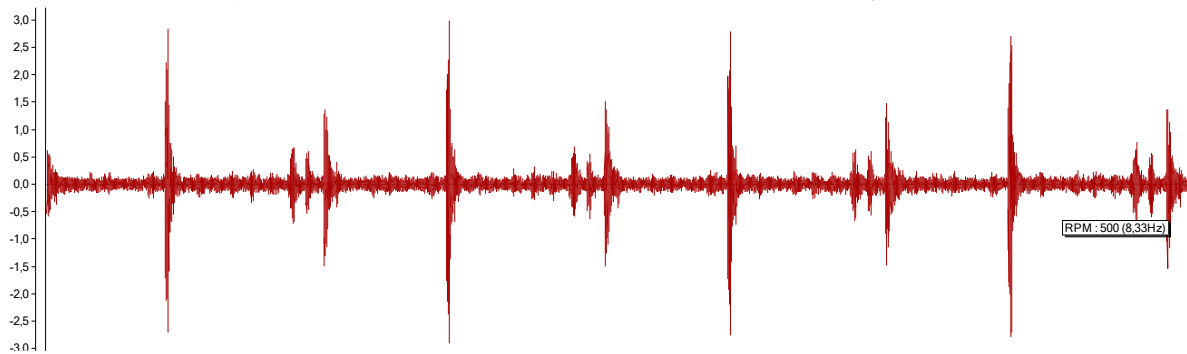
Figura 33 – Sinal no tempo mostrando a medição anterior a evolução



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

O sinal no tempo em vermelho do ponto 3H mostra picos definidos com mesmo intervalo de impacto, indicando a presença de falha.

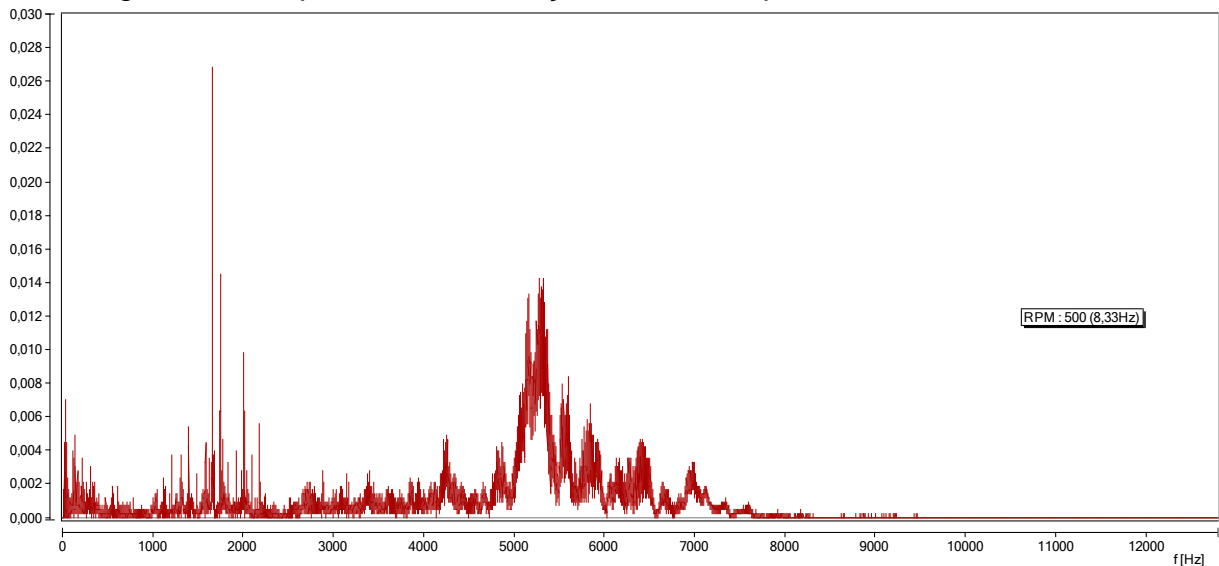
Figura 34 – Sinal no tempo indicando a presença de falha



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

O espectro de aceleração do ponto 3H, na Figura 35, indica quebra do filme lubrificante devido à região de “carpete” na faixa de 4000 a 7000 Hz e indica desgaste no rolamento devido à presença de picos definidos e intervalo periódico na faixa de 1000 a 2500 Hz.

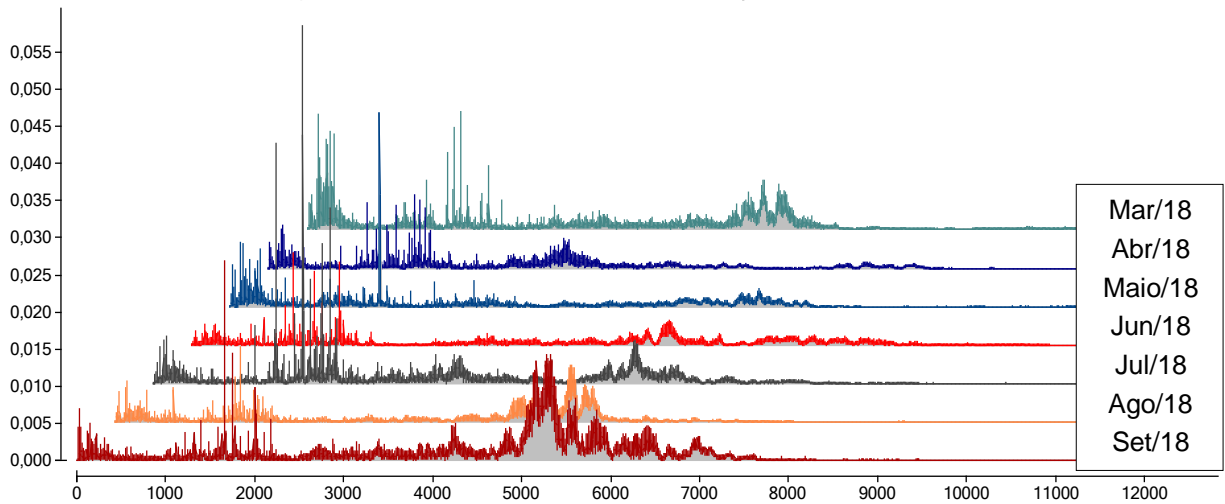
Figura 35 – Espectro de aceleração indicando quebra do filme lubrificante



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

A Figura 36 mostra os espectros de aceleração do ponto 3H em cascata, exibindo a evolução dos níveis no decorrer do tempo. Os espectros apresentados são das últimas coletas realizadas, com intervalos de 1 mês entre cada coleta, ou seja, cadência mensal de coleta.

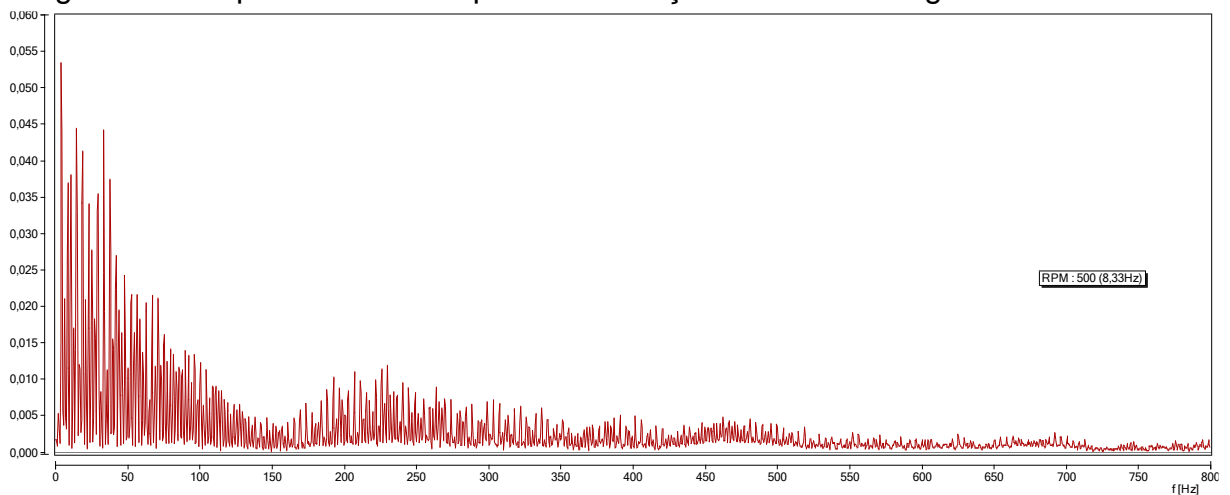
Figura 36 – Espectros de aceleração em cascata



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

O espectro de envelope da aceleração do ponto 3H, na Figura 37, indica desgaste no rolamento devido à presença de picos definidos e intervalo periódico.

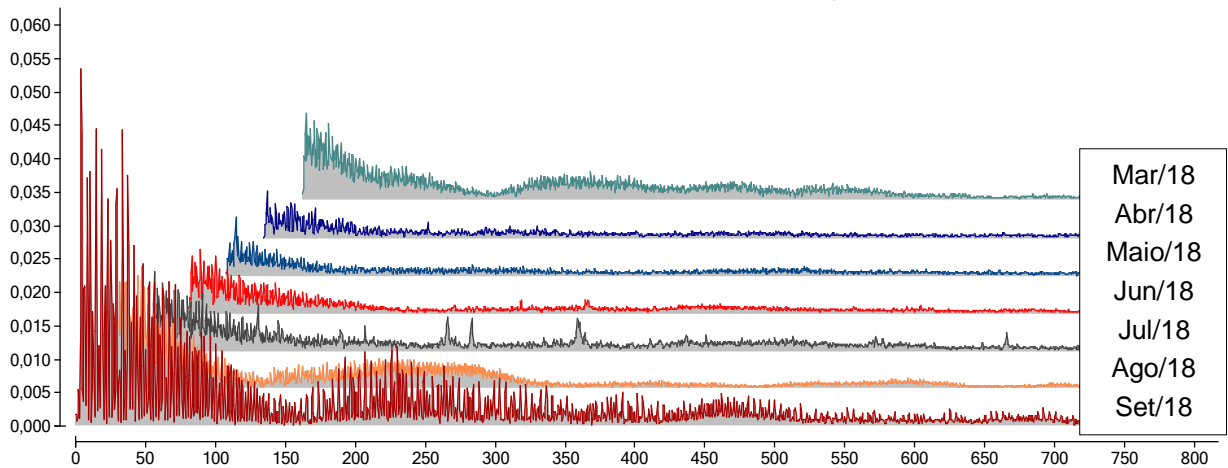
Figura 37 – Espectro de envelope da aceleração indicando desgaste no rolamento



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

A Figura 38 mostra os espectros de envelope da aceleração do ponto 3H em cascata, apresentando a evolução dos níveis no decorrer do tempo, novamente com cadência mensal de coleta.

Figura 38 – Espectros de envelope da aceleração em cascata

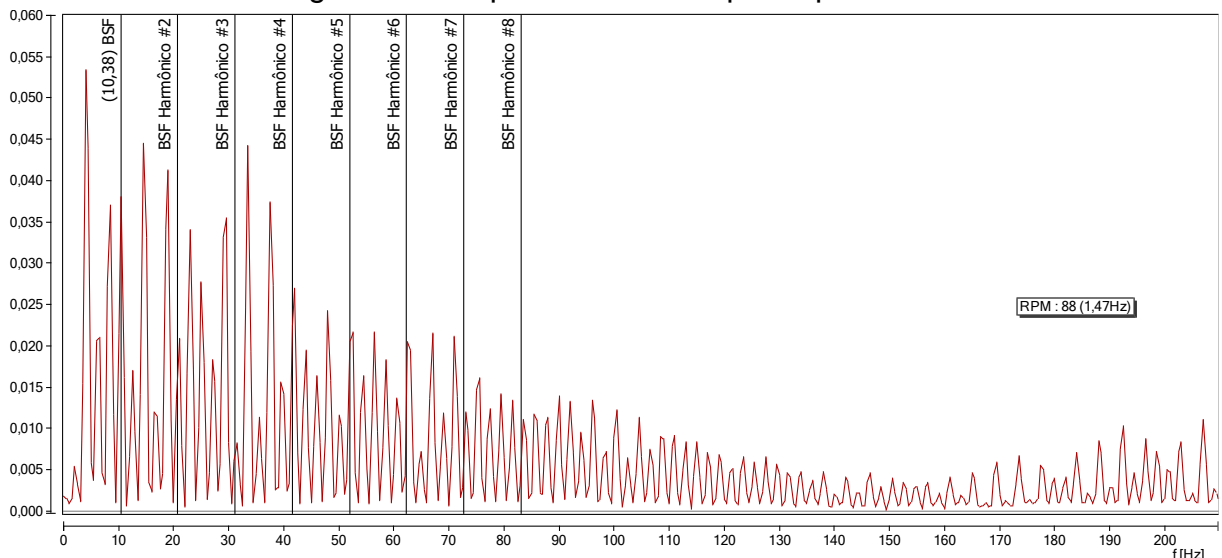


Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Como as frequências de falha dos componentes do rolamento são conhecidas, é possível cadastrá-las no software de análise OMNITREND-PRUFTECHNIK e sobrepor estes marcadores de frequência sobre o espectro de envelope da aceleração.

No espectro de envelope do ponto 3H, na Figura 39, é possível verificar a existência de desgaste de elemento girante (BSF) e de pista interna (BPFI). Devido à amplitude, pode-se afirmar que já há desgaste severo em algum dos componentes.

Figura 39 – Espectro de envelope do ponto 3H

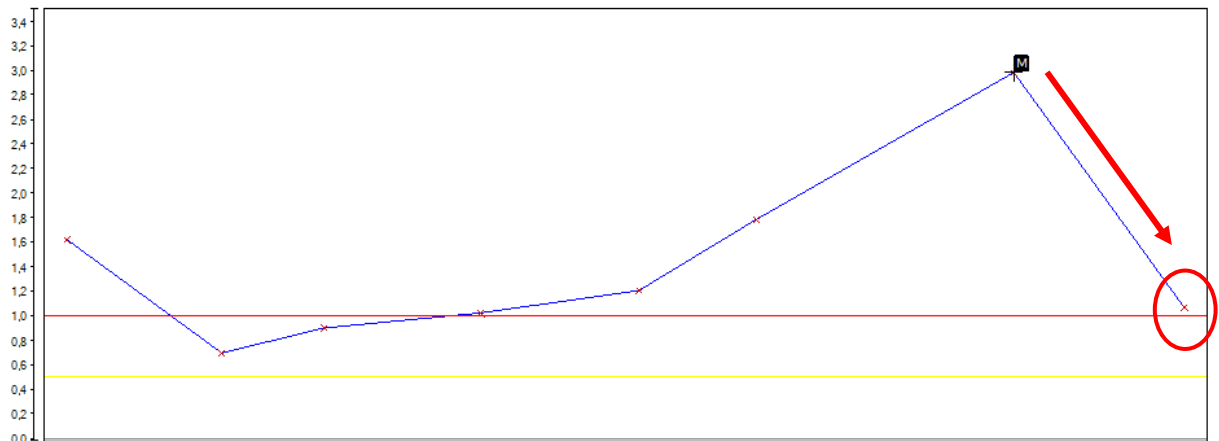


Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Portanto, devido ao elevado nível de vibração e a evolução da tendência, somado as características de falha dos componentes do rolamento, com aproximadamente 26.300 horas de operação, ou cerca de 3 anos, recomendou-se a substituição do mesmo.

Após a substituição do rolamento, os níveis de vibração voltaram ao seu patamar de trabalho “normal”, conforme a tendência abaixo.

Figura 40 – Tendência indicando a redução dos níveis de vibração



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Posteriormente, a análise da falha revelou que o rolamento possuía um estado de degradação bastante elevado. Pode-se afirmar que o emprego da análise de vibração evitou que o rolamento continuasse o processo avançado de deterioração e futuramente a ocorrência de uma possível quebra, uma vez que o rolamento continuaria em funcionamento por pelo menos mais 1 ano, cerca de 8.760 horas, pelo plano preventivo de substituição.

A análise de falha do rolamento substituído é apresentada em seguida. Para esta análise foi utilizado o catálogo “NSK Bearing Doctor”, de diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos.

O rolamento estudado é um axial de rolos cônicos, da fabricante chinesa DWR. A Figura 41 apresenta um rolamento montado semelhante ao estudado, porém da fabricante japonesa NSK.

Figura 41 - Exemplo de um rolamento axial de rolos cônicos



Fonte: NSK (2018).

Os desgastes e as falhas encontrados no rolamento são apresentados a partir da Figura 42.

Figura 42 - Características de pitting de acordo com NSK Bearing Doctor

7.9 Pitting

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
A superfície dos elementos rolantes ou a pista de rolagem apresenta uma coloração fosca.	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminação por impurezas. • Rolamento ou lubrificante expostos ao meio-ambiente. • Falhas na lubrificação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorar o sistema de vedação. • Filtrar o óleo lubrificante. • Utilizar o lubrificante correto.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.24).

Figura 43 - Forma com que o pitting apresenta-se



Foto 7-9-1

Componente: Anel externo de rolamento axial.

Sintoma: Pitting na superfície da pista.

Causa: Oxidação.



Foto 7-9-2

Componente: Esfera da foto 7-9-1.

Sintoma: Pitting na superfície dos elementos rolantes.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.24).

O rolamento apresenta desgaste na pista interna e nos elementos rolantes com a ocorrência de pitting. Além das ocorrências apontadas pelo NSK Bearing Doctor, o rolamento também apresenta micro pontos de desgaste, conforme as Figuras 44 e 45 mostram.

Figura 44 - Ocorrência de pitting na pista interna



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 45 - Ocorrência de pitting nos elementos rolantes



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 46 - Características de descascamento de acordo com NSK Bearing Doctor
7.2 Descascamento (peeling)

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
Pequenos pontos aparecem na superfície das pistas e elementos rolantes. Com o desprendimento do material, surgirá posteriormente, o escamamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Lubrificante inadequado. • Contaminação por partículas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecionar lubrificante apropriado. • Melhorar os mecanismos de vedação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.13).

Figura 47 - Forma com que o descascamento apresenta-se



Foto 7-2-3

Componente: Rolamento autocompensador de rolos da foto 7-2-1.

Sintoma: O descascamento ocorreu no centro da superfície de rolamento de rolos.

Causa: Lubrificação deficiente.



Foto 7-2-4

Componente: Anel externo de rolamento autocompensador de rolos.

Sintoma: O descascamento ocorreu próximo à borda.

Causa: Lubrificação deficiente.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.13).

O rolamento apresenta desgaste na pista interna e nos elementos rolantes com a ocorrência de descascamento, conforme as Figuras 48 e 49 apresentam.

Figura 48 - Ocorrência de descascamento na pista interna



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 49 - Ocorrência de descascamento nos elementos rolantes



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 50 - Características de escamamento de acordo com NSK Bearing Doctor
7.1 Escamamento

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
Quando um rolamento gira com carga, ocorre a saída de material pela fadiga do aço nas superfícies dos elementos rolantes ou as superfícies das pistas dos anéis interno e externo.	<ul style="list-style-type: none"> • Carga excessiva. • Falha de instalação (desalinhamento). • Carga de momento. • Contaminação por partículas, ou por água. • Lubrificação deficiente, lubrificante inadequado. • Folga não apropriada. • Deficiência na precisão do eixo e do alojamento. • Consequência da oxidação em paradas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reconfirmar a especificação do rolamento e checar as condições de carga. • Melhorar o sistema de instalação. • Melhorar o método de vedação, prevenir a oxidação durante as paradas. • Utilizar lubrificantes com viscosidade adequada, melhorar o método de lubrificação. • Checar a precisão do eixo e alojamento. • Checar a folga interna do rolamento.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.11).

Figura 51 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel interno de rolamento de contato angular



Foto 7-1-1

Componente: Anel interno de rolamento de contato angular.

Sintoma: Escamamento em metade da circunferência da pista.

Causa: Lubrificação deficiente gerada pela entrada de fluido de corte no interior do rolamento.



Foto 7-1-2

Componente: Anel interno de rolamento de contato angular.

Sintoma: Escamamento ao longo da pista.

Causa: Desalinhamento na instalação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.11).

Figura 52 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel interno de rolamento fixo de uma carreira de esferas



Foto 7-1-3

Componente: Anel interno de rolamento fixo de uma carreira de esferas.

Sintoma: Escamamento na pista no intervalo das esferas.

Causa: Impactos na instalação.



Foto 7-1-4

Componente: Anel interno de rolamento de contato angular.

Sintoma: Escamamento na pista nos intervalos das esferas.

Causa: Impactos na instalação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.11).

Figura 53 - Forma com que o escamamento apresenta-se no anel externo e esferas



Foto 7-1-5

Componente: Anel externo da foto 7-1-4.

Sintoma: Escamamento na pista nos intervalos das esferas.

Causa: Impactos na instalação.



Foto 7-1-6

Componente: Esferas da foto 7-1-4.

Sintoma: Escamamento na superfície das esferas.

Causa: Impactos na instalação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.12).

O rolamento apresenta desgaste nos elementos rolantes com a ocorrência de escamamento, conforme a Figura 54 exibe.

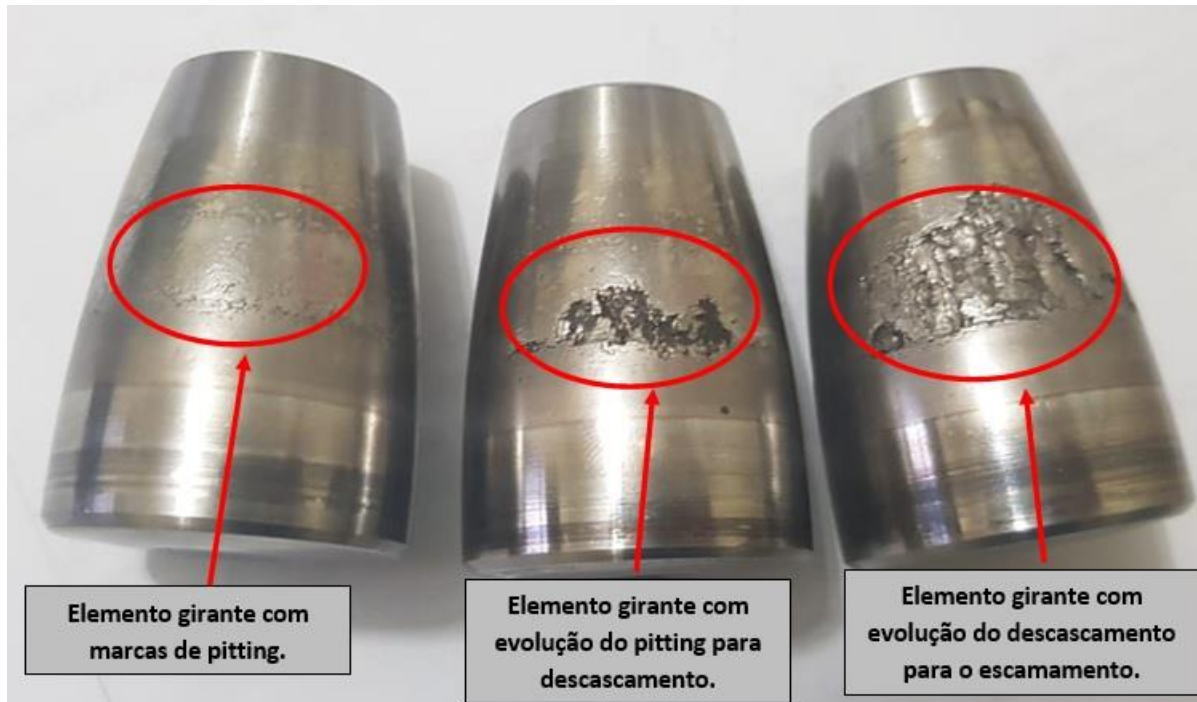
Figura 54 - Ocorrência de escamamento nos elementos rolantes



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

A Figura 55 apresenta três elementos girantes, cada um com um tipo de falha já abordado anteriormente. Vale destacar a evolução das falhas do elemento rolantes mais à esquerda, até o elemento rolante mais à direita.

Figura 55 - Evolução das falhas nos elementos girantes



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

Figura 56 - Características de fraturas de acordo com NSK Bearing Doctor

7.5 Fraturas

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
<ul style="list-style-type: none"> Anel interno ou anel externo partidos. Corpos rolantes partidos; Rebordo lascado. Gaiola avariada. 	<ul style="list-style-type: none"> Excessiva carga de choque; excessiva interferência; deficiência na forma do eixo; deficiência na conicidade da bucha; raio de encosto muito grande; desenvolvimento da trinca de fricção; avanço do escamamento. Avanço do escamamento; batida no rebordo quando da instalação; queda por descuido no manejo. Carga anormal na gaiola em decorrência de deficiência na instalação; deficiência na lubrificação. 	<ul style="list-style-type: none"> Reanalisar as condições de carga; adequar o ajuste; corrigir a precisão de usinagem da bucha e do eixo; corrigir o raio do encosto (fazer menor que o chanfro do rolamento). Cuidados quando da instalação e manejo. Correção da instalação; estudar o lubrificante e o método de lubrificação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.18).

Figura 57 - Forma com que as fraturas apresentam-se



Foto 7-5-1

Componente: Anel interno de rolamento de dupla carreira de rolos cilíndricos.

Sintoma: Lascamento no centro do rebordo.

Causa: Carga excessiva durante a instalação.

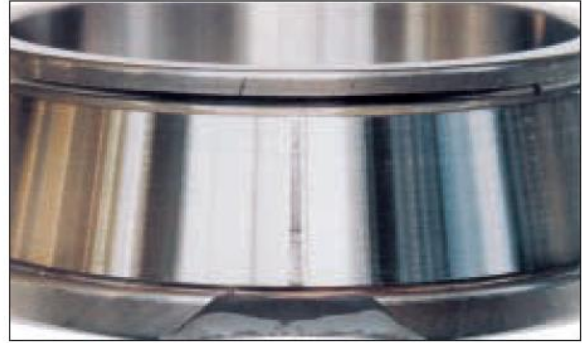


Foto 7-5-2

Componente: Anel interno de rolamento de rolos cônicos.

Sintoma: Fratura no rebordo.

Causa: Carga de choque durante a instalação.

Fonte: NSK Bearing Doctor (p.18).

Figura 58 - Ocorrência de fratura no rolamento



Fonte: elaborada pelo autor (2018).

De acordo com as imagens do rolamento pode-se observar desgastes por pitting, descascamento, escamamento e fratura. Para os três primeiros tem-se como causa comum a deficiência na lubrificação. Tanto o escamamento como a fratura, indicam falha na instalação do rolamento, relacionados a impactos no momento da instalação.

As seguintes ações foram recomendadas:

- a) verificar o plano de lubrificação do redutor;

- b) realizar análise de óleo sistematicamente;
- c) garantir a vedação do redutor, para evitar contaminantes;
- d) criar procedimento para substituição dos rolamentos;
- e) capacitar equipe de manutenção mecânica.

8.1 Importância da manutenção preditiva em rolamentos

Após a leitura de todos os pontos, brevemente abordados no presente trabalho, é visível a grande importância do emprego das técnicas de manutenção preditiva, em especial a análise de vibração. A aplicação desta técnica em rolamentos identifica defeitos ocultos e, caso o mesmo esteja em fase inicial, é possível realizar a intervenção necessária, prolongando a vida útil do rolamento e de outros equipamentos que funcionam em conjunto com ele.

9 CONCLUSÃO

As indústrias estão passando por um cenário com uma competitividade em constante crescimento, e assim, procura-se cada vez mais a redução dos custos de forma geral. A manutenção dos sistemas e equipamentos é uma das primeiras áreas em que os esforços devem ser concentrados. Esta preocupação em manter os equipamentos funcionando dentro dos parâmetros recomendados traz inúmeros benefícios tanto para os próprios equipamentos, quanto para a produção e para a equipe de manutenção.

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou, dentre as diferentes abordagens de manutenção, destacar a manutenção preditiva. Essa abordagem consiste no acompanhamento periódico das condições reais de operação dos componentes, trazendo inúmeros benefícios, como por exemplo, evitando as quedas de eficiência, as substituições de peças sem necessidade e principalmente eliminando as quebras, além de buscar estender a vida útil dos elementos de uma máquina ou sistema.

Os rolamentos, fortemente presentes nos mais variados segmentos industriais, são os elementos responsáveis por minimizar a fricção entre as peças móveis da máquina e suportar a carga. Como consequência de sua importância, é necessário aplicar, dentre outras, a técnica de análise de vibração, responsável por detectar defeitos ocultos potencialmente presentes nos rolamentos.

Como já mencionado anteriormente, a análise de vibração do rolamento apresentado no presente trabalho foi efetuada ao longo do estágio no segundo semestre de 2018, e apresentada na estrutura de relatório e estudo de caso neste trabalho.

Como sugestões para trabalhos futuros, seria importante conseguir um suporte maior das indústrias para que novos estudos de caso, bem como um número maior dos mesmos, possam ser realizados. Além disso, a diversidade de estudos de caso poderia trazer uma variedade maior de modelos de rolamentos, com o objetivo de aplicar a fundamentação teórica através de aplicações práticas do tema, buscando um número maior de resultados efetivos.

REFERÊNCIAS

- BANDEIRA, G.; ABREU, G.; GIANELLI, R. **Vibração e ruído em manutenção preditiva**. UNESP, 2010. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_12.pdf>. Acesso em: 02 nov 2018.
- CONCEIÇÃO, Maurício Costa da. **Metodologia de análise de falha aplicada à confiabilidade operacional de uma moagem de cimento**. UFS, 2012. Disponível em: <https://nmc.webnode.com.br/_files/200000101-8cb8f8d0e9/TCC_Maur%C3%ADcio%20Costa%20da%20Concei%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 02 nov 2018.
- DGB. **Tipos de Rolamentos e suas funcionalidades**. Disponível em: <<http://www.dgbrrolamentos.com.br/tipos-de-rolamentos-e-suas-funcionalidades/>>. Acesso em: 28 jun 2018.
- EMERSON, Process Management. **Análise de Vibrações Nível I**. Apostila do Curso de Análise de Vibrações da CSI means Reliability. 2006.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. Curitiba: Positivo, 2010.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- ISO 10816-3:2009. **Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts**. 2009. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/50528.html>>. Acesso em: 02 nov 2018.
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.
- MOBIUS, Institute. **Treinamento de Vibração Nível I**. Apostila do Curso de Análise de Vibrações Category I. 2017.
- NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva**. Volume 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.
- NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva**. Volume 2. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.
- NSK Bearing Doctor. **Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos**. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/upload/file/B08.pdf>>. Acesso em: 02 nov 2018.
- NSK. **O que é um rolamento**. Disponível em: <<http://www.nsk.com.br/o-que-e-um-rolamento-152.htm>>. Acesso em: 26 maio 2018.

NSK. **Rolamentos**. Disponível em:
<[http://nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](http://nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf)>. Acesso em: 26 maio 2018.

PRUFTECHNIK. **JUMP in the VIBXPERT world**. Disponível em:
<<https://www.pruftechnik.com/landing-pages/feature-aktion-cm/jumpin-the-vibxpert-world.html>>. Acesso em: 02 nov 2018.

PRUFTECHNIK. **VIBXPERT II**. Disponível em:
<<https://www.pruftechnik.com/br/produtos/sistemas-condition-monitoring/equipamentos-de-medicao-portateis-para-condition-monitoring/vibxpert-ii.html>>. Acesso em 28 maio 2018.

ROCHA, Diego Lilargem. **Análise de Vibrações em Equipamentos Rotativos de uma Indústria Alimentícia**. IFF, 2014. Disponível em:
<<http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/1530/4/Documento.pdf>>. Acesso em: 02 nov 2018.

RODRIGUES, Marcelo. **Curso técnico em eletrotécnica, módulo 3, livro 17: gestão da manutenção**. Curitiba: Base Livros Didáticos, 2009.

SALOMÃO FILHO, Luis Felipe. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Gestão de Ativos**. UFRJ, 2013. Disponível em:
<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005471.pdf>>. Acesso em: 02 nov 2018.

SANTOS, Valdir Aparecido dos. **Manual prático da manutenção industrial**. São Paulo: Ícone, 2007.

SEQUEIRA, Cláudia. **Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerômetros**. Disponível em:
<<http://revistamanutencao.pt/PDF/116/M116AT1.pdf>>. Acesso em: 02 nov 2018.

SILVA, Derick Henrique de Jesus. **Processamento de Sinais para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas**. UFMG, 2013. Disponível em:
<<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1001M.PDF>>. Acesso em: 02 nov 2018.

WEBER, Abilio José; *et al.* **Telecurso: profissionalizante de Mecânica: manutenção**. Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho, 2009.