



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON BRUNO GOMES DE LIMA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO DE MOTORES E
BOMBAS**

Recife
2019

ALISSON BRUNO GOMES DE LIMA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO DE MOTORES E
BOMBAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jose Maria Andrade Barbosa

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

L732a Lima, Alisson Bruno Gomes de.
Análise de vibração em mancais de rolamento de motores e bombas
/ Alisson Bruno Gomes de Lima – Recife, 2019.
76 f., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Maria Andrade Barbosa.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Estágio de desgaste do rolamento. 3.
Manutenção preditiva. 4. Análise de vibrações. 5. Mancais de rolamento.
6. Envelope da aceleração. I. Barbosa, José Maria Andrade (Orientador).
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-472

ALISSON BRUNO GOMES DE LIMA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO DE MOTORES E
BOMBAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jose Maria Andrade Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Tiago Lima de Sousa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Adson Beserra da Silva (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Abelardo e Sandra Lima, e a minha tia Maria Cesária, que sempre me apoiaram durante todo o meu processo de formação acadêmica.

À gerência de manutenção mecânica da Compesa pela experiência proporcionada no meu período de estágio, em especial a Tiago Pontual, Ivonildo da Cruz, Jobson Guerra e André Sales pelo grande aprendizado adquirido.

Ao meu orientador José Maria Barbosa e a todos os professores que me ajudaram a chegar até aqui.

E a todos os meus amigos e familiares que contribuíram direta ou indiretamente para que isto fosse possível.

RESUMO

A manutenção preditiva é uma ferramenta poderosa para o monitoramento de máquinas, visando extrair delas uma maior eficiência e maior tempo de vida útil. Para um conjunto motor-bomba, a análise de vibração de seus mancais pode dar informações relativas a problemas de montagem ou desgaste do rolamento, permitindo que ações corretivas possam ser tomadas e evitando paradas inesperadas na produção. Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia a ser utilizada em situações onde muitos mancais sejam monitorados. A metodologia consiste em combinar técnicas de análise de vibração em mancais de rolamento para, em um primeiro momento, utilizar fatores que evidenciem os mancais em situação mais crítica e então fazer uma análise mais aprofundada nestes mancais para retornar o estágio de desgaste do rolamento. Se o estágio de desgaste encontrado for alto, pode-se agir para substituir o rolamento antes que ocorra a sua quebra. Por fim, o trabalho compara os resultados da análise proposta com situações reais de danos em rolamentos, através da análise de falha.

Palavras-chave: Estágio de desgaste do rolamento. Manutenção preditiva. Análise de vibrações. Mancais de rolamento. Envelope da aceleração.

ABSTRACT

Predictive maintenance is a powerful tool for machine monitoring to get a higher efficiency and longer machine life. For a motor-pump assembly, bearing vibration analysis can provide information about bearing wear or mounting problems, allowing corrective actions to be taken and avoiding unexpected production downtime. This paper aims to propose a methodology to be used in situations where many bearings are monitored. The methodology consists of combining vibration analysis techniques of rolling element bearings to initially use factors that show up the most critical bearings and then to further analyze these bearings to return the rolling element bearing wear stage. If the wear stage found is high, an action can be taken to replace the bearing before it breaks. Finally, the results of the proposed analysis are compared with actual bearing damage situations through failure analysis.

Keywords: Bearing wear stage. Predictive maintenance. Vibration analysis. Bearing housings. Acceleration Enveloping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes: rolamentos radiais e rolamentos axiais.....	16
Figura 2 - Tipos de rolamento	17
Figura 3 - Sinal de vibração sendo dividido em várias componentes de diferentes frequências.....	21
Figura 4 - Valor RMS, pico, pico a pico e valor médio.....	23
Figura 5 - Valor RMS, pico, pico a pico e valor médio para um sinal real de máquina.....	24
Figura 6 - Norma ISO 10816-3:2009 para o valor RMS da velocidade de vibração.....	26
Figura 7 - Diâmetro do passo (<i>pitch diameter</i>)	33
Figura 8 - Sinal de vibração causado pelos impactos dos elementos rolantes na falha.....	35
Figura 9 - Espectro de um sinal modulado.....	35
Figura 10 - Procedimento de demodulação para a obtenção do envelope	36
Figura 11 - Esquematização do espectro de vibração para o estágio 1 de desgaste do rolamento.....	38
Figura 12 - Esquematização do espectro de vibração para o estágio 2 de desgaste do rolamento.....	39
Figura 13 - Esquematização do espectro de vibração para o estágio 3 de desgaste do rolamento.....	40
Figura 14 - Esquematização do espectro de vibração para o estágio 4 de desgaste do rolamento.....	41
Figura 15 - SKF Microlog Analyzer Série GX.....	42
Figura 16 - Esquematização dos pontos de medição em um conjunto motor-bomba.....	43
Figura 17 - Pontos de medição no mancal do lado oposto ao acoplamento	43
Figura 18 - Pontos de medição no mancal lado próximo ao acoplamento	44
Figura 19 - Lista dos dados no software SKF @ptitude Analyst	44
Figura 20 - Esquema exemplificando os índices referenciados no SKF @ptitude Analyst	45
Figura 21 - Opções de plotagem de gráfico do SKF @ptitude Analyst	45
Figura 22 - Fluxograma da metodologia.....	46

Figura 23 - Situações onde a análise deve ser feita.....	49
Figura 24 - Classificação dos índices para o rolamento 1	52
Figura 25 - Pista interna do rolamento 1	55
Figura 26 - Pista externa do rolamento 1	56
Figura 27 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 1.....	57
Figura 28 - Classificação dos índices para o rolamento 2.....	59
Figura 29 - Pista interna do rolamento 2	61
Figura 30 - Pista interna do rolamento 2	61
Figura 31 - Pista externa do rolamento 2	62
Figura 32 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 2.....	62
Figura 33 - Classificação dos índices para o rolamento 3.....	64
Figura 34 - Pista interna do rolamento 3	67
Figura 35 - Vista aproximada dos danos mostrados na figura 19	68
Figura 36 - Pista externa do rolamento 3	68
Figura 37 - Vista aproximada dos danos mostrados na figura 21	69
Figura 38 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 3.....	69
Figura 39 - Elemento rolante do rolamento 3	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Sinal da aceleração de vibração em função do tempo	20
Gráfico 2 - Espectro de aceleração do sinal mostrado no gráfico 1	21
Gráfico 3 - Valor RMS da aceleração de vibração	25
Gráfico 4 - Comparação entre o fator de pico e o valor RMS.....	27
Gráfico 5 - Comportamento do fator de crista com a progressão das falhas no rolamento	27
Gráfico 6 - Comportamento do Fator K	28
Gráfico 7 - Espectro indicando desbalanceamento	30
Gráfico 8 - Espectro indicando desalinhamento angular	30
Gráfico 9 - Espectro indicando desalinhamento paralelo	31
Gráfico 10 - Espectro mostrando a presença de folgas mecânicas	31
Gráfico 11 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 1	53
Gráfico 12 - Espectro do envelope de aceleração do rolamento 1	53
Gráfico 13 - Espectro da velocidade de vibração do rolamento 1	54
Gráfico 14 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 2.....	59
Gráfico 15 - Espectro do envelope de aceleração do rolamento 2.....	60
Gráfico 16 - Espectro de velocidade de vibração do rolamento 2	60
Gráfico 17 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 3.....	65
Gráfico 18 - Espectro de envelope de aceleração do rolamento 3 evidenciando a BPFI e suas harmônicas	65
Gráfico 19 - Espectro de envelope de aceleração do rolamento 3 evidenciando a BPFO e suas harmônicas	66
Gráfico 20 - Espectro de velocidade de vibração do rolamento 3	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista das frequências características de falha fornecida por um fabricante de rolamentos	33
Tabela 2 - Relação da norma para o valor RMS e a condição de operação da máquina.....	47
Tabela 3- Gravidade do nível de vibração - técnica de envelope.....	48
Tabela 4 - Estágio de desgaste do rolamento relacionado à possibilidade de falha e ações recomendadas	50
Tabela 5 - Dados referentes ao rolamento 1	51
Tabela 6 - Frequências características de falha para o rolamento 1	51
Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 1	57
Tabela 8 - Dados referentes ao rolamento 2.....	58
Tabela 9 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 2	63
Tabela 10 - Dados referentes ao rolamento 3	63
Tabela 11 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 3	70
Tabela 12 - Comparação de resultados obtidos através da metodologia proposta e da análise de falhas.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ROLAMENTOS	16
2.1.1	Tipos de rolamento	16
2.2	VIBRAÇÃO	19
2.2.1	Sinal de vibração no domínio do tempo.....	20
2.2.2	Espectro de frequência do sinal de vibração	20
2.3	ANÁLISE DA VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO.....	22
2.3.1	Análise da vibração no domínio do tempo	22
2.3.1.1	Quantificação dos níveis de vibração	23
2.3.1.2	Classificação do nível de vibração pelo valor RMS	25
2.3.1.3	Valor de pico (Peak-Value).....	26
2.3.1.4	Fator de Crista (Crest-Factor)	26
2.3.1.5	Fator K.....	28
2.3.2	Análise da vibração no domínio da frequência	29
2.3.2.1	Detecção de problemas através do sinal da velocidade de vibração em função da frequência	29
2.3.2.1.1	<i>Desbalanceamento.....</i>	29
2.3.2.1.2	<i>Desalinhamento angular.....</i>	30
2.3.2.1.3	<i>Desalinhamento paralelo.....</i>	31
2.3.2.1.4	<i>Folga Mecânica</i>	31
2.3.2.2	Frequências características de falha em rolamentos	32
2.3.2.3	Técnica do envelope	34
2.3.3	Análise do desgaste do rolamento através da forma do espectro de vibração	37
2.3.3.1	Estágio de desgaste 1 (baixo risco de falha).....	37
2.3.3.2	Estágio de desgaste 2 (risco de falha moderado)	38
2.3.3.3	Estágio de desgaste 3 (alto risco de falha).....	39
2.3.3.4	Estágio de desgaste 4 (risco de falha muito alto).....	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42

3.1	OBTENÇÃO DE DADOS.....	42
3.2	REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES	43
3.3	LEITURA DOS DADOS.....	44
3.4	METODOLOGIA PROPOSTA.....	46
3.4.1	Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração	47
3.4.2	Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope.....	48
3.4.3	Decisão sobre a análise.....	48
3.4.4	Realização da análise.....	49
4	RESULTADOS.....	51
4.1	CASO 1	51
4.1.1	Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração	52
4.1.2	Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope.....	52
4.1.3	Decisão sobre a análise.....	52
4.1.4	Realização da análise.....	52
4.1.5	Análise de falha do rolamento.....	54
4.1.6	Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento	57
4.2	CASO 2	58
4.2.1	Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração	58
4.2.2	Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope.....	58
4.2.3	Decisão sobre a análise.....	59
4.2.4	Realização da análise.....	59
4.2.5	Análise de falha do rolamento.....	61
4.2.6	Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento	63
4.3	CASO 3	63
4.3.1	Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração	64

4.3.2	Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope	64
4.3.3	Decisão sobre a análise	64
4.3.4	Realização da análise.....	65
4.3.5	Análise de falha do rolamento.....	67
4.3.6	Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento	70
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5	CONCLUSÕES	73
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade e a redução de custos são metas de qualquer empresa para seus meios de produção. Uma forma eficaz para alcançar estes objetivos é através da aplicação da manutenção preditiva no monitoramento de seus equipamentos e máquinas.

A manutenção preditiva é um conjunto de programas especiais (análise e medição de vibrações, termografia, análise de óleo, etc.) orientados para o monitoramento de máquinas e equipamentos em serviço. Sua finalidade, segundo BALDISSARELLI e FABRO (2019), é definir parâmetros a serem medidos e determinar os limites a serem tolerados para que, com essas informações, ações possam ser tomadas para anteceder possíveis falhas mais graves. Estas iniciativas resultam em diversos benefícios, tais como:

- a) eliminação de desmontagens desnecessárias;
- b) redução das paradas emergenciais;
- c) redução do tempo e do custo de manutenção;
- d) aumento na disponibilidade eletromecânica dos equipamentos;
- e) aumento da confiabilidade e da vida útil dos equipamentos;
- f) aumento da produção.

Para motores e bombas, mais especificamente, a análise de vibração de seus mancais de rolamento é uma das ferramentas que podem ser utilizadas pela manutenção preditiva. Esta análise permite detectar problemas como desalinhamento, desbalanceamento, folgas, excentricidade, desgaste dos rolamentos, entre outros.

Este trabalho fez uso de técnicas de análise de vibração para avaliar o estado de desgaste dos rolamentos dos mancais de motores e bombas, com o objetivo de evitar possíveis falhas destes componentes.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os rolamentos estão entre os componentes mais importantes de uma máquina. Quando um rolamento em operação se danifica, a máquina ou equipamento pode travar ou apresentar um mau funcionamento por completo (NSK BRASIL LTDA., 2001).

De forma geral, apenas 10% dos rolamentos atingem a sua vida útil esperada (vida nominal L_{10}). Estas falhas precoces podem ocorrer devido a problemas de lubrificação, aplicação de carga excessiva, procedimento de montagem inadequado, entre outros (GRANEY; STARRY, 2011). De forma a evitar a ocorrência destas falhas prematuras, inspeções podem ser realizadas periodicamente nos mancais dos equipamentos.

Através da análise de vibração dos mancais de motores e bombas, pode-se determinar a saúde dos rolamentos, e, dependendo desta informação, diferentes ações podem ser tomadas. Para um rolamento em um estágio de desgaste moderado, por exemplo, pode-se agendar a troca do componente para os próximos 30 ou 45 dias. Já para um rolamento apresentando um nível de desgaste elevado, a troca do componente deve ser feita o mais rápido possível.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é aplicar técnicas de análise de vibração em mancais de rolamento de motores e bombas para avaliar o nível de desgaste destes componentes, possibilitando, assim, a realização da troca dos rolamentos somente quando for necessário.

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- a) estudo e seleção de parâmetros do sinal de vibração que permitam analisar possíveis falhas;
- b) apresentação de algumas técnicas consideradas eficientes para a análise de vibração de mancais de rolamento;
- c) adquirir informações por meio de diferentes técnicas e combiná-las;
- d) propor metodologia a partir de indicadores e técnicas estabelecidas para avaliar o nível de desgaste dos rolamentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

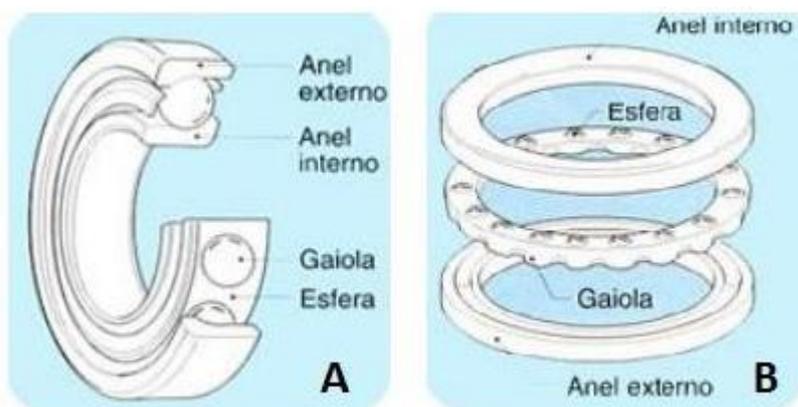
Nesta seção são apresentados alguns conceitos e técnicas necessárias para o desenvolvimento do trabalho, com a finalidade de criar um embasamento teórico para tornar possível o alcance dos objetivos citados.

2.1 ROLAMENTOS

Rolamentos são elementos utilizados para substituir a fricção de deslizamento entre as superfícies, permitindo movimento relativo entre duas ou mais partes. Basicamente, os rolamentos são formados por um anel interno (anel com a pista interna), um anel externo (anel com a pista externa), elementos rolantes (esferas ou rolos contidos no espaço entre os anéis interno e externo) e gaiola (responsável por fixar a posição dos elementos rolantes) (ALMEIDA, 2016).

Os rolamentos são classificados em função da direção da carga que irão apoiar, sendo divididos em rolamento radiais (que suportam carga na direção radial) e rolamentos axiais (que suportam carga na direção axial) (NSK, 2013). A figura 1 ilustra os componentes destes dois tipos de rolamento: radial (figura 1.a) e axial (figura 1.b).

Figura 1 - Componentes: rolamentos radiais e rolamentos axiais



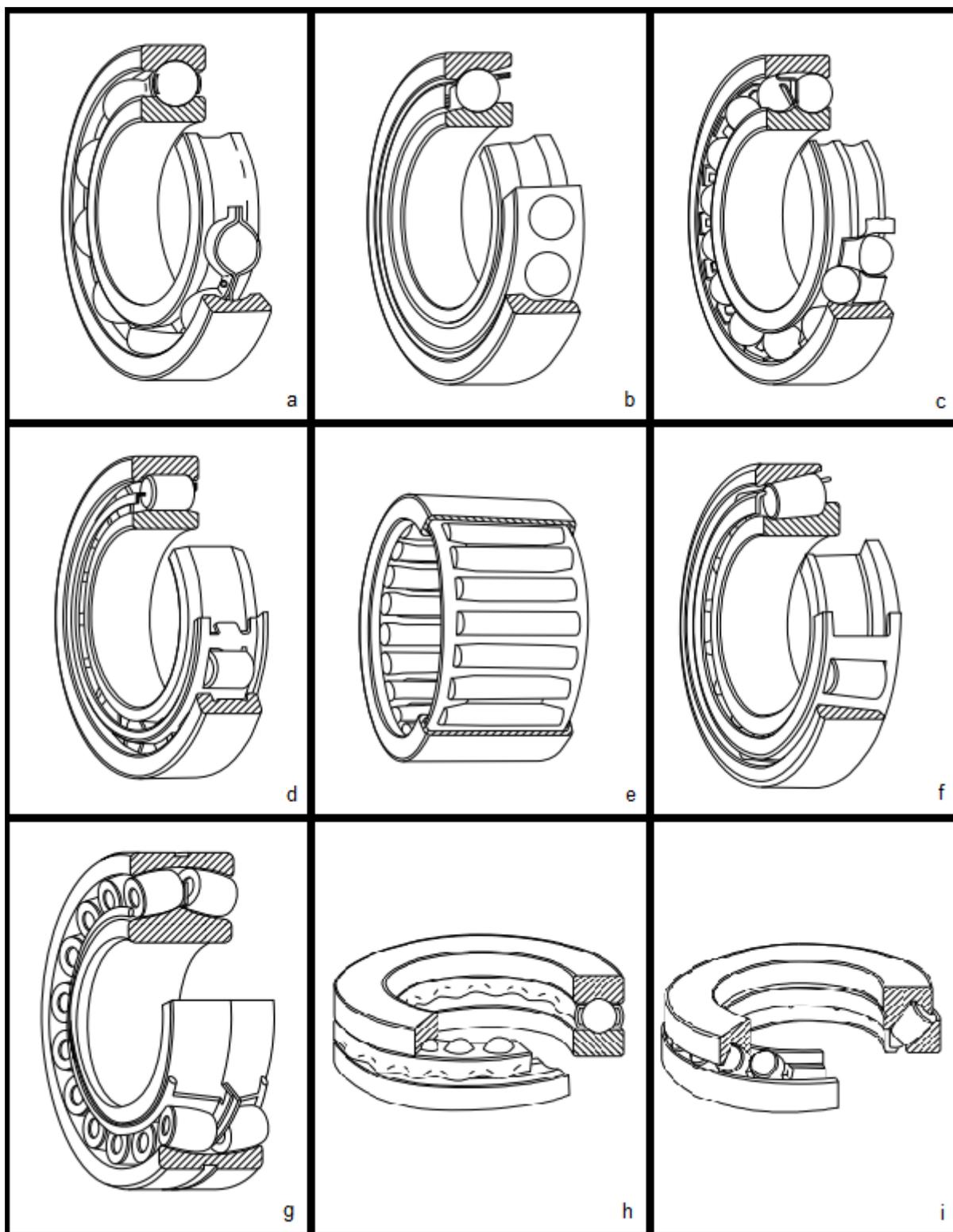
Fonte: ALMEIDA, 2016.

2.1.1 Tipos de rolamento

Além da direção da carga, os rolamentos podem também ser agrupados segundo o seu tipo de elemento rolante, sendo subdivididos em rolamentos de esferas e rolamentos de rolos, que, por sua vez, podem também ser classificados segundo

sua aplicação específica (NSK, 2013). Os rolamentos mais representativos são mostrados a seguir, sendo ilustrados na figura 2:

Figura 2 - Tipos de rolamento



Fonte: adaptado de NSK, 2013.

- a) rolamentos fixos de esferas (figura 2.a): é o tipo de rolamento mais representativo e atendem um extenso campo de aplicações. São mais adequados para aplicações que requerem alta velocidade de rotação (NSK, 2013);
- b) rolamentos de esferas de contato angular (figura 2.b): permitem apoio de carga radial e apoio de carga axial, porém, esta, em um único sentido. As esferas formam ângulos de contato de 15° , 25° , 30° ou 40° com os anéis interno e externo. A capacidade de carga axial será maior quanto maior for o ângulo de contato (NSK, 2013);
- c) rolamentos autocompensadores de esferas (figura 3.c): com o anel interno possuindo duas pistas e a pista do anel externo esférica, este tipo de rolamento pode compensar erros de alinhamento causados por alguns problemas relativos à instalação de um equipamento (NSK, 2013);
- d) rolamentos de rolos cilíndricos (figura 3.d): possuem uma grande capacidade de carga radial e são muito usados em fusos de máquinas-ferramentas (NSK, 2013);
- e) rolamentos de agulha (figura 3.e): possuem um grande número de elementos rolantes, sendo rolos finos e alongados. Este tipo de rolamento pode suportar cargas axiais elevadas (NSK, 2013);
- f) rolamentos de rolos cônicos (figura 3.f): apresentam rolos cônicos trapezoidais como elementos rolantes, que são guiados pelo rebordo maior do anel interno. Possuem grande capacidade de carga, permitindo apoio de carga radial e carga axial, porém, esta, apenas em um único sentido (NSK, 2013);
- g) rolamentos autocompensadores de rolos (figura 3.g): possuem duas pistas no anel interno e o anel externo apresenta uma única pista com formato esférico. Assim como os rolamentos autocompensadores de esferas, este tipo de rolamento permite o autoalinhamento, porém, sua capacidade de carga radial é bem maior. Estas características fazem com que estes rolamentos sejam amplamente utilizados para aplicações com cargas pesadas e cargas de choque (NSK, 2013);

- h) rolamentos axiais de esferas (figura 3.h): possuem anéis em forma de arruelas e, entre eles, encontram-se os elementos rolantes esféricos embutidos na gaiola (NSK, 2013);
- i) rolamentos axiais autocompensadores de rolos (figura 3.i): possuem rolos trapezoidais situados de forma oblíqua na superfície de rolagem e pista do anel externo com formato esférico. Este tipo de rolamento permite o autoalinhamento e possui uma alta capacidade de carga axial, podendo também suportar cargas radiais moderadas (NSK, 2013).

2.2 VIBRAÇÃO

Segundo RAO (2009), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo pode ser definido como vibração. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada, por exemplo, são exemplos típicos de vibração.

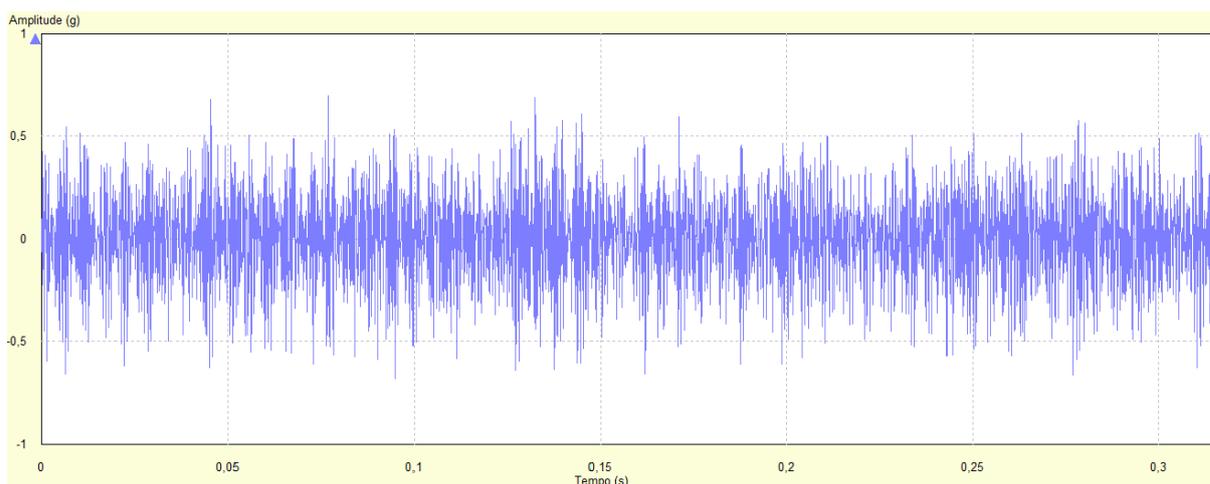
A vibração de um sistema mecânico é a sua reação a forças internas ou externas (SKF, 2000). Para máquinas rotativas, toda sua estrutura vibra em função dos esforços dinâmicos decorrentes do seu funcionamento, ou seja, o sinal de vibração de algum ponto da máquina será a soma das respostas vibratórias da estrutura a diferentes esforços excitadores (COSTA e MATHIAS, 2008). Por este motivo, muitos problemas em máquinas rotativas se mostram através de uma vibração excessiva, assim, o sinal de vibração pode ser utilizado como um indicativo da condição mecânica da máquina (SKF, 2000). Por outro lado, a vibração para uma máquina é um processo destrutivo que pode levar um componente à fadiga e, conseqüentemente, à sua falha (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

Um movimento de vibração pode ser constituído por um único componente e uma única frequência, podendo ser mostrado por uma simples função senoidal, ou por vários componentes e várias frequências atuando simultaneamente, caracterizado pela combinação de muitos componentes senoidais, o que acontece nos sistemas mecânicos (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

2.2.1 Sinal de vibração no domínio do tempo

Sinais de vibração reais de máquinas no domínio do tempo, por possuírem vários componentes em sua composição, mostram-se sinais aleatórios e de difícil interpretação, como mostra o gráfico 1:

Gráfico 1 - Sinal da aceleração de vibração em função do tempo



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

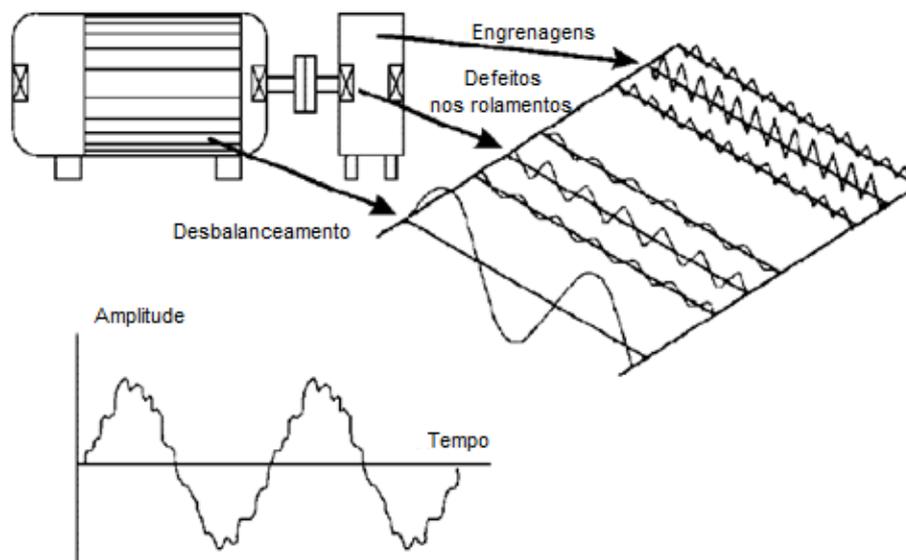
Por este motivo, a vibração no domínio do tempo é analisada através da medida de banda larga, que será mostrada posteriormente neste trabalho.

2.2.2 Espectro de frequência do sinal de vibração

Um sinal qualquer em função do tempo pode ser descrito em função de seus componentes de frequências pelo chamado “espectro de frequência do sinal”. Matematicamente, esta transposição do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência pode ser feita utilizando a Transformada Rápida de Fourier (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

Com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), o sinal pode ser convertido para o domínio da frequência e dá-se origem ao espectro de vibração. Em termos não matemáticos, isto significa que o sinal é “quebrado” em amplitudes específicas em vários componentes de frequência (SKF, 2000), como mostra a figura 3:

Figura 3 - Sinal de vibração sendo dividido em várias componentes de diferentes frequências

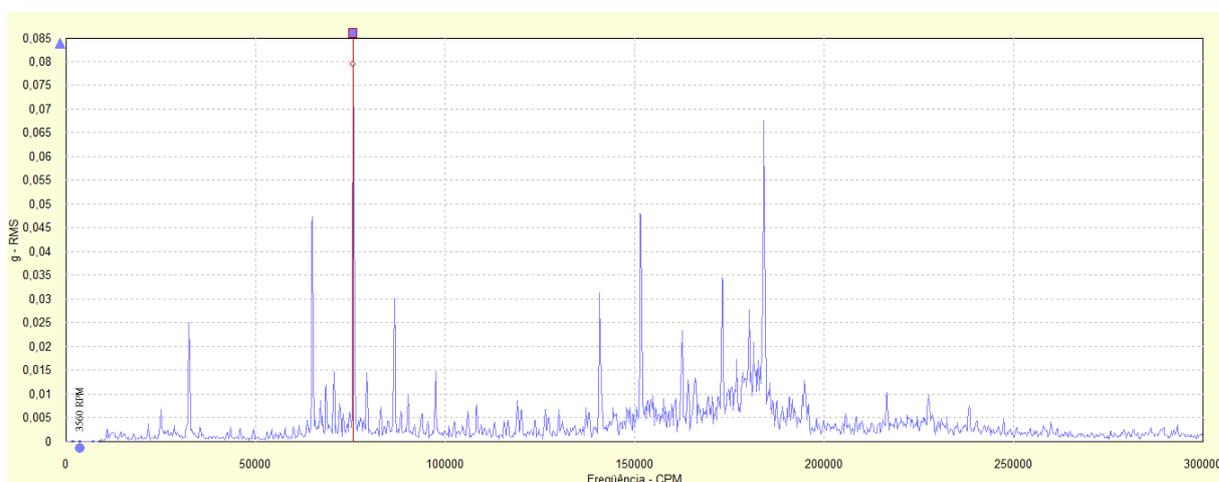


Fonte: adaptado de SKF, 2000.

Em análise de vibrações com o objetivo de diagnosticar defeitos em máquinas rotativas, o analista necessita reconhecer os muitos tipos de componentes do sinal e associá-los às causas que o geram (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013). Com a visualização do sinal de vibração no domínio da frequência (ou espectro de vibração), é possível fazer a observação dos componentes em amplitude e frequência, para que, a partir disto, as causas possam ser encontradas.

O gráfico 2, a seguir, mostra o sinal do gráfico 1 no domínio da frequência, ou seja, após a aplicação da FFT:

Gráfico 2 - Espectro de aceleração do sinal mostrado no gráfico 1



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

Após a aplicação da FFT, pode-se observar facilmente as maiores amplitudes e relacioná-las às suas respectivas frequências. Por isso, a análise do espectro de vibração é uma ferramenta tão poderosa: se existe um problema na máquina, ele irá fornecer informações para ajudar a determinar a localização deste problema e até estipular quando o problema pode tornar-se crítico (SKF, 2000).

2.3 ANÁLISE DA VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO

Para máquinas rotativas, como motores e bombas, a análise de vibração é considerada a melhor ferramenta para julgar fenômenos como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, problemas na fundação, eixo ou rotor da máquina, e desgaste dos rolamentos (SKF, 2000). A análise pode ser feita de diversas formas e utilizando várias técnicas diferentes. Estas técnicas dividem-se em dois grupos: as que consideram o sinal da vibração em função do tempo, e as que resultam da análise do sinal de vibração em função da frequência.

2.3.1 Análise da vibração no domínio do tempo

É o tipo de avaliação mais simples da vibração, e é feita usando a medida de banda larga, isto é, um valor *overall* ou global medido em uma grande faixa de frequência (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013). O nível de vibração global de um componente ou máquina quando comparado com os valores normais (performance da máquina sob condições normais ou valores indicados na norma) pode indicar o seu atual estado de saúde (SKF, 2000).

O intervalo de frequência do qual é retirado o valor global da vibração é determinado pelo equipamento utilizado para o monitoramento. Alguns equipamentos coletores de dados permitem ao usuário selecionar o intervalo de frequência, enquanto outros já têm esse intervalo predefinido. Apesar de a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*) estabelecer uma definição padrão, ainda há discussões sobre qual o melhor intervalo de frequências para medir o valor global. Por este motivo, quando os dados forem utilizados para comparação, é importante que eles tenham sido obtidos no mesmo intervalo de frequência (SKF, 2000), ou, no caso de comparação com a norma, que a faixa de frequência utilizada seja a mesma que a norma recomenda.

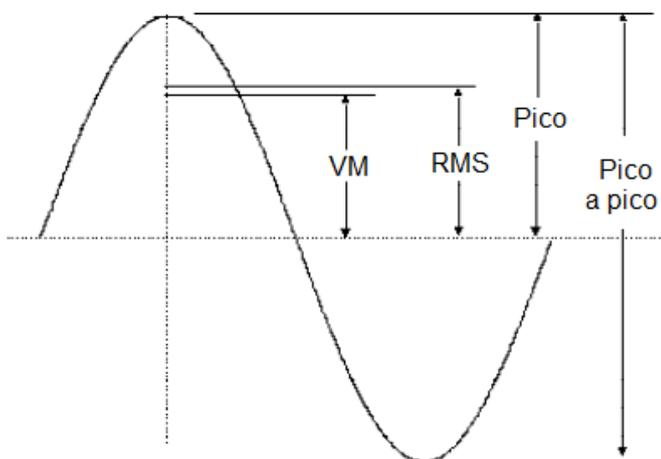
Apesar de não ser tão poderosa quanto outras técnicas, a análise do sinal de vibração no domínio do tempo pode fornecer pistas da condição de uma máquina que nem sempre serão evidentes no espectro de frequência e, por isso, deve ser utilizada sempre que possível (SKF, 2000).

Dentre os fatores do sinal de vibração no domínio do tempo que podem ser considerados para análise, estão: o nível global ou valor RMS, o fator de pico, o fator de crista e o fator K. Porém, para a apresentação da análise por estes fatores, é importante mostrar alguns conceitos que são utilizados para quantificar o nível da vibração.

2.3.1.1 Quantificação dos níveis de vibração

O nível do sinal de vibração pode ser descrito de diversas maneiras. Os valores de pico e pico a pico, por exemplo, são usados frequentemente para caracterizar o sinal de uma vibração, pois indicam o percurso máximo da posição de equilíbrio. A “Raiz Média Quadrática” (RMS, do inglês *Root Mean Square*) é uma boa representação do sinal, pois é uma medida da energia contida no sinal de vibração (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013). Estes parâmetros, juntamente ao valor médio (VM), são representados na figura 4, exemplificados numa simples função senoidal:

Figura 4 - Valor RMS, pico, pico a pico e valor médio



Fonte: adaptado de SKF, 2000.

Os valores da raiz quadrática média e do valor médio são calculados pelas seguintes equações:

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

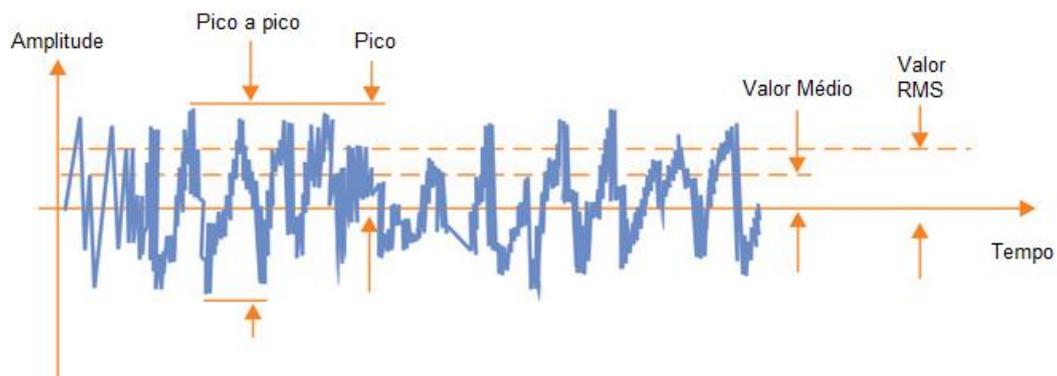
$$VM = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (2)$$

Em que:

- VM = Valor Médio;
- RMS = Raiz Média Quadrática (*Root Mean Square*)

Estas quantificações não são usadas somente em sinais puramente senoidais, mas também em sinais de vibração de máquinas reais, que são composições de muitos componentes senoidais (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013), como mostra a figura 5:

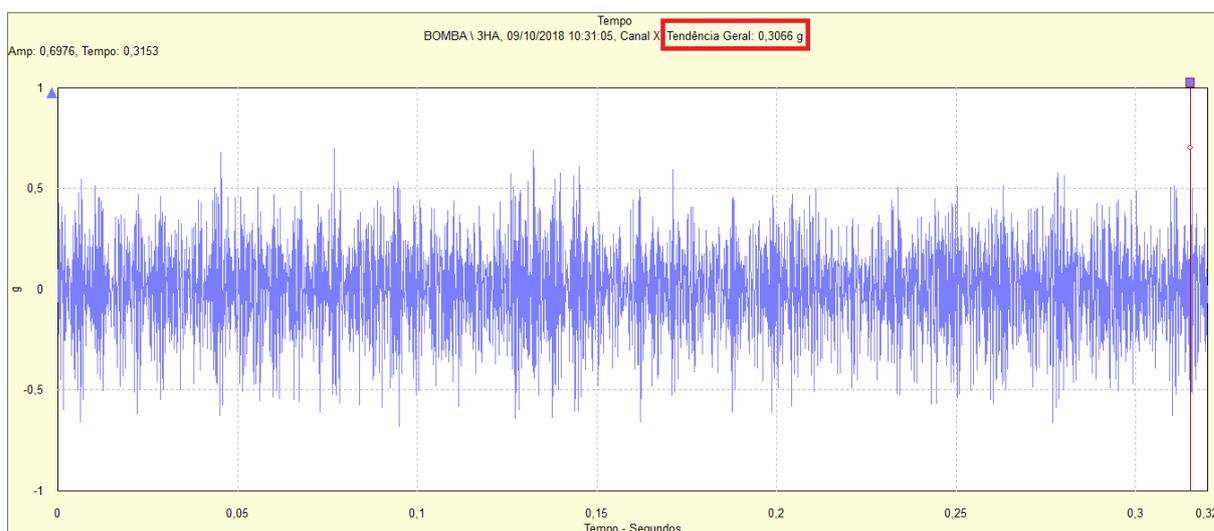
Figura 5 - Valor RMS, pico, pico a pico e valor médio para um sinal real de máquina



Fonte: adaptado de COSTA e MATHIAS, 2008.

Os valores destes parâmetros são obtidos facilmente nos softwares utilizados para análise de vibração. No gráfico 3, por exemplo, obtido através do software SKF @plitude Analyst® o valor RMS é mostrado na legenda do gráfico (destacado em vermelho pelo autor) com o nome de “tendência geral” e com valor de 0,3066g (onde g é a aceleração da gravidade, de aproximadamente $9,8m/s^2$).

Gráfico 3 - Valor RMS da aceleração de vibração



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

2.3.1.2 Classificação do nível de vibração pelo valor RMS

Como já mostrado, o valor RMS é uma medida da energia da vibração, e, por isso, pode ser utilizado para indicar a deterioração das condições de um componente ou equipamento.

No sinal de vibração gerado por rolamentos, mais especificamente, ao surgir um defeito em algum dos componentes do rolamento, criam-se impulsos de curta duração que se sobrepõem ao sinal básico da vibração. Estes impulsos inicialmente não alteram de modo significativo o valor RMS, porém, com a evolução dos defeitos, o valor RMS que permanecia baixo e estável, começa a aumentar, acompanhando os aumentos dos valores dos picos de vibração (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

A melhor forma de identificar problemas através do valor RMS é através da comparação dos valores atuais com o histórico da máquina, porém, até o desenvolvimento de uma boa base de dados, os valores estipulados nas normas ISO são um bom ponto de partida (SKF, 2000).

A norma ISO 10816-3:2009 separa as máquinas em 2 grandes grupos e relaciona o valor RMS da velocidade de vibração à sua condição:

Figura 6 - Norma ISO 10816-3:2009 para o valor RMS da velocidade de vibração

Nível de vibração (mm/s RMS)	Grupo 1		Grupo 2	
0.71	A	A	A	A
1.4	B	A	A	A
2.3	B	B	B	A
2.8	C	B	B	A
3.5	C	C	C	B
4.5	D	C	C	B
7.1	D	D	D	C
11.0	D	D	D	D
Base	Rígida	Flexível	Rígida	Flexível

Fonte: adaptado de IMV CORPORATION.

Em que A, B, C e D classificam a condição da máquina como boa, satisfatória, insatisfatória e inaceitável, respectivamente.

A classificação das máquinas quanto aos grupos dá-se pela potência das mesmas:

- Grupo 1: Máquinas grandes; Potência de 300kw ~ 50MW; Tamanho do eixo > 315mm.
- Grupo 2: Máquinas médias; Potência de 15kw ~ 300kW; Tamanho do eixo de 160mm ~ 315mm.

2.3.1.3 Valor de pico (Peak-Value)

O valor de pico é a maior amplitude apresentada pelo sinal de vibração.

Quando um defeito surge no rolamento, os impulsos de curta duração no sinal de vibração elevam o valor de pico (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013). Por este motivo, quando um defeito é incipiente, a observação do valor de pico consegue detectar sua presença (BEZERRA, 2004).

2.3.1.4 Fator de Crista (Crest-Factor)

O fator de crista é definido como a relação do valor de pico da vibração pelo valor de RMS medidos em uma faixa de frequência (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

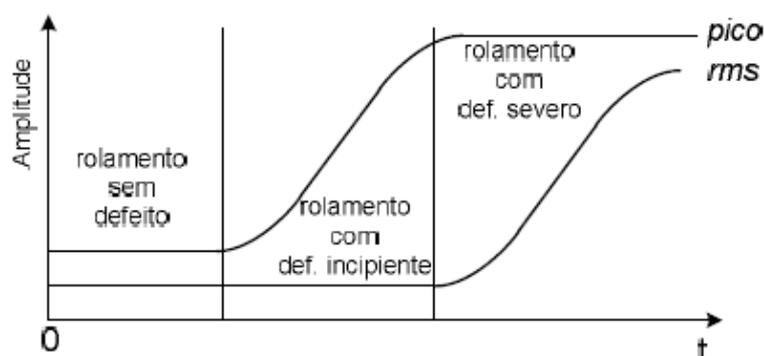
$$FC = \frac{F_{pico}}{RMS} \quad (3)$$

Em que:

- FC = Fator de Crista;
- F_{pico} = Fator de pico.

Para a detecção de falhas em rolamentos, mais precisamente, se há o surgimento de falhas pontuais, o fator de crista atinge altos valores. Porém, quando as falhas deixam de ser localizadas e se espalham pelas superfícies internas do rolamento, os picos do sinal de vibração começam a desaparecer, à medida que o RMS cresce, e isto faz com que o valor do fator de crista diminua (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013). Este fenômeno é mostrado no gráfico 4, que compara o valor de pico e o valor RMS à medida que os danos em um rolamento vão aumentando:

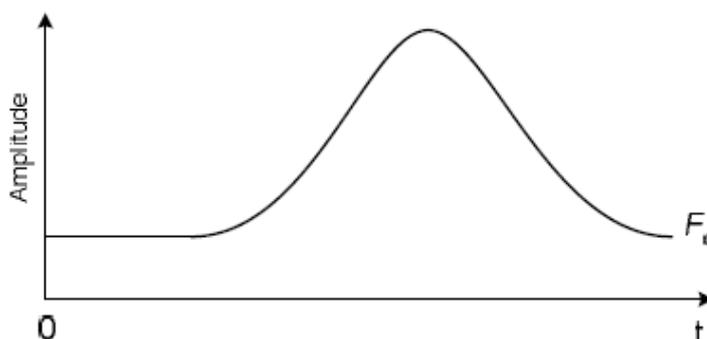
Gráfico 4 - Comparação entre o fator de pico e o valor RMS



Fonte: BEZERRA, 2004.

Portanto, como em um rolamento muito defeituoso o valor de pico continua estável ao mesmo tempo que o valor RMS aumenta, isto resulta em uma queda brusca no fator de crista, como é mostrado no gráfico 5:

Gráfico 5 - Comportamento do fator de crista com a progressão das falhas no rolamento



Fonte: BEZERRA, 2004.

Por este motivo, o fator de crista é uma ótima ferramenta para a detecção de falhas em seu estágio inicial, porém, não eficaz para a avaliação de um rolamento com falhas em um estágio avançado.

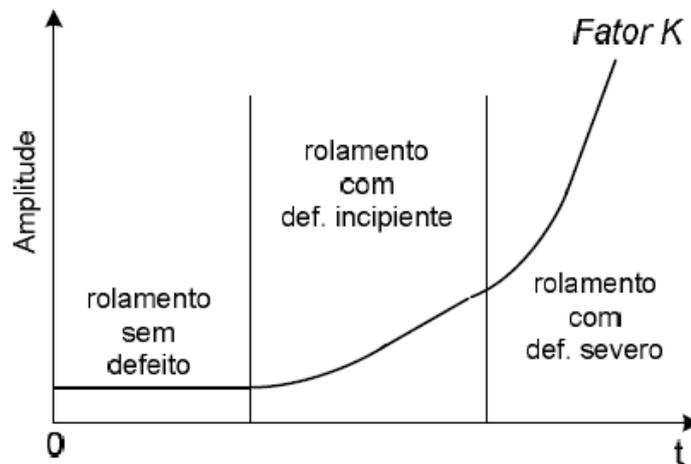
2.3.1.5 Fator K

Técnica utilizada por alguns analisadores, o fator K (F_K) é definido por (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013):

$$F_K = F_{pico} \times RMS \quad (4)$$

Diferentemente do fator de crista, o fator K pode ser utilizado para analisar rolamentos com defeitos em um estágio avançado. Seu comportamento com a evolução dos danos é mostrado no gráfico 6:

Gráfico 6 - Comportamento do Fator K



Fonte: BEZERRA, 2004.

A análise da vibração no domínio do tempo é capaz de detectar o surgimento de falhas, porém, é impossível detectar onde a falha ocorreu. Para esta finalidade é necessário fazer a análise do sinal de vibração no domínio da frequência (BEZERRA, 2004).

2.3.2 Análise da vibração no domínio da frequência

A análise do sinal de vibração no domínio da frequência permite a visualização de pontos de maior amplitude em determinadas frequências. Estas frequências podem oferecer informações importantes sobre a máquina ou algum de seus elementos.

Rolamentos com defeitos em seus componentes, por exemplo, causam vibrações em altas frequências que não são múltiplas da rotação do eixo. Ou seja, se há um defeito em uma de suas esferas, este defeito passará pelas pistas interna e externa em uma sucessão de impactos com o dobro da frequência de rotação da esfera. No sinal da aceleração em função da frequência, por exemplo, essa frequência seria evidenciada com um valor de amplitude mais elevado que os demais (INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA, 2013).

Além de permitir a avaliação dos defeitos nos rolamentos, a análise do sinal da vibração em função da frequência pode também oferecer informações importantes sobre a máquina, como problemas de montagem, por exemplo.

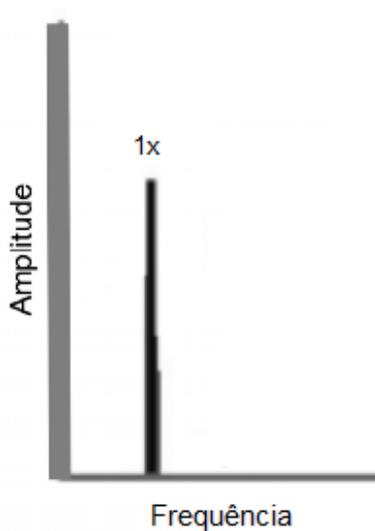
2.3.2.1 Detecção de problemas através do sinal da velocidade de vibração em função da frequência

A análise do sinal da velocidade de vibração em função da frequência em sistemas mecânicos permite identificar uma variedade de falhas. As frequências em evidência no espectro de vibração podem identificar diferentes problemas dependendo da forma como se apresentam:

2.3.2.1.1 *Desbalanceamento*

O espectro de vibração mostrará uma amplitude predominante na frequência de rotação do eixo (GIRDHAR, 2004).

Gráfico 7 - Espectro indicando desbalanceamento

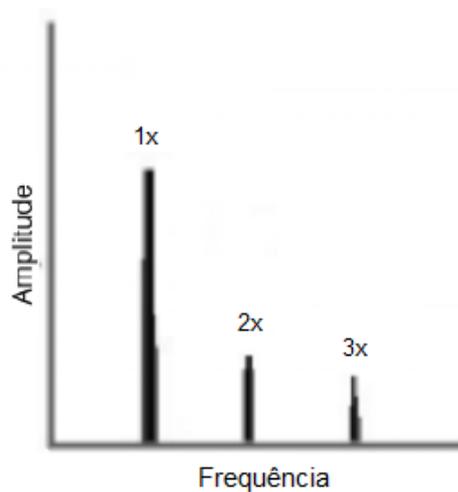


Fonte: adaptado de GIRDHAR, 2004.

2.3.2.1.2 *Desalinhamento angular*

O espectro de vibração mostrará picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e em suas 2ª e 3ª harmônicas (GIRDHAR, 2004).

Gráfico 8 - Espectro indicando desalinhamento angular

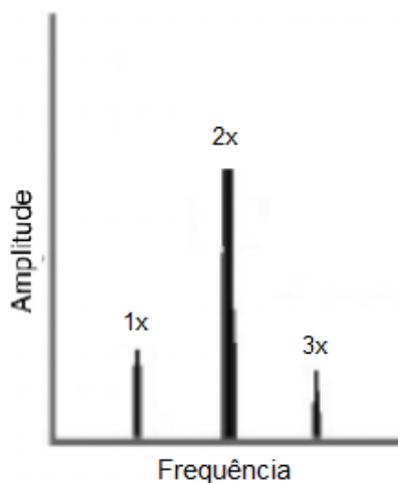


Fonte: adaptado de GIRDHAR, 2004.

2.3.2.1.3 Desalinhamento paralelo

O espectro de vibração mostrará picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e em suas 2ª e 3ª harmônicas, sendo o maior pico na segunda harmônica (GIRDHAR, 2004).

Gráfico 9 - Espectro indicando desalinhamento paralelo

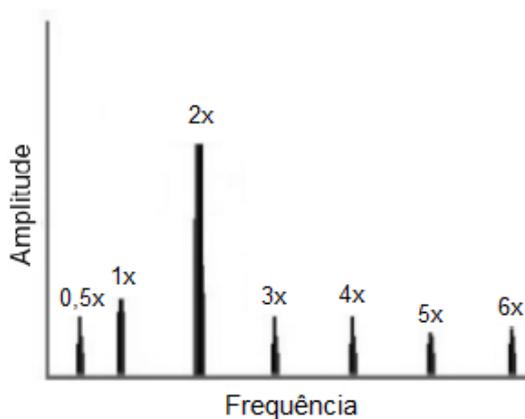


Fonte: adaptado de GIRDHAR, 2004.

2.3.2.1.4 Folga Mecânica

Quando há perda de um ou mais pontos de fixação dos mancais, o espectro caracteriza-se pela presença de picos de amplitude na frequência de rotação do eixo e suas harmônicas, sendo distribuídos da seguinte forma (GIRDHAR, 2004):

Gráfico 10 - Espectro mostrando a presença de folgas mecânicas



Fonte: adaptado de GIRDHAR, 2004.

2.3.2.2 Frequências características de falha em rolamentos

Se um rolamento está danificado, ele gera sinais em frequências características quando seus elementos rolantes passam por um dano em suas superfícies internas, seja nas pistas ou nos próprios elementos rolantes. Estas frequências são as chamadas frequências características de falha (GRANEY; STARRY, 2011).

As frequências características de falha de rolamentos são não-síncronas, ou seja, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada (CUNHA, 2012).

Pode-se determinar as frequências características de falha em função da geometria do rolamento e da velocidade relativa entre as duas pistas (GRANEY; STARRY, 2011). Para configurações onde a pista externa é estacionária, situação encontrada em motores e bombas de eixo horizontal, as frequências podem ser calculadas pelas seguintes equações, segundo GRANEY e STARRY (2011):

$$BPFI = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 + \frac{B}{P} \times \cos \theta\right) \quad (5)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 - \frac{B}{P} \times \cos \theta\right) \quad (6)$$

$$FTF = \frac{F}{2} \times \left(1 - \frac{B}{P} \times \cos \theta\right) \quad (7)$$

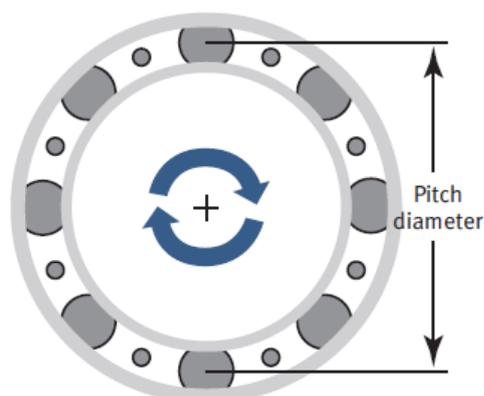
$$BPF = \frac{P}{2B} \times F \times \left[1 - \left(\frac{B}{P} \times \cos \theta\right)^2\right] \quad (8)$$

Em que:

- BPFI = Frequência fundamental da pista interna (*ball pass frequency inner race*) [Hz];
- BPFO = Frequência fundamental da pista externa (*ball pass frequency outer race*) [Hz];
- FTF = Frequência fundamental da gaiola (*fundamental train frequency*) [Hz];
- BPF = Frequência fundamental dos elementos rolantes (*ball pass frequency*) [Hz];
- F = Frequência de rotação do eixo [Hz];

- N = Número de elementos rolantes;
- B = Diâmetro dos elementos rolantes [mm];
- Θ = Ângulo de contato;
- P = Diâmetro do passo (*pitch diameter* – mostrado na figura 7) [mm].

Figura 7 - Diâmetro do passo (*pitch diameter*)



Fonte: GRANEY; STARRY, 2011.

Os valores das frequências características de falha normalmente são disponibilizados em tabelas pelos fornecedores de rolamentos, listando as frequências para todos os tipos de rolamentos disponíveis como valores múltiplos da frequência de rotação do eixo (de modo a facilitar a análise do espectro de vibração), como mostra a tabela 1:

Tabela 1 - Lista das frequências características de falha fornecida por um fabricante de rolamentos

Bearing Number	NB	BD	PD	PHI	BPFO	BPFI	FTF	BSF
6002	9	0.187	0.925	0	3.59	5.41	0.40	2.37
6003	8	0.218	1.023	0	3.15	4.85	0.39	2.24
6004	9	0.25	1.24	0	3.59	5.41	0.40	2.38
60/22	9	0.25	1.299	0	3.63	5.37	0.4	2.5
6005	10	0.25	1.417	0	4.12	5.88	0.41	2.75
60/28	10	0.281	1.574	0	4.11	5.89	0.41	2.71
6006	11	0.281	1.692	0	4.59	6.41	0.42	2.93
60/32	10	0.312	1.771	0	4.12	5.88	0.41	2.75
6007	11	0.312	1.909	0	4.6	6.4	0.42	2.98
6008	12	0.312	2.125	0	5.12	6.88	0.43	3.33
6009	13	0.343	2.362	0	5.56	7.44	0.43	3.37
6010	14	0.343	2.559	0	6.06	7.94	0.43	3.66
6011	13	0.406	2.854	0	5.58	7.42	0.43	3.44
6012	14	0.406	3.051	0	6.07	7.93	0.43	3.69
6013	15	0.406	3.248	0	6.56	8.44	0.44	3.94
6014	14	0.468	3.543	0	6.08	7.92	0.43	3.72
6015	15	0.468	3.74	0	6.56	8.44	0.44	3.93
6016	14	0.531	4.035	0	6.08	7.92	0.43	3.73
6017	15	0.531	4.232	0	6.56	8.44	0.44	3.92
6018	14	0.593	4.527	0	6.08	7.92	0.43	3.75

Fonte: adaptado de NTN, 2019.

Destacadas em vermelho na tabela 1, as frequências características do rolamento podem ser facilmente encontradas simplesmente através da referência do mesmo.

Listas de fabricantes diferentes podem ser consultadas para a determinação das frequências características de um rolamento, uma vez que elas dependem apenas da geometria do componente. Rolamentos de fabricantes diferentes com a mesma referência possuem a mesma geometria e, portanto, as mesmas frequências características.

2.3.2.3 Técnica do envelope

Defeitos em rolamentos criam sinais de vibração de baixas amplitudes e frequências muito altas, quando comparados a sinais resultantes da rotação e da estrutura da máquina. Para um rolamento com defeito na sua pista externa, por exemplo, cada passagem de um elemento rolante na falha irá causar um pequeno e repetitivo sinal na frequência de defeito da pista externa do rolamento. Porém, este sinal tem uma energia tão pequena que, com a utilização do monitoramento pela vibração global, ele se perderia entre os outros sinais de vibração estrutural e de rotação da máquina. O objetivo do envelope é filtrar estes sinais de baixa frequência e evidenciar os sinais referentes aos defeitos do rolamento (SKF, 2000).

Para o entendimento desta técnica, pode-se continuar com o exemplo de um rolamento com uma falha em sua pista externa. Segundo Girdhar (2004), sempre que um elemento rolante passar por esta falha, serão gerados impactos repetitivos numa frequência igual à frequência característica de falha da pista externa. Estes impactos, por sua vez, excitam vibrações de frequências elevadas ($>500\text{Hz}$), relativas à ressonância dos componentes do rolamento. Portanto, no momento do impacto a amplitude da vibração cresce até um valor máximo e depois começa a decrescer até o impacto seguinte. Este processo contínuo resulta em um sinal de vibração no tempo semelhante ao mostrado na figura 8:

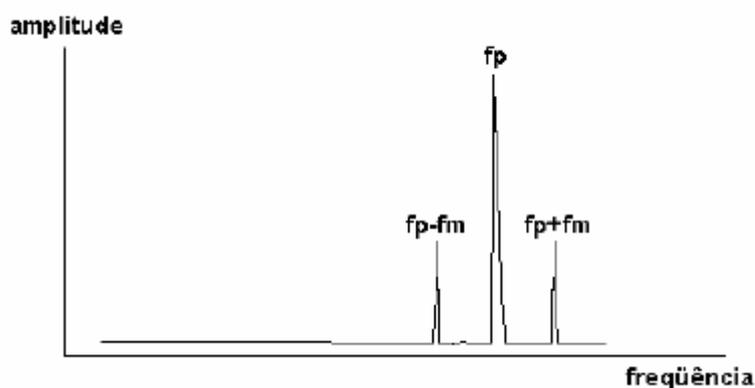
Figura 8 - Sinal de vibração causado pelos impactos dos elementos rolantes na falha



Fonte: adaptado de GIRDHAR, 2004.

Esta variação da amplitude de vibração com o tempo é chamada de modulação, com o sinal sendo formado por uma componente básica chamada “portadora” e pelo componente que causa a variação da amplitude da portadora ao longo do tempo, denominado “sinal modulante” (ou componente moduladora) (CUNHA, 2012). Estes sinais de vibração característicos, quando vistos no domínio da frequência, comportam-se da seguinte maneira:

Figura 9 - Espectro de um sinal modulado



Fonte: CUNHA, 2012.

Em que:

- f_p = Frequência da componente portadora;
- f_m = Frequência da componente moduladora.

Voltando ao exemplo do rolamento com falha, pode-se afirmar que o sinal de vibração relativo à ressonância dos componentes do rolamento é modulado em amplitude pela sequência de impactos repetitivos e pelo efeito do amortecimento. Ou seja, as frequências portadoras são as frequências naturais dos componentes do rolamento e as modulantes são as frequências básicas de defeito do rolamento (CUNHA, 2012). Portanto, o envelope é obtido através da demodulação deste sinal.

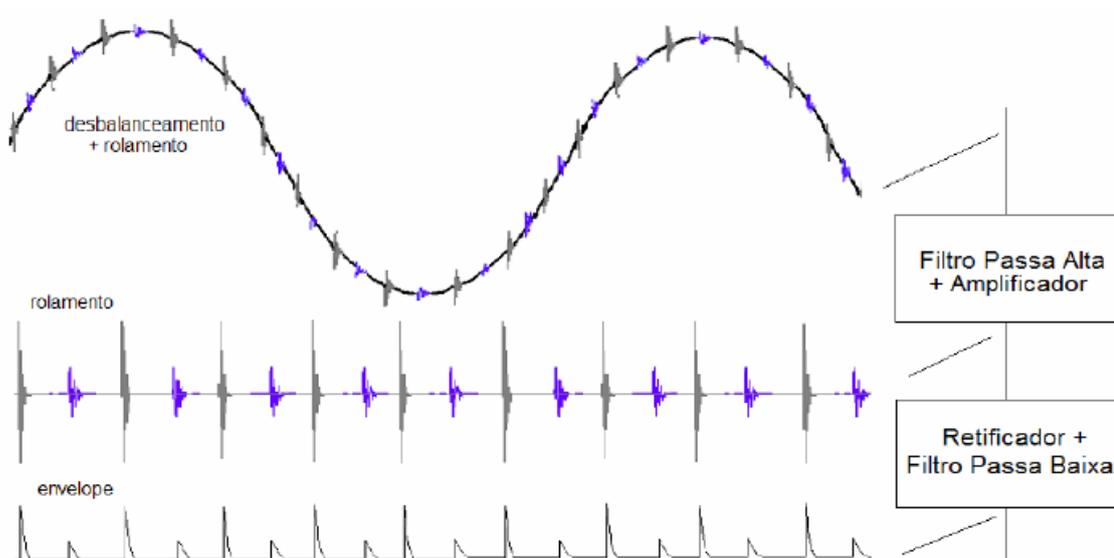
Resumidamente, as frequências presentes no sinal demodulado correspondem às taxas de repetição dos impactos que geram as vibrações de alta frequência. Essas taxas de repetição são as frequências básicas dos defeitos do rolamento. O valor de pico da sequência de transitórios presente na forma de onda demodulada (o envelope) é uma medida da severidade dos impactos gerados pelo defeito (CUNHA, 2012).

Segundo CUNHA (2012), o processo de demodulação para a obtenção do envelope a partir do sinal de vibração geralmente é realizado por um circuito analógico composto por:

- a) um filtro passa-alta, que remove as componentes de alta amplitude e baixa frequência;
- b) um retificador e um filtro passa-baixa, responsáveis por extrair a envoltória da vibrações de alta frequência.

Este processo é mostrado na figura 10:

Figura 10 - Procedimento de demodulação para a obtenção do envelope



Fonte: CUNHA, 2012.

Ao eliminar os sinais de vibração de alta frequência, a técnica de envelope permite uma avaliação completamente voltada a falhas em rolamentos. A visualização do seu espectro permite detectar com mais facilidade a localidade das falhas, uma vez que os picos observados podem ser relacionados com as frequências fundamentais de defeito do rolamento.

O envelope de aceleração pode ser quantificado quanto à sua tendência geral (medida na grandeza gE), e, a partir disto, pode-se atribuir faixas de valor que assimilem o nível da vibração ao nível de desgaste do rolamento.

2.3.3 Análise do desgaste do rolamento através da forma do espectro de vibração

Defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão. Este processo pode ter início com um dano em qualquer um de seus componentes e, a partir deste dano inicial, a degradação vai se alastrando para as demais regiões (CUNHA, 2012).

Os estágios de desgaste de um rolamento podem ser divididos em 4, desde o estágio inicial até o estágio mais avançado. Cada um destes estágios apresenta suas próprias características de dano e seus sintomas no sinal de vibração. Portanto, através da observação destes sintomas no espectro de vibração pode-se estipular o nível de desgaste em um rolamento e, conseqüentemente, o risco de falha do mesmo, possibilitando que ações sejam tomadas para evitar a falha do componente.

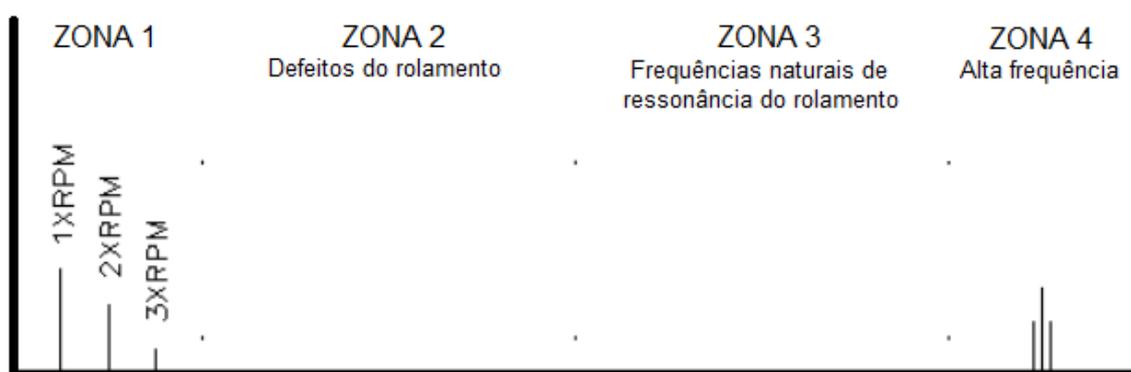
As características de cada um dos 4 estágios de desgaste são mostradas a seguir:

2.3.3.1 Estágio de desgaste 1 (baixo risco de falha)

- Picos de frequências aparecem na região ultrassônica (acima de 20KHz). Faixa detectada apenas por sensores projetados para esta aplicação (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- As frequências características do rolamento podem aparecer na segunda faixa de frequências (2ª harmônica). A frequência da pista externa (BPFO) é a mais fácil de identificar (GRANEY e STARRY, 2011);

- Frequências relacionadas a problemas de montagem como alinhamento ou desalinhamento podem aparecer (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- A inspeção física do rolamento neste estágio não será capaz de identificar defeitos (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- Neste estágio o risco de falha é baixo, e não há recomendações sobre a monitoração do estado do rolamento: as inspeções devem ser feitas em seu intervalo normal (GRANEY e STARRY, 2011).

Figura 11 - Esquemática do espectro de vibração para o estágio 1 de desgaste do rolamento



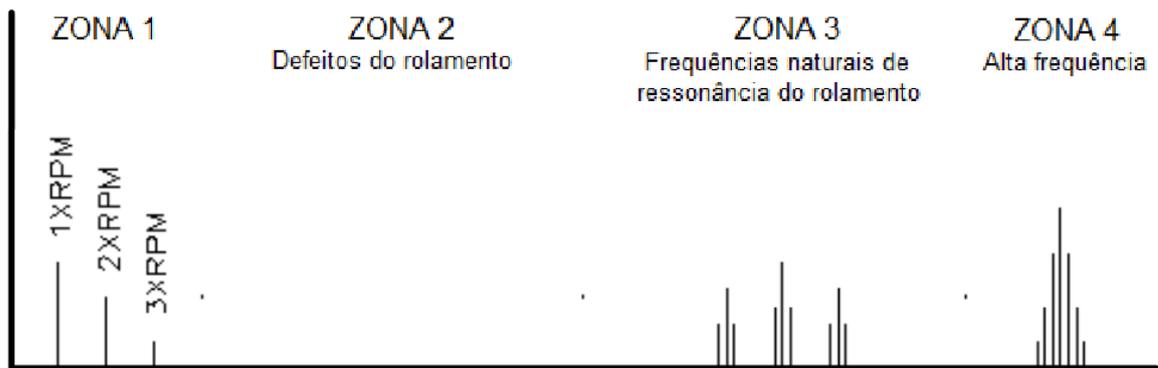
Fonte: STI VIBRATION MONITORING INC., 2012.

2.3.3.2 Estágio de desgaste 2 (risco de falha moderado)

- Sinais relativos às frequências naturais de ressonância do rolamento (faixa acima de 5KHz) irão aparecer (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- Há um aumento na amplitude e a quantidade de harmônicas das frequências naturais de defeito do rolamento. A frequência natural da pista externa (BPFO) pode aparecer na primeira faixa de frequências, além disso, a frequência natural da pista interna (BPFI) pode ser visto em sua segunda harmônica (GRANEY e STARRY, 2011);
- Harmônicas das frequências de falha podem aparecer também no espectro de velocidade (GRANEY e STARRY, 2011);

- Neste estágio, os danos nas pistas e nos elementos rolantes deixam de ser microscópicos e passam a ser visíveis a olho nu (GRANEY e STARRY, 2011);
- O risco de falha catastrófica é moderado e não há recomendações a serem feitas sobre o rolamento (GRANEY e STARRY, 2011).

Figura 12 - Esquemática do espectro de vibração para o estágio 2 de desgaste do rolamento



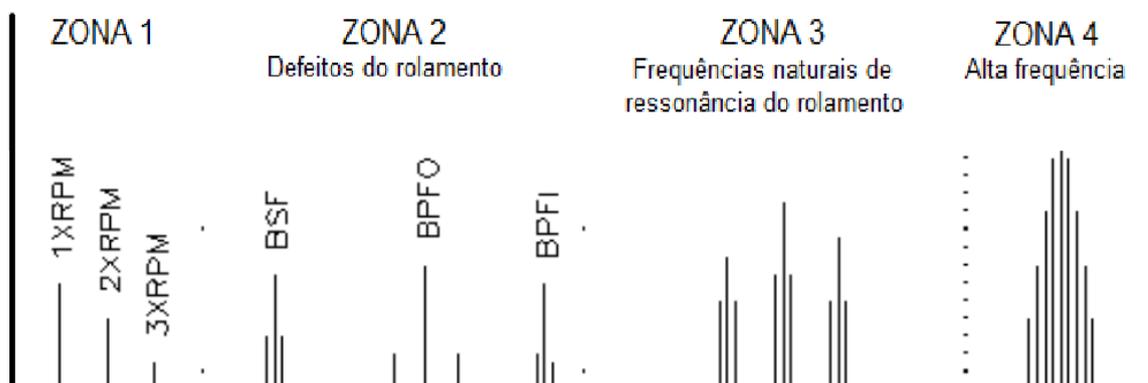
Fonte: STI VIBRATION MONITORING INC., 2012.

2.3.3.3 Estágio de desgaste 3 (alto risco de falha)

- Amplitudes aparecem nas frequências fundamentais de defeito do rolamento (1ª harmônica) (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012). A frequência natural da pista externa (BPFO) aparecerá na sua primeira e segunda harmônica. A frequência natural da pista interna (BPFI) aparecerá em sua segunda harmônica. Também há a possibilidade de aparição da frequência natural dos elementos rolantes (BPF) em sua primeira harmônica (GRANEY e STARRY, 2011);
- No espectro de velocidade, harmônicas das frequências fundamentais devem ser facilmente observadas (GRANEY e STARRY, 2011);
- As amplitudes na região das frequências naturais de ressonância do rolamento e na região ultrassônica aumentam consideravelmente (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- Neste estágio, os danos nas pistas e elementos rolantes crescem consideravelmente e também aparecem em múltiplas localidades (GRANEY e STARRY, 2011);

- O risco de falha catastrófica é alto, e é recomendado que o rolamento seja trocado dentro de 30 ou 45 dias (GRANEY e STARRY, 2011).

Figura 13 - Esquemática do espectro de vibração para o estágio 3 de desgaste do rolamento

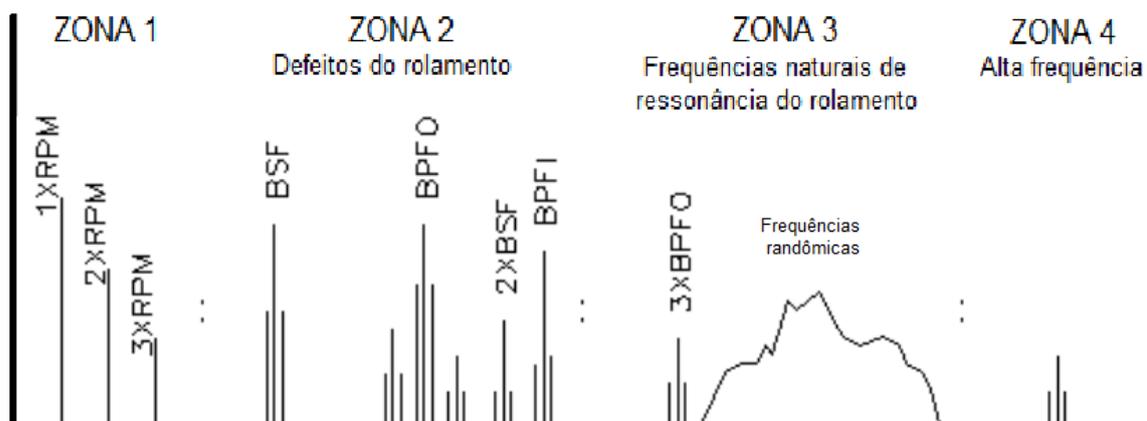


Fonte: STI VIBRATION MONITORING INC., 2012.

2.3.3.4 Estágio de desgaste 4 (risco de falha muito alto)

- Vibrações aleatórias irão crescer, podendo encobrir a baixa amplitude das frequências fundamentais do rolamento. Neste ponto, a tendência geral da velocidade de vibração deverá exceder o ponto de alarme (GRANEY e STARRY, 2011);
- A amplitude na região das frequências naturais de ressonância do rolamento irá decair e será substituída por uma vibração randômica (STI VIBRATION MONITORING INC., 2012);
- Se a frequência fundamental da gaiola (FTF) puder ser vista no espectro, o rolamento está muito perto de falhar (GRANEY e STARRY, 2011);
- A amplitude da vibração na frequência de rotação pode tornar-se excessiva (GRANEY e STARRY, 2011);
- Neste estágio, o risco de falha catastrófica é muito alto. A recomendação é que o rolamento seja substituído urgentemente (GRANEY e STARRY, 2011);

Figura 14 - Esquemática do espectro de vibração para o estágio 4 de desgaste do rolamento



Fonte: STI VIBRATION MONITORING INC., 2012.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é mostrado o procedimento feito para a obtenção dos dados para análise, bem como a metodologia proposta para analisar os sinais de vibração e estipular o estado de desgaste dos rolamentos.

3.1 OBTENÇÃO DE DADOS

Os dados utilizados no trabalho foram fornecidos pela equipe de manutenção preditiva da coordenação de manutenção mecânica da gerência de manutenção metropolitana da Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Equipe da qual o autor fazia parte durante seu período de estágio na empresa.

Os dados foram coletados utilizando o *SKF Microlog Analyzer – Série GX*® (figura 15) e analisados através do software *SKF @ptitude Analyst*®.

Figura 15 - SKF Microlog Analyzer Série GX



Fonte: Site da SKF.

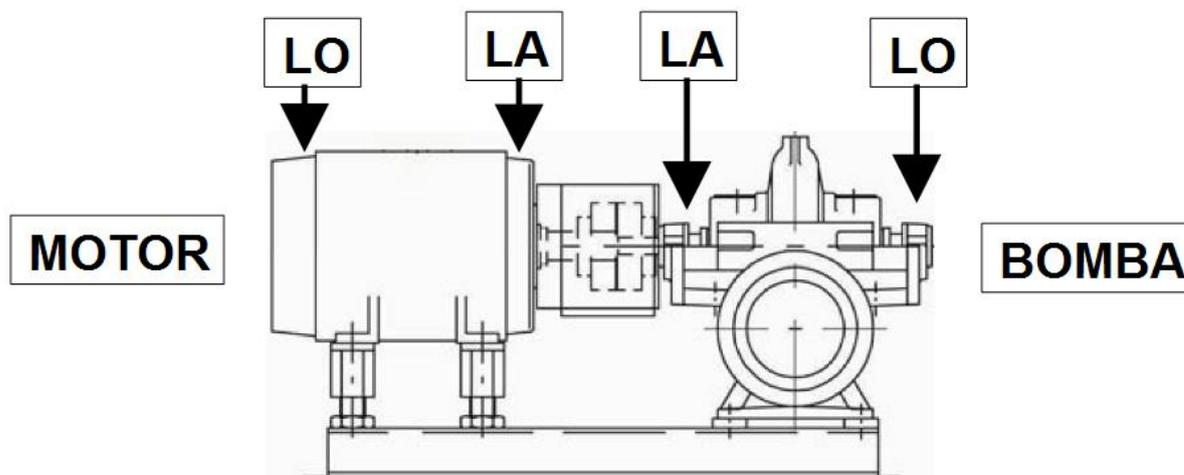
As medições de velocidade de vibração com o *SKF Microlog Analyzer – Série GX*® ocorrem conforme a Organização Internacional de Normalização (ISO), utilizando o filtro recomendado na faixa de frequência de 10Hz a 1000Hz (SKF, 2019). Por este motivo, a norma (com valores já mostrados figura 6) pode ser usada para comparar o nível RMS da velocidade de vibração. Porém, o mesmo não pode ser dito sobre os dados relacionados ao envelope de aceleração, pois os equipamentos da

SKF possuem seus próprios limites de qualificação da vibração para a técnica de envelope (SKF, 2009).

3.2 REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES

As medições são feitas nos mancais de rolamento do lado acoplado e do lado oposto dos motores e bombas, exemplificados na figura 16:

Figura 16 - Esquematização dos pontos de medição em um conjunto motor-bomba

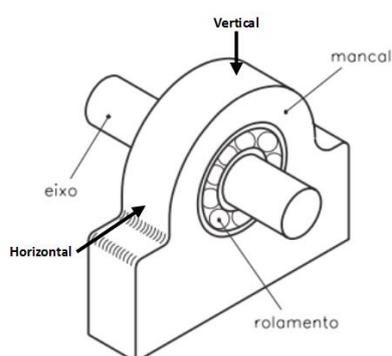


Fonte: Compesa.

Para cada motor ou bomba, a obtenção dos dados é feita a partir de medições em 2 pontos do mancal do lado oposto ao acoplamento (LO) e em 3 pontos no mancal mais próximo ao acoplamento, ou lado acoplado (LA).

Nos mancais do lado oposto ao acoplamento, a medição é feita nas direções vertical e horizontal, como mostra a figura 17:

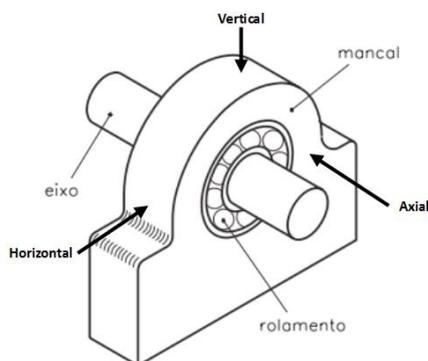
Figura 17 - Pontos de medição no mancal do lado oposto ao acoplamento



Fonte: adaptado de BARILLI, 2013.

Para os mancais próximos ao acoplamento, a medição é feita nas direções vertical, horizontal e axial, mostradas na figura 18:

Figura 18 - Pontos de medição no mancal lado próximo ao acoplamento



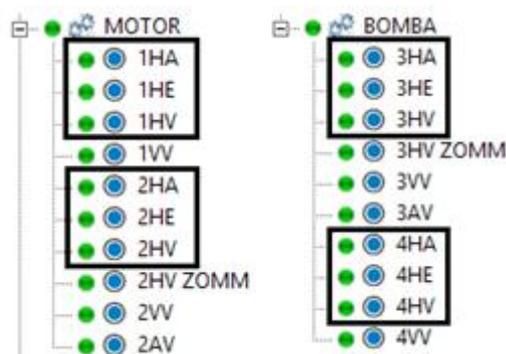
Fonte: adaptado de BARILLI, 2013.

Os dados recolhidos de aceleração, envelope de aceleração e velocidade de vibração são analisados com a utilização do programa *SKF @ptitude Analyst*®. Como em cada mancal de rolamento a medição é feita em duas ou três direções, os dados analisados serão os da direção horizontal, pois, além de ser mais próxima da zona de carga do rolamento, seus valores não são atenuados pela aceleração da gravidade, o que acontece com os dados obtidos na direção vertical.

3.3 LEITURA DOS DADOS

Após a obtenção dos dados através do *SKF Microlog Analyzer*®, ao serem transferidos para o *SKF @ptitude Analyst*®, eles são listados separadamente para cada equipamento, como mostra a figura 19.

Figura 19 - Lista dos dados no software SKF @ptitude Analyst



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

Em que:

- 1, 2, 3 e 4 representam a posição medida. São, respectivamente: mancal do lado oposto do motor, mancal do lado acoplado do motor, mancal do lado acoplado da bomba e mancal do lado oposto da bomba.
- H, V e A representam a direção da medição realizada e são, respectivamente, os dados obtidos pela medição na direção horizontal, vertical e axial.
- A, E e V são referentes à grandeza analisada, sendo relacionadas respectivamente à aceleração, envelope e velocidade.

Figura 20 - Esquema exemplificando os índices referenciados no SKF @ptitude Analyst



Fonte: O Autor, 2019.

Ou seja, ao selecionar este item 2HE, por exemplo, o usuário estaria acessando os dados do envelope da aceleração referentes à medição na direção horizontal do rolamento do lado acoplado do motor.

Ao selecionar um item, um histórico das medições naquela posição será exibido. Ao escolher a desejada, pode-se selecionar o tipo de plotagem através dos ícones mostrados na figura 21. Para este trabalho, mais especificamente, as opções utilizadas estão destacadas: opção de plotagem no domínio do tempo marcada na cor verde e domínio da frequência em vermelho.

Figura 21 - Opções de plotagem de gráfico do SKF @ptitude Analyst



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

3.4 METODOLOGIA PROPOSTA

Com o objetivo de avaliar o nível de desgaste dos rolamentos, algumas técnicas de análise de vibração citadas na fundamentação teórica foram aplicadas para avaliação dos sinais de vibração obtidos através das medições realizadas nos mancais.

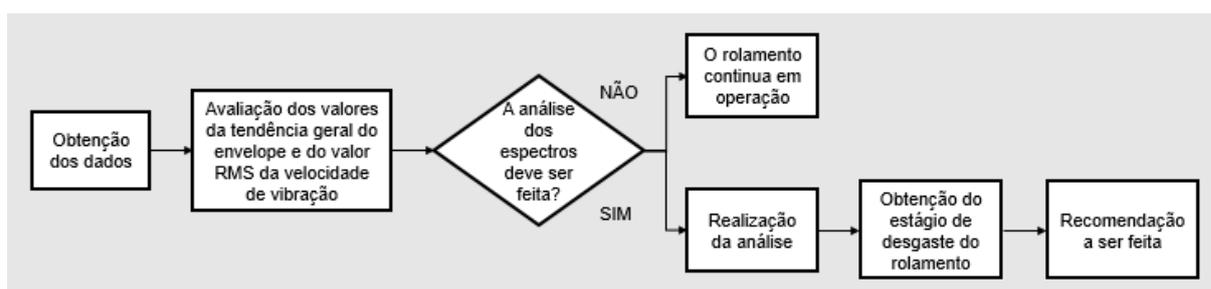
Dentre as técnicas citadas, três delas foram escolhidas pelo autor para a realização da análise:

- Análise da vibração pelo valor RMS da velocidade de vibração – Com os níveis sendo definidos na norma ISO 10816-3:2009, o valor é usado como um indicador para evidenciar potenciais problemas na máquina;
- Técnica do envelope – Mais precisamente, é utilizado o valor da tendência geral do envelope de aceleração. Também tem a função de um indicador para potenciais falhas em rolamentos.
- Análise do estado de desgaste do rolamento através da forma do espectro de vibração – Por meio desta técnica, os rolamentos podem ser analisados e terem seu nível de desgaste estipulado.

Fixando valores de alerta e alarme para o nível RMS e a tendência geral do envelope de aceleração, pode-se filtrar os mancais de rolamento analisados pela metodologia, evidenciando os que teoricamente estariam apresentando mais problemas. Depois disto, a análise do estado de desgaste do rolamento através dos espectros de vibração pode ser feita nos elementos que se mostram em situações mais críticas. Por fim, o estágio de desgaste para o rolamento avaliado é obtido e, a partir dele, uma recomendação deve ser feita.

A metodologia proposta procura facilitar situações em que o analisador tenha uma grande quantidade de mancais para avaliar, e é resumida no fluxograma a seguir:

Figura 22 - Fluxograma da metodologia



Fonte: O Autor, 2019.

A escolha da análise do espectro de vibração como etapa final para a classificação do estado do rolamento deve-se ao fato de que este tipo de análise pode ser feito a partir de qualquer tipo de dados. Ou seja, independentemente dos filtros utilizados pela ferramenta de medição ou técnicas listadas no referencial teórico, a análise do espectro teoricamente apontará para o mesmo estado de desgaste do rolamento. Além disso, a análise do espectro possibilita saber onde as falhas estão presentes, através das frequências características de falha do rolamento.

A metodologia a ser utilizada será mostrada passo a passo na sequência.

3.4.1 Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração

Como já citado anteriormente, a norma ISO 10816-3:2009 define a condição de operação de uma máquina por meio do valor RMS da sua velocidade de vibração.

Para a aplicação da norma, primeiramente é necessário saber a classificação da máquina em questão. Dentro das características citadas na norma (mostrada na seção 2.3.1.2), os motores e bombas a serem analisados neste trabalho são considerados máquinas do grupo 2, e com a base rígida. Portanto, a partir da figura 6, pode-se definir as seguintes classificações para o valor RMS da velocidade de vibração:

Tabela 2 - Relação da norma para o valor RMS e a condição de operação da máquina

Valor RMS da velocidade de vibração (mm/s)	Condição da máquina
$RMS \leq 1,4$	Boa
$1,4 < RMS \leq 2,8$	Satisfatória
$2,8 < RMS \leq 4,5$	Insatisfatória
$RMS > 4,5$	Inaceitável

Fonte: O Autor, 2019.

Por meio desta tabela, pode-se então classificar a condição de operação de uma máquina a partir de um dado valor RMS da velocidade de vibração, além de criar alertas ou alarmes para situações que indiquem uma condição operacional insatisfatória ou inaceitável.

3.4.2 Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope

Uma vez que os dados utilizados foram obtidos através do *SKF Microlog Analyzer*®, deve-se levar em conta as recomendações da SKF para classificar o sinal de vibração do mancal de rolamento quanto à técnica de envelope. As leituras de vibração de rolamento devem ser comparadas com limites fornecidos pela SKF, limites estes estipulados com base em anos de análise estatística de bancos de dados existentes (SKF, 2009):

Tabela 3 - Gravidade do nível de vibração - técnica de envelope

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

Fonte: SKF, 2009.

Portanto, dependendo do valor da tendência geral do envelope, o nível da vibração pode ser classificado em 3 níveis diferentes. Onde CL é a “classificação de aceleração de envelope” e deve ser utilizada a que melhor se aproximar das características do rolamento mensurado (SKF, 2009):

- CL 1: Rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 200 mm e 500 mm e velocidade do eixo abaixo de 500 RPM;
- CL 2 (padrão): Rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 200 mm e 300 mm e velocidade do eixo entre 500 RPM e 1800 RPM.
- CL 3: Rolamentos com um diâmetro de orifício do rolamento entre 20 mm e 150 mm e velocidade do eixo de 1800 RPM a 3600 RPM.

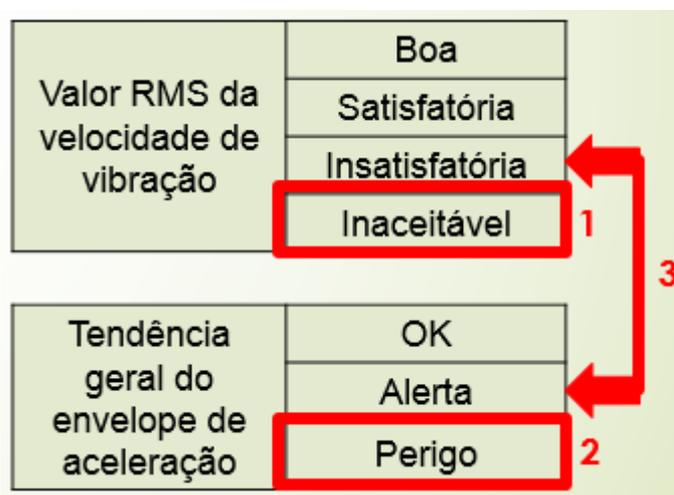
3.4.3 Decisão sobre a análise

O próximo passo proposto pela metodologia é avaliar os resultados obtidos pelos dois fatores para a tomada de decisão sobre a opção ou não da avaliação. A

partir da classificação dos dois fatores, a metodologia recomenda que a análise de vibração seja feita se uma das três condições acontecerem:

1. O valor RMS da velocidade de vibração classificar a condição de operação da máquina como inaceitável;
2. O valor da tendência geral do sinal do envelope classificar o nível de vibração como perigoso;
3. O valor RMS da velocidade de vibração classificar a condição de operação da máquina como insatisfatória e o valor da tendência geral do envelope classificar o sinal de vibração na faixa de alerta.

Figura 23 - Situações onde a análise deve ser feita



Fonte: O Autor, 2019.

3.4.4 Realização da análise

Como já citado no item 2.3.3 do presente trabalho, um rolamento em determinado estado de desgaste tem uma forma específica para seu espectro de vibração. Ao ter este sinal avaliado, um rolamento pode ser classificado em 4 níveis diferentes de desgaste, e, a partir disto, uma ação pode ser recomendada.

Nesta mesma análise, pode-se também detectar onde as prováveis falhas do rolamento estão se concentrando. Por meio das frequências de falhas do componente do rolamento, o espectro de vibração poderá mostrar se as falhas encontram-se na pista externa, interna, elementos rolantes, ou gaiola.

Deste modo, a análise será feita levando em conta os espectros de aceleração de vibração, envelope de aceleração e velocidade de vibração.

Através do espectro de aceleração será observado o comportamento das amplitudes nas frequências naturais de ressonância do rolamento.

No espectro da aceleração de envelope, pode-se visualizar mais facilmente em qual de suas harmônicas as frequências fundamentais de falha do rolamento aparecem. Além disto, por ser resultante de uma técnica capaz de evidenciar falhas inerentes ao rolamento, a localização dos danos também será determinada através do sinal do envelope de aceleração.

Por meio do espectro de velocidade de vibração, informações adicionais podem ser obtidas para a análise. Além de poder evidenciar características de alguns dos 4 estágios de desgaste, o espectro de velocidade pode também indicar problemas de montagem.

A combinação das informações obtidas, quando comparadas aos estágios descritos no tópico 2.3.3 evidenciará um nível de desgaste para o rolamento, e, por meio dele, pode-se definir uma ação a ser tomada.

A tabela a seguir relaciona o estágio de desgaste do rolamento com o risco de falha do mesmo e a ação a ser tomada para cada situação:

Tabela 4 - Estágio de desgaste do rolamento relacionado à possibilidade de falha e ações recomendadas

Estágio de desgaste	Risco de ocorrer falha	Recomendação
Estágio 1	Baixo	Continuar inspeções preditivas normalmente
Estágio 2	Moderado	Continuar inspeções preditivas normalmente
Estágio 3	Alto	Realizar a troca do rolamento nos próximos 30 ou 45 dias
Estágio 4	Muito alto	Realizar a troca do rolamento o mais rápido possível

Fonte: O Autor, 2019.

4 RESULTADOS

Para testar a metodologia proposta, três casos práticos são mostrados. Nesta seção são avaliados os sinais de vibração de três rolamentos que depois de retirados de operação puderam ser abertos e passar por uma análise de falha em suas superfícies internas. Posteriormente à análise, esta inspeção visual do rolamento será comparada com os dados obtidos pelo sinal de vibração.

As imagens e dados apresentados foram obtidos pelo autor em seu tempo como estagiário da equipe de manutenção preditiva da gerência de manutenção mecânica da Compesa.

4.1 CASO 1

Rolamento rígido de esferas – NSK – modelo 6319/C3. Rolamento do lado oposto de um motor do fabricante WEG, modelo 355M/L.

Dados:

Tabela 5 - Dados referentes ao rolamento 1

Frequência de rotação do eixo	1770 rpm
Diâmetro interno do rolamento	95 mm
Valor RMS da velocidade de vibração	1,439 mm/s
Valor da tendência geral do envelope de aceleração	6,18 gE
Data da última inspeção	10/05/2018

Fonte: O Autor, 2019.

Por meio da consulta da lista de frequências características de defeito de rolamentos utilizando-se a referência do mesmo, pode-se listar, em valores múltiplos da frequência de rotação (NTN, 2019):

Tabela 6 - Frequências características de falha para o rolamento 1

BPFO (pista externa)	BPMF (pista interna)	BSF (elementos rolantes)	FTF (gaiola)
3,1	4,9	0,39	2,1

Fonte: O Autor, 2019

4.1.1 Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração

Ao consultar a tabela 2, um valor de 1,439 mm/s classifica a condição da máquina como satisfatória.

4.1.2 Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope

Antes de consultar a tabela 3, deve-se classificar o rolamento em uma das três classes mostradas.

Um rolamento com diâmetro interno de 95mm e rotação de 1770 rpm aproxima-se mais das características da classe CL3. Com isso, a tendência geral do envelope de aceleração de 6,18 gE classifica o nível de vibração do rolamento na faixa de alerta.

4.1.3 Decisão sobre a análise

Figura 24 - Classificação dos índices para o rolamento 1

Valor RMS da velocidade de vibração	Boa	Tendência geral do envelope de aceleração	OK
	Satisfatória		Alerta
	Insatisfatória		Perigo
	Inaceitável		

Fonte: O Autor, 2019.

Portanto, seguindo a metodologia proposta, a análise do espectro de vibração do rolamento em questão não seria necessária. Porém, para efeito de confirmação da metodologia, a análise será realizada.

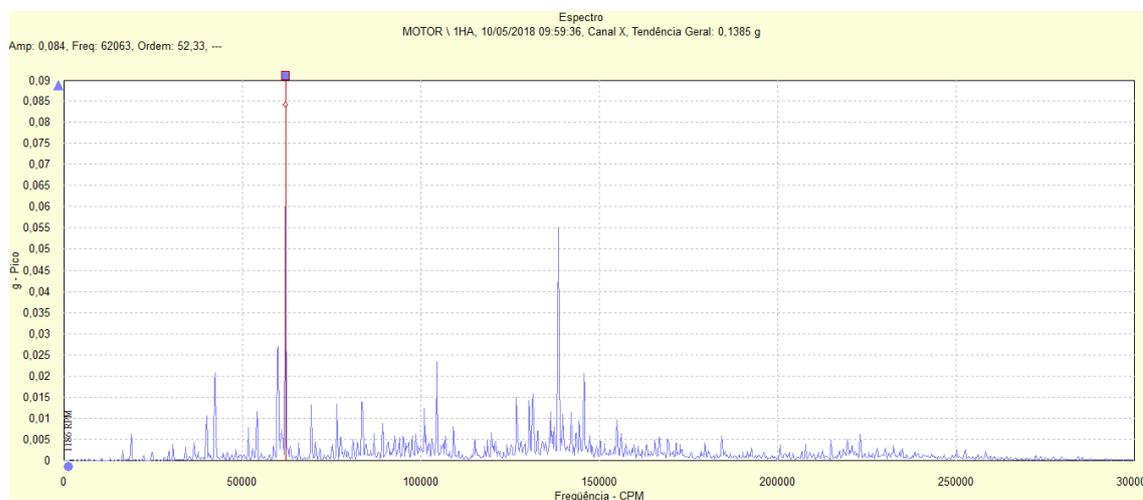
4.1.4 Realização da análise

A partir da forma dos espectros de vibração pode-se retirar conclusões sobre o estado do rolamento.

A forma do espectro de aceleração de vibração, visto no gráfico 11, é característica de um rolamento no estágio 2 de desgaste, onde as amplitudes nas

frequências naturais de ressonância do rolamento (definidas no item 2.3.3) começam a crescer.

Gráfico 11 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 1

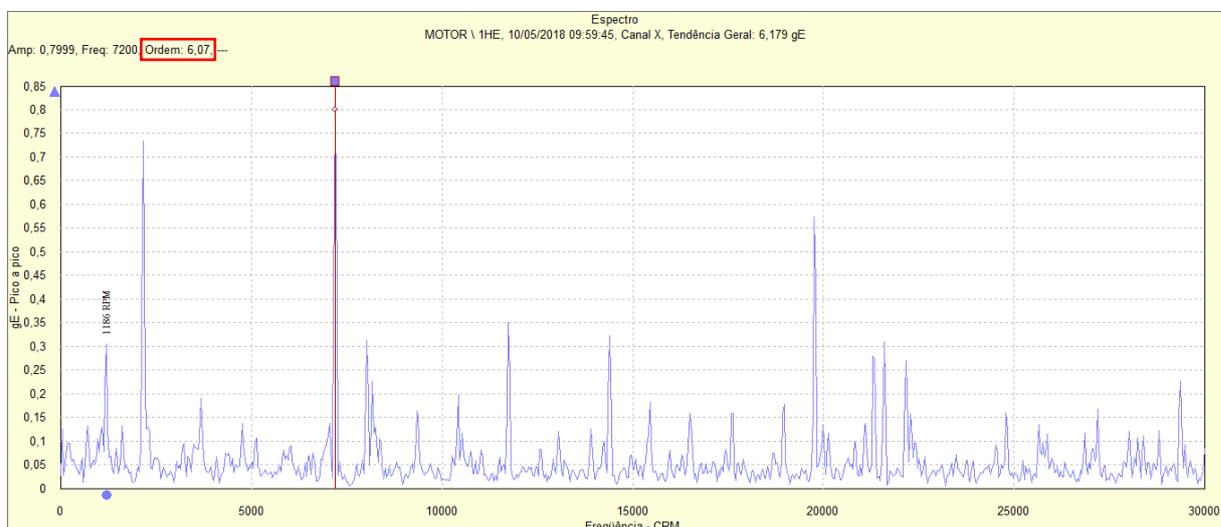


Fonte: SKF @ptitude Analyst.

O espectro do envelope de aceleração, juntamente com as frequências características de defeito, pode detectar a localização de falhas no rolamento.

Observa-se no gráfico 12 a presença de um pico em uma harmônica de uma das frequências características de defeito do rolamento, onde o indicador está posicionado. O pico está situado em uma frequência de ordem 6,07 (destacado em vermelho na figura), aproximadamente duas vezes a BPFO (igual a 3,01). Trata-se, portanto, da 2ª harmônica da BPFO (2xBPFO), indicando a presença de pequenas falhas na pista externa do rolamento, confirmando o estágio 2 de desgaste.

Gráfico 12 - Espectro do envelope de aceleração do rolamento 1

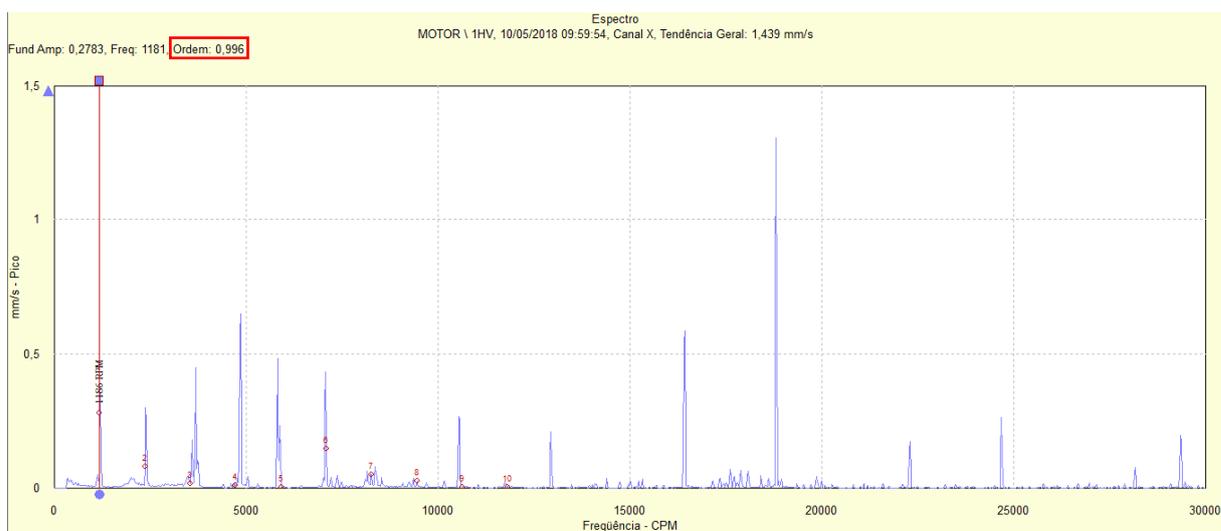


Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

Por último, é realizada a consulta do espectro da velocidade.

O espectro da velocidade de vibração, visto no gráfico 13 não mostra pontos de maior amplitude nas frequências características do rolamento, apenas na frequência de rotação do eixo (ordem 1, valor aproximado, destacado em vermelho) e suas harmônicas. Esta configuração indica a presença de folgas mecânicas na máquina.

Gráfico 13 - Espectro da velocidade de vibração do rolamento 1



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

Portanto, a partir da análise dos espectros, pode-se dizer que o rolamento se encontra no estágio 2 de desgaste, com os danos concentrados na pista externa do rolamento. Para um rolamento no 2º estágio de desgaste o índice de possibilidade de falha é moderado, portanto, nenhuma recomendação adicional deve ser feita e o rolamento deveria continuar operando normalmente.

4.1.5 Análise de falha do rolamento

Apesar de os dados coletados no dia 10/05/2018 não terem mostrado necessidade de troca dos rolamentos, o motor saiu de operação no dia 24/06/2018 para passar por uma revisão geral e foi decidido pela troca dos rolamentos, já que o equipamento estaria parado.

Diante da oportunidade, a equipe de manutenção preditiva da coordenação de manutenção mecânica da Compesa decidiu recolher os rolamentos para análise, de

forma a melhorar a base de conhecimento para o processo de análise de falha de rolamentos, que, naquele momento, era uma nova atividade para a equipe.

A maior dificuldade encontrada no procedimento foi a falta de ferramentas adequadas para o corte do rolamento, tendo que ser feito com oxicorte (maçarico), prejudicando um pouco o procedimento de análise ao impossibilitá-la na região removida e dificultá-la na zona termicamente afetada.

Depois do corte, a inspeção visual de cada elemento do rolamento pôde ser realizada. As avaliações da pista interna, da pista externa e da gaiola e elementos rolantes são mostradas a seguir.

A figura 25 mostra a pista interna em boas condições nas regiões em que a inspeção visual foi possível. Algumas manchas são encontradas na superfície (provavelmente causada pelo lubrificante dentro do rolamento na hora do uso do maçarico), mas não foi detectada a presença de danos ou marcas de trabalho dos elementos rolantes.

Figura 25 - Pista interna do rolamento 1



Fonte: O Autor, 2019.

A pista externa do rolamento é mostrada na figura 26, exibindo pequenas falhas localizadas (destacadas em vermelho), provavelmente devido à aplicação de força errada no procedimento de montagem ou causadas por o motor ter passado muito tempo parado.

Figura 26 - Pista externa do rolamento 1



Fonte: O Autor, 2019.

A gaiola e os elementos rolantes são vistos na figura 26 e 27, e mostram-se em bom estado, sem marcas de desgaste aparente. As regiões da gaiola com coloração mais escura e perda de material são resultantes do processo de corte indevido realizado com a chama do maçarico.

Figura 27 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 1



Fonte: O Autor, 2019.

Portanto, devido à pista externa mostrar pequenas falhas, o estado de desgaste referente ao rolamento é o estágio 2.

4.1.6 Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento

Tabela 7 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 1

Previsão pela análise dos espectros	Situações observadas na análise de falha
Estágio 2 de desgaste	Estágio 2 de desgaste
Presença de falhas na pista externa do rolamento	Presença de falhas na pista externa do rolamento
Presença de folgas mecânicas na máquina	

Fonte: O Autor, 2019.

A análise de falha neste caso apontou todos os problemas esperados após a análise dos espectros de vibração. Além disso, a análise dos espectros mostrou também uma informação adicional: a presença de folgas mecânicas no motor em questão.

Portanto, como os dois apontaram para um estágio 2 de desgaste, pode-se afirmar que a análise dos espectros se mostrou uma ferramenta eficaz para avaliação do nível de desgaste. Observa-se também que, apesar de o rolamento ter passado

quase 1 mês e meio operando, não mostrou evolução no seu estado de desgaste previsto.

4.2 CASO 2

Rolamento rígido de esferas – NTN – modelo 6322/C3. Rolamento do lado acoplado de um motor do fabricante WEG, modelo 355M/L (mesmo motor do caso 1).

De forma análoga ao caso 1, as frequências características do rolamento são obtidas através da referência do mesmo e são mostradas na tabela 8 junto com os outros dados.

Tabela 8 - Dados referentes ao rolamento 2

Frequência de rotação do eixo	1770 rpm
Diâmetro interno do rolamento	110 mm
Valor RMS da velocidade de vibração	1,545 mm/s
Valor da tendência geral do envelope de aceleração	7,79 gE
Data da última inspeção	10/05/2018
BPFO (pista externa)	3,06
BPFI (pista interna)	4,94
BSF (elementos rolantes)	0,38
FTF (gaiola)	2,02

Fonte: O Autor, 2019.

4.2.1 Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração

Ao consultar a tabela 2, um valor de 1,545 mm/s classifica a condição da máquina como satisfatória.

4.2.2 Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope

Com um diâmetro interno de 110mm e rotação de 1770 rpm, o rolamento aproxima-se mais das características da classe CL3. Uma tendência geral do

envelope de aceleração de 7,79 gE, ao consultar a tabela 3, classifica o nível de vibração do rolamento na faixa de alerta.

4.2.3 Decisão sobre a análise

Figura 28 - Classificação dos índices para o rolamento 2

Valor RMS da velocidade de vibração	Boa	Tendência geral do envelope de aceleração	OK
	Satisfatória		Alerta
	Insatisfatória		Perigo
	Inaceitável		

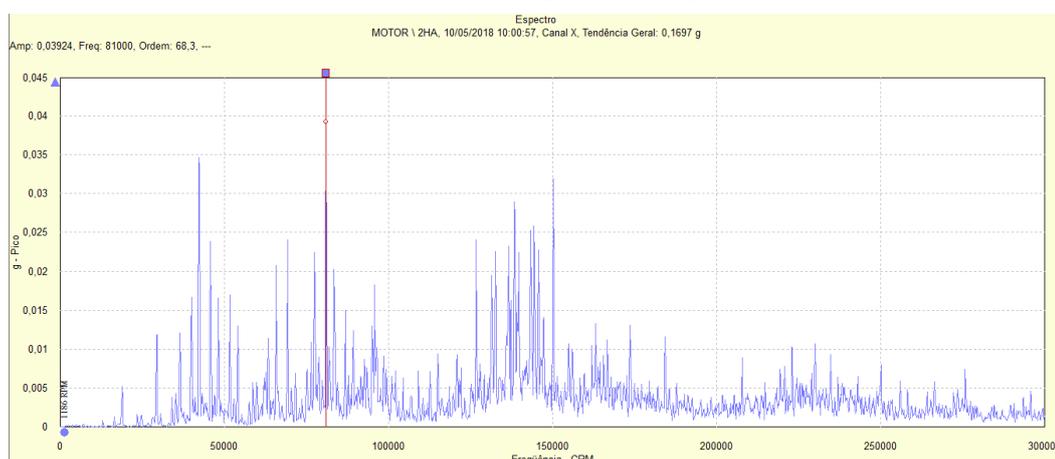
Fonte: O Autor, 2019.

Seguindo a metodologia, a análise do espectro de vibração do rolamento em questão não seria necessária. Porém, pelo mesmo motivo do caso 1, ela será feita.

4.2.4 Realização da análise

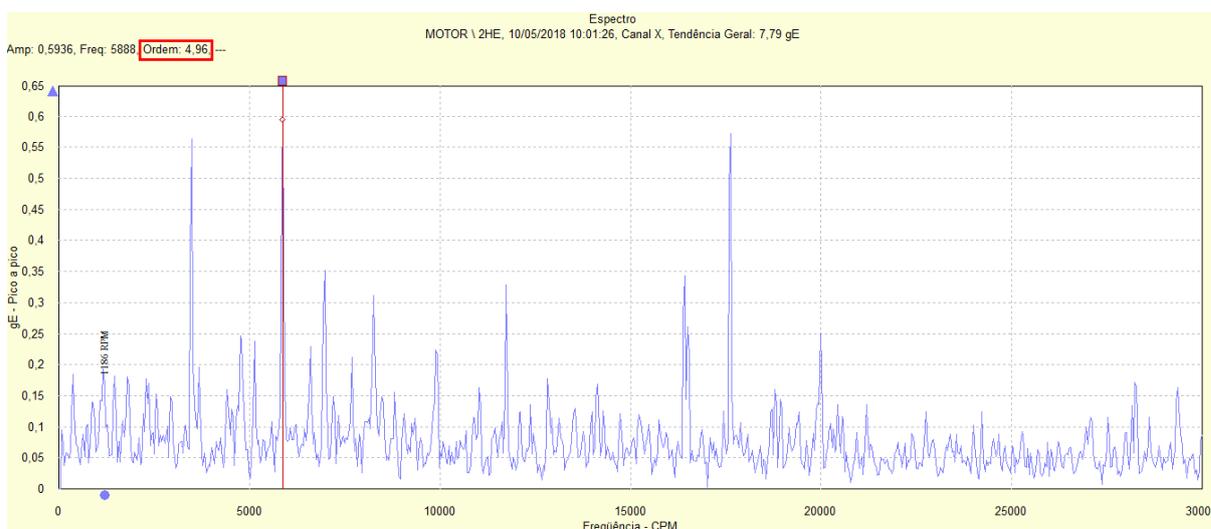
O espectro de aceleração de vibração (gráfico 14) mostra as frequências naturais de ressonância do rolamento com amplitudes relativamente altas, mas não fica claro se o estágio de desgaste em questão é o 2º ou 3º. Por outro lado, o espectro de envelope (gráfico 15) mostra seu maior pico por volta da BPFO (ordem 4,96, destacado em vermelho), configurando danos na pista interna em um estágio um pouco avançado, uma vez que aparece na primeira faixa de frequências, configurando o estágio 3 de desgaste.

Gráfico 14 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 2



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

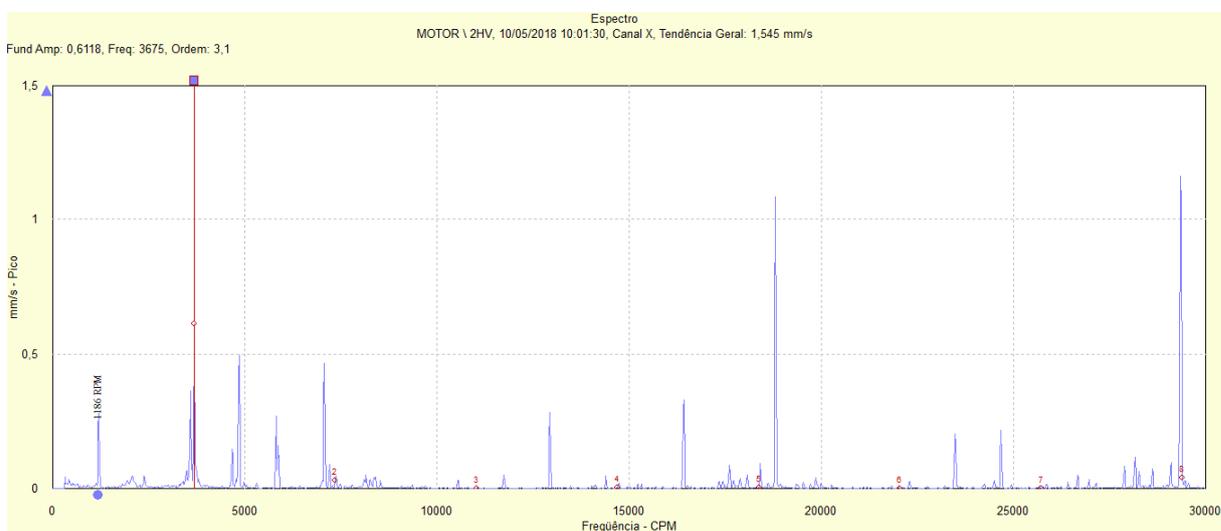
Gráfico 15 - Espectro do envelope de aceleração do rolamento 2



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

O espectro de velocidade de vibração (gráfico 16) mostra picos nas frequências características da pista interna e externa, classificando o rolamento no nível 2 de desgaste em diante.

Gráfico 16 - Espectro de velocidade de vibração do rolamento 2



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

Portanto, pela combinação de informações obtida pela análise dos espectros, pode-se dizer que o rolamento se encontra no estágio 3 de desgaste. Para um rolamento neste estágio, recomenda-se que a sua troca seja feita dentro de 30 ou 45 dias.

4.2.5 Análise de falha do rolamento

Por ser um rolamento do mesmo motor do caso 1, tem-se as mesmas condições do caso anterior: as medições de vibração foram feitas no dia 10/05/2018 e o motor operou até o dia 24/06/2018. Novamente, a análise foi comprometida pelo processo indevido de corte do rolamento, porém, a presença de danos é evidente.

A pista interna do rolamento, mostrada nas figuras 29 e 30, apresenta pontos com danos por escamamento (regiões destacadas em vermelho). Além disso, a pista mostra marcas de trabalho evidentes na região onde os elementos rolantes operam.

Figura 29 - Pista interna do rolamento 2



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 30 - Pista interna do rolamento 2



Fonte: O Autor, 2019.

A pista externa do rolamento, vista na figura 31, mostra apenas marcas de trabalho, mas menos intensas quando comparadas às encontradas na pista interna.

Figura 31 - Pista externa do rolamento 2



Fonte: O Autor, 2019

A gaiola e os elementos rolantes do rolamento (figura 32) apresentaram um bom estado. A coloração escura de alguns elementos rolantes e as suas respectivas regiões da gaiola é resultado do uso indevido do maçarico para o processo de corte. Além disto, algumas pequenas marcas nos elementos rolantes são resquícios de graxa que não puderam ser completamente removidos pelo desengraxante.

Figura 32 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 2



Fonte: O Autor, 2019.

A avaliar pelos danos, devido à pista interna apresentar pontos com danos por escamamento, o rolamento estaria no nível 3 de desgaste quando foi retirado de operação.

4.2.6 Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento

Tabela 9 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 2

Previsão pela análise dos espectros	Situações observadas na análise de falha
Estágio 3 de desgaste	Estágio 3 de desgaste
Presença de falhas mais desenvolvidas na pista interna do rolamento	Presença de falhas mais desenvolvidas na pista interna do rolamento
	Presença de falhas mais leves na pista externa do rolamento

Fonte: O Autor, 2019.

A análise de falha novamente confirmou a presença da falha mais desenvolvida na pista interna do rolamento apontada pela análise dos espectros. Além disso, danos mais leves também foram observados na pista externa do rolamento (marcas de trabalho).

Os danos mais leves na pista externa do rolamento, não detectados na análise dos espectros, podem ter sido gerados posteriormente à obtenção dos dados, uma vez que o rolamento passou quase 1 mês e meio operando depois disto.

Portanto, com os dois mostrando um estágio 3 de desgaste, pode-se afirmar que a análise dos espectros apresentou resultados satisfatórios.

4.3 CASO 3

Rolamento rígido de esferas – NTN – modelo 6320/C3. Rolamento do lado oposto de uma bomba fabricante KSB, RDL 350-620 A.

Dados:

Tabela 10 - Dados referentes ao rolamento 3

Frequência de rotação do eixo	1180 rpm
Diâmetro interno do rolamento	100 mm
Valor RMS da velocidade de vibração	7,107 mm/s

Valor da tendência geral do envelope de aceleração	26,3 gE
Data da última inspeção	06/06/2018
BPFO (pista externa)	3,07
BPFI (pista interna)	4,93
BSF (elementos rolantes)	0,38
FTF (gaiola)	2,04

Fonte: O Autor, 2019.

4.3.1 Classificação da condição de operação da máquina pelo valor RMS da velocidade de vibração

Ao consultar a tabela 2, o valor de 7,107mm/s para o RMS da velocidade de vibração classifica a condição da máquina como inaceitável. Portanto, pela metodologia sugerida, a análise do sinal de vibração do rolamento já deveria ser feita, independentemente do que a tendência geral do envelope de aceleração sugerir.

4.3.2 Classificação do nível de vibração através da técnica de envelope

Com um diâmetro interno de 100mm e rotação de 1180 rpm, o rolamento não se aproxima de nenhuma das classes (CL3 seria mais aceitável), porém, com uma tendência geral do envelope de aceleração igual a 26,3 gE, ao consultar a tabela 3, o nível de vibração do rolamento é classificado com sobras na faixa de perigo.

4.3.3 Decisão sobre a análise

Figura 33 - Classificação dos índices para o rolamento 3

Valor RMS da velocidade de vibração	Boa	Tendência geral do envelope de aceleração	OK
	Satisfatória		Alerta
	Insatisfatória		Perigo
	Inaceitável		

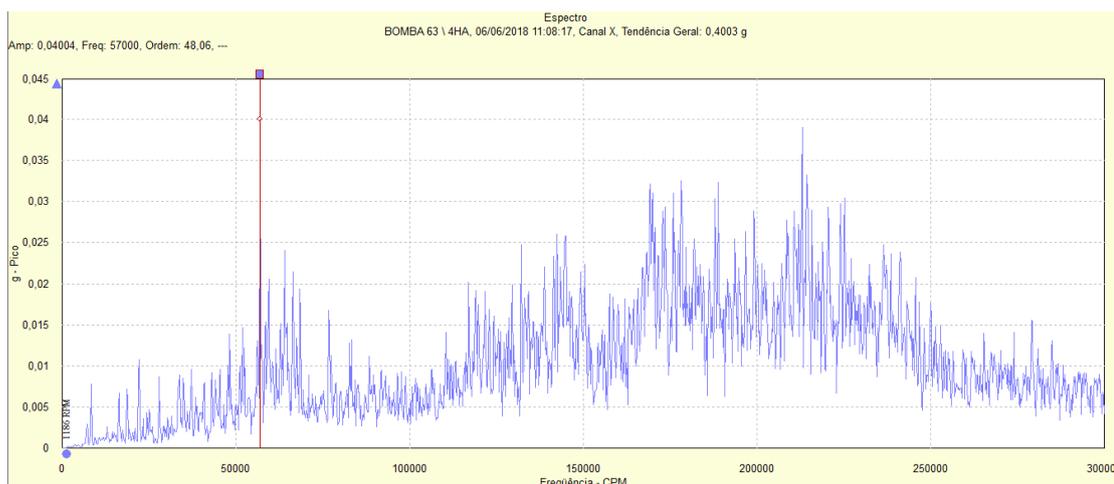
Fonte: O Autor, 2019.

Segundo a metodologia proposta, a análise do espectro de vibração do rolamento deve acontecer.

4.3.4 Realização da análise

O espectro de aceleração de vibração (gráfico 17) mostra uma vibração randômica na região das frequências naturais de ressonância do rolamento. Esta forma do gráfico é típica de um rolamento no estágio 4 de defeito.

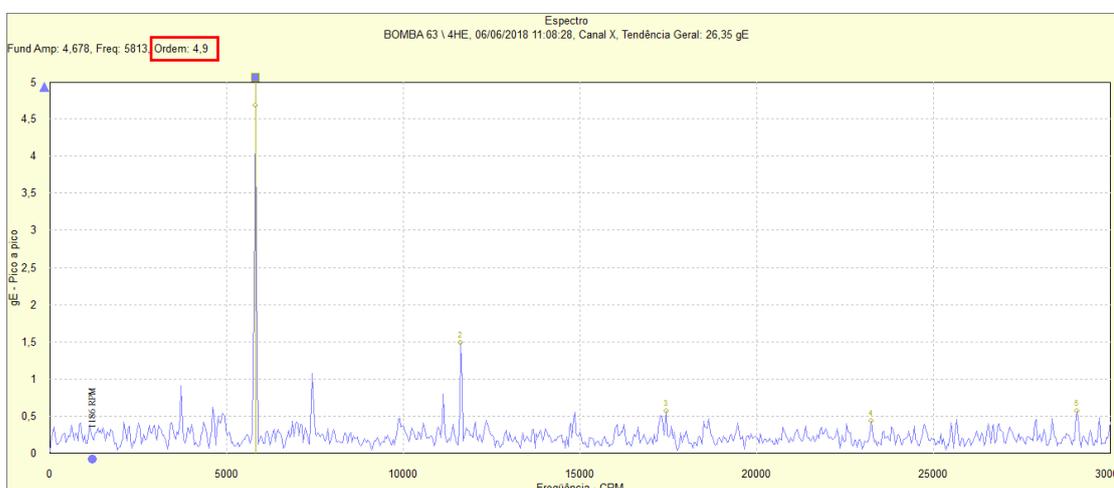
Gráfico 17 - Espectro de aceleração de vibração do rolamento 3



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

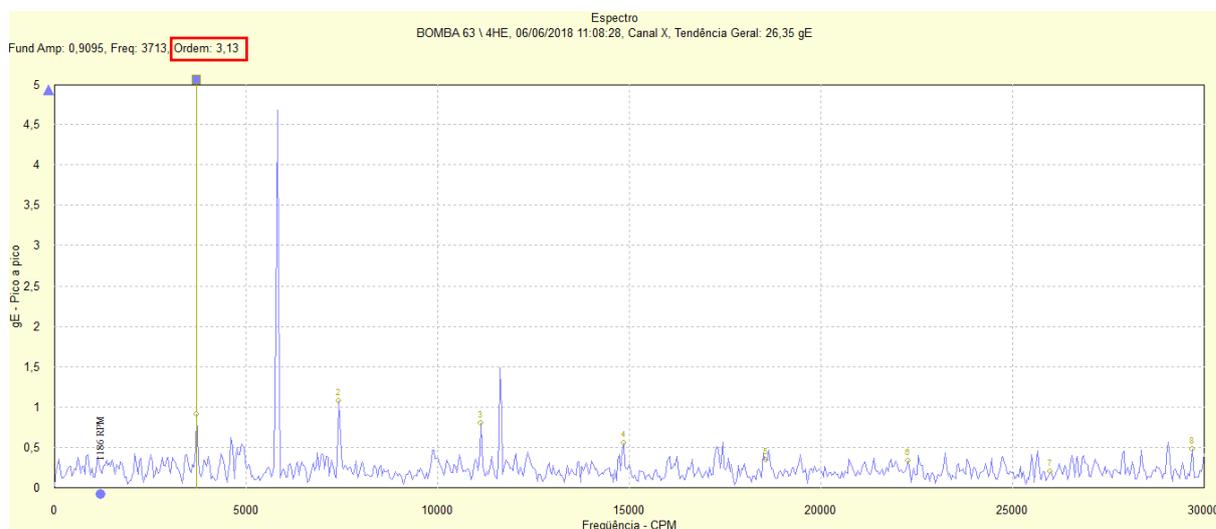
O espectro do envelope de aceleração (gráficos 18 e 19) mostra picos próximos tanto da frequência característica da pista externa e harmônicas quanto da frequência característica da pista interna e suas harmônicas, caracterizando danos em estágio avançado nas duas pistas, porém, com a pista interna apresentando uma amplitude muito maior, e, conseqüentemente, um dano ainda maior que a pista externa.

Gráfico 18 - Espectro de envelope de aceleração do rolamento 3 evidenciando a BPFI e suas harmônicas



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

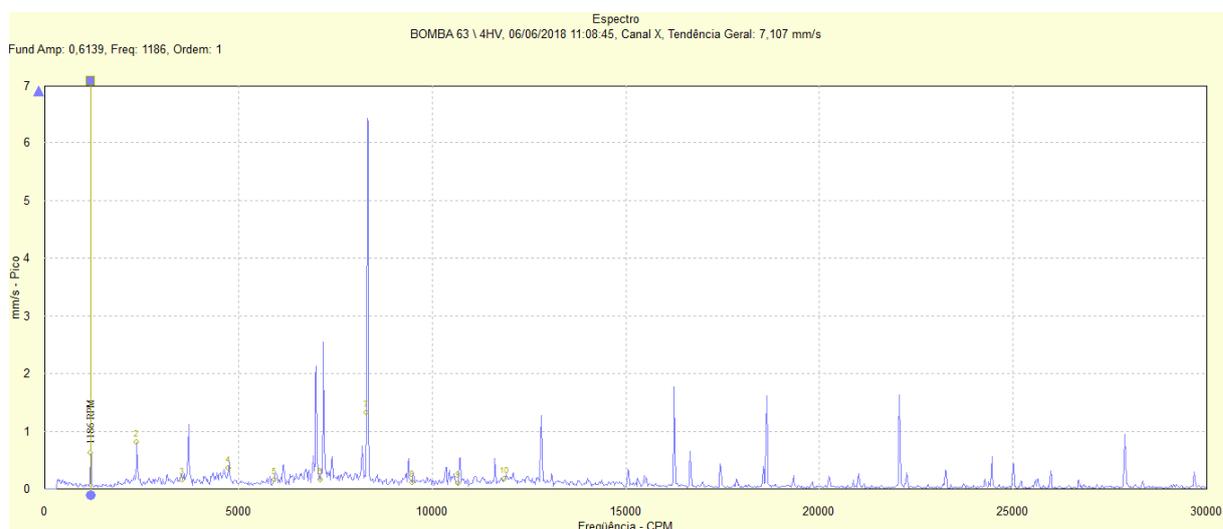
Gráfico 19 - Espectro de envelope de aceleração do rolamento 3 evidenciando a BPFO e suas harmônicas



Fonte: adaptado de SKF @ptitude Analyst.

O espectro de velocidade de vibração (gráfico 20) mostra picos na frequência de rotação do eixo e suas harmônicas, configurando um espectro indicador da presença de folgas mecânicas. Neste caso, como o rolamento encontra-se no nível 4 de desgaste, existe a possibilidade de estas folgas não serem devido à montagem da máquina, pois podem ser inerentes ao próprio rolamento: no nível 4 o rolamento está tão desgastado que passa por mudanças de geometria, podendo resultar em amplitudes nas harmônicas do espectro de vibração.

Gráfico 20 - Espectro de velocidade de vibração do rolamento 3



Fonte: SKF @ptitude Analyst.

Portanto, a análise dos espectros mostra claramente que o rolamento no momento da medição estava no nível de desgaste 4. Neste caso, a recomendação seria a troca do rolamento o mais rápido possível.

4.3.5 Análise de falha do rolamento

A última inspeção da bomba em questão foi realizada no dia 06/06/2018, porém, ela ficou em operação até o dia 14/08/2018. Neste dia, a bomba passou por um processo de troca de seus rolamentos, sugerido pela equipe de manutenção preditiva devido à detecção de valores muito elevados para a tendência geral do envelope de aceleração nos dois mancais da bomba.

Após a troca, os rolamentos antigos deveriam ser levados para a realização da análise de falha, com o objetivo de investigar a causa da grande deterioração dos mesmos. Porém, isto não foi possível para o rolamento do lado acoplado, por este ter sido comprometido durante o processo de remoção.

A análise mostrou danos em estágio avançado no rolamento. Na pista do anel interno, apresentada na figura 34, mostrou perda de material por escamamento na região central da pista (danos vistos na figura 35), resultante da evolução de entalhes causados inicialmente na pista por um fenômeno chamado de “entalhamento”. Pela distribuição dos danos ao longo de toda a pista, estima-se que os entalhes iniciais tenham sido causados pela presença de partículas estranhas dentro do rolamento.

Figura 34 - Pista interna do rolamento 3



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 35 - Vista aproximada dos danos mostrados na figura 19



Fonte: O Autor, 2019.

A pista do anel externo (figura 36) mostrou danos causados por um fenômeno chamado “corrosão profunda” (figura 37), que ocorre quando a camada protetora do óxido formada na superfície do aço é penetrada por água ou elementos corrosivos, resultando na formação de manchas em alguns pontos das superfícies do rolamento. Os danos estão concentrados em pontos específicos, além de coincidir com o espaçamento entre os elementos rolantes. Isto evidencia que a falha é resultante ação de elementos corrosivos enquanto o rolamento estava parado. Este tipo de dano é perigoso, pois pode iniciar escamamento e fraturas.

Figura 36 - Pista externa do rolamento 3



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 37 - Vista aproximada dos danos mostrados na figura 21



Fonte: O Autor, 2019.

A gaiola apresentou danos por corrosão em alguns pontos (figura 38), o que pode ser causado pela ineficácia da vedação, possibilitando a entrada de água ou agentes corrosivos nas superfícies do rolamento. Alguns elementos rolantes apresentaram o mesmo tipo de danos observado na pista externa (figura 39).

Figura 38 - Gaiola e elementos rolantes do rolamento 3



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 39 - Elemento rolante do rolamento 3



Fonte: O Autor, 2019.

Portanto, assim como a análise dos espectros, a análise de falha aponta para o estágio 4 de desgaste.

4.3.6 Comparação: Análise dos espectros e análise de falha do rolamento

Tabela 11 - Comparação dos resultados obtidos para o rolamento 3

Previsão pela análise dos espectros	Situações observadas na análise de falha
Estágio 4 de desgaste	Estágio 4 de desgaste
Danos severos nas duas pistas, porém, maiores na pista interna	Danos severos nas duas pistas, porém, maiores na pista interna
	Danos nos elementos rolantes
	Danos por corrosão na gaiola

Fonte: O Autor, 2019.

A análise de falha confirmou a presença dos danos previstos pela análise dos espectros e mostrou também danos nos elementos rolantes e danos por corrosão na gaiola, estes, que não foram detectados pela análise dos espectros.

Os danos observados nos elementos rolantes e gaiola, não detectados na análise dos espectros, podem ter depois da obtenção dos dados, já que o rolamento passou mais de 2 meses operando depois disto.

Como a inspeção visual confirma o estágio 4 de desgaste previsto, pode-se afirmar que a análise dos espectros apresentou resultados satisfatórios.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A tabela a seguir mostra um resumo dos resultados obtidos através da metodologia e as situações encontradas na análise de falha dos rolamentos avaliados:

Tabela 12 - Comparação de resultados obtidos através da metodologia proposta e da análise de falhas

Casos avaliados	Necessidade de análise dos espectros	Situações apontadas pela análise dos espectros	Situações observadas pela análise de falha
Caso 1	Não	Rolamento no estágio 2 de desgaste; Presença de falhas na pista externa do rolamento; Presença de folgas mecânicas na máquina.	Pequenas falhas localizadas na pista externa do rolamento (configurando o estágio 2 de desgaste).
Caso 2	Não	Rolamento no estágio 3 de desgaste; Presença de falhas na pista interna do rolamento.	Pista interna do rolamento apresentando danos por escamamento (configurando o estágio 3 de desgaste); Marcas de trabalho na pista externa.

Caso 3	Sim	<p>Rolamento no estágio 4 de desgaste;</p> <p>Danos severos nas duas pistas, porém, maiores na pista interna.</p>	<p>Pista interna com severos danos por escamamento em vários pontos (configurando o estágio 4 de desgaste);</p> <p>Pista externa e elementos rolantes apresentando danos por corrosão profunda;</p> <p>Gaiola apresentando danos por corrosão em alguns pontos.</p>
---------------	-----	---	---

Fonte: O Autor, 2019.

Portanto, apesar de os rolamentos terem passado mais tempo trabalhando desde a obtenção dos dados, em todos os casos a análise de falhas evidenciou os mesmos problemas apontados pela análise dos espectros de vibração.

Um problema detectado na metodologia para os três casos mostrados é no caso 2. Como mostra a tabela 12, os índices estipulados fizeram com que a metodologia aconselhasse a não avaliação dos espectros, mas, no final, foi apontado o nível 3 de desgaste para este rolamento. Ou seja, neste caso, a metodologia deveria ter proposto a avaliação dos espectros, que não foi feita por que os valores fixados como alerta e alarme para os índices responsáveis pelo filtro dos casos mais críticos não foram ultrapassados. Uma possível solução para este problema na metodologia é alteração dos valores fixados como alerta e alarme, que pode ser feita com um melhor embasamento, através do estudo de um maior número de casos.

5 CONCLUSÕES

A manutenção preditiva é uma ferramenta essencial para a produtividade de uma empresa. Através dela, os processos de produção podem ser otimizados, uma vez que as condições de funcionamento das máquinas podem ser monitoradas a fim de extrair delas uma maior eficiência e maior tempo de vida útil.

O presente trabalho fez uso da manutenção preditiva, por meio de técnicas de análise de vibração, para determinar o estágio de desgaste de rolamentos em mancais de motores e bombas. A partir disto, é possível tomar medidas para evitar a falha dos componentes, resultando em um maior aumento de produção e redução de paradas inesperadas dos equipamentos.

A metodologia apresentada combinou técnicas para análise de vibração de mancais de rolamento de uma forma simples e eficaz, utilizando parâmetros para quantificar o sinal de vibração, permitindo evidenciar as condições mais críticas em situações onde há uma grande quantidade de mancais para serem avaliados. Para os mancais em piores condições, é então sugerida a análise mais aprofundada, que retorna o estágio de desgaste do rolamento.

Por fim, há a confirmação da eficiência da metodologia proposta através de comparações dos resultados obtidos na análise com situações reais de danos em rolamentos, através da análise de falha.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

A metodologia proposta mostrou-se promissora, porém, ajustes podem ser feitos em relação aos filtros utilizados antes da segunda etapa da metodologia.

A análise visual dos rolamentos, ou análise de falha, apesar de ter sido atrapalhada pela etapa de corte indevida, confirmou as situações previstas através da análise dos espectros de vibração.

Outra análise interessante a ser adicionada ao trabalho seria também a avaliação do potencial de evolução dos desgastes. Para situações onde só é possível um intervalo muito grande entre as inspeções periódicas, por exemplo, considerando que em alguns casos a evolução dos danos pode ser acelerada devido a fatores dinâmicos ou outros problemas, unir o atual estado de desgaste de um rolamento a uma velocidade de evolução dos danos pode resultar em uma melhor prevenção de falha dos componentes.

A partir destas afirmações, alguns trabalhos futuros podem ser sugeridos:

- Teste da metodologia com um maior número de casos e utilizando ferramentas corretas para o corte dos rolamentos que não prejudiquem a análise de falha. Além disso, utilizar dados de medições realizadas momentos antes de os rolamentos saírem de operação;
- Modificação dos limites propostos para o filtro que utiliza o valor RMS da velocidade de vibração e tendência geral do envelope, de forma a adequar melhor a metodologia proposta a casos práticos;
- Determinação da velocidade de evolução dos defeitos, para melhorar a tomada de decisão em casos onde há um intervalo muito grande entre inspeções.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, I. B. D. **Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicada a aerogeradores**. 2016. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. **Scientia Cum Industria**, Caxias do Sul, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.

BARILLI, R. J. D. C. **Análise de falhas em mancais de rolamento utilizando a técnica do envelope**. 2013. 61 f. TCC (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BEZERRA, R. D. A. **Deteção de falhas em rolamentos por análise de vibração**. 2004. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

COSTA, C. D.; MATHIAS, M. H. Análise de vibrações mecânicas com FPGA. **Saber Eletrônica**, n. 429, Outubro 2008.

CUNHA, P. M. R. D. Previsão de falha de rolamentos por análise espectral e de envelope. **Relatório Técnico**. [S.l.]: Aditeq Ltda. 2012.

GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, v. I, 2004.

GRANEY, B. P.; STARRY, K. Rolling Element Bearing Analysis. **Materials Evaluation**, v. 70, n. 1, 2011.

IMV CORPORATION. Chapter 04 - Evaluation of vibration. **Site da IMV Corporation**. Disponível em: <https://www.imv.co.jp/e/pr/vibration_measuring/chapter04/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

INSTITUTO DE VIBRAÇÃO MTA. **Curso de análise de vibração**: módulo II. 21. ed. Itajubá: IVMTA, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816-3**: Mechanical vibration: evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Local: ISO, 2009.

NSK. Rolamentos. **NSK BRASIL**, 2013. Disponível em: <[http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK\(1\).pdf](http://www.nsk.com.br/upload/file/Cat%C3%A1logo%20Geral%20NSK(1).pdf)>. Acesso em: 03 Dezembro 2019.
NSK BRASIL LTDA. **NSK Bearing Doctor**: diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos. São Paulo: NSK BRASIL, 2001.

NTN. Bearing Frequencies. **NTN Bearing Corporation**, 2019. Disponível em: <<http://www.ntnamericas.com/en/website/documents/brochures-and-literature/tech-sheets-and-supplements/frequencies.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SKF. **Bearing failures and their causes**. [San Diego]: SKF. 1994.

SKF. **Vibration Diagnostic Guide**. San Diego: SKF. 2000.

SKF. **SKF Machine Condition Advisor CMAS100-SL**. San Diego: SKF. 2009.

SKF. Inquire - Knowledge base article. **SKF**, San Diego, 2019. Disponível em: <https://www.skf.com/binary/tcm:148-109865/0901d19680109af3-KBA00276---Measuring-with-different-SKF-devices_tcm_12-109865.pdf>. Acesso em: 02 Dezembro 2019.

STI VIBRATION MONITORING INC. Field Application Note - Rolling Element Bearings. **STI**, 2012. Disponível em: <<https://www.stiweb.com/v/vspfiles/downloadables/appnotes/reb.pdf>>. Acesso em: 17 Novembro 2019.