



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Henrique Scremin Weber

Medição de *squeal noise* em rolamentos de máquinas elétricas girantes

Florianópolis/SC

2022

Henrique Scremin Weber

MEDIÇÃO DE *SQUEAL NOISE* EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr.

Co-orientador: Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Dr.

Florianópolis/SC

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Weber, Henrique Scremin

Medição de squeal noise em rolamentos de máquinas elétricas girantes / Henrique Scremin Weber ; orientador, Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, coorientador, Marco Antônio Martins Cavaco, 2022.

91 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Squeal noise. 3. Ruído em rolamento. 4. Análise de Sistema de Medição. 5. Motor elétrico. I. Pinto, Tiago Loureiro Figaro da Costa . II. Cavaco, Marco Antônio Martins. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

**Henrique Scremin Weber**

**Medição de *squeal noise* em rolamentos de máquinas elétricas girantes**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Arcanjo Lenzi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sebastião Lauro Nau, Dr.  
WEG Equipamentos Elétricos S.A.

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

Prof. Paulo de Tarso Rocha de Mendonça, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto, Dr.  
Orientador

---

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Dr.  
Co-orientador

Florianópolis, 2022.



# Agradecimentos

À WEG, pela confiança e apoio na realização das disciplinas e dos experimentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de trabalho que me auxiliaram e apoiaram no decorrer do mestrado.

Ao meu orientador, professor Tiago Loureiro Figaro da Costa Pinto e meu co-orientador professor Marco Antônio Martins Cavaco pelos seus ensinamentos, orientação, experiência e dedicação durante todo o curso.

Aos professores do POSMEC da UFSC pelos ensinamentos que serão levados para a vida.

Aos meus pais e meu irmão por serem minha base e pelo apoio dado por eles durante os meus estudos.

À minha esposa Alana pelo companheirismo, compreensão e estímulo.

E, acima de tudo, a Deus por me conceder saúde, oportunidades e disposição para viver.

Quando faltam máquinas, você as pode comprar; se não tiver dinheiro, pode pegar emprestado; mas homens você não pode comprar ou pedir emprestado, e homens motivados são a base do êxito.

Eggon João da Silva

# Resumo

Empresas buscam a liderança em seus segmentos através de produtos competitivos que atendam aos requisitos do consumidor. Além de um elevado rendimento, máquinas elétricas girantes necessitam apresentar níveis de ruído cada vez mais baixos para atender a demanda dos clientes. Entender a fonte do ruído presente no motor permite trabalhar na redução do mesmo e conseqüentemente aumentar a vida útil da máquina, tornando o produto mais robusto. A deterioração dos rolamentos é o que mais contribui para falhas em motores elétricos. A avaliação do comportamento do mancal através da análise de ruído e vibração possibilita realizar estudos de melhorias e até mesmo intervir na máquina para aumentar sua vida útil. Entre os ruídos observados em rolamentos, destaca-se o *squeal noise*, o qual se caracteriza pelo comportamento geralmente intermitente e pelo aparente escorregamento metal-metal. Antes de realizar qualquer trabalho de melhoria, é necessário definir as grandezas a serem medidas e possuir um sistema de medição confiável para quantificar o mensurando de interesse. Frente ao exposto, nesta dissertação três diferentes processos de medição são estudados com o objetivo de definir o sistema que consegue quantificar o *squeal noise* em rolamentos rígidos de esferas utilizados em motores elétricos de indução. Os processos estudados são: nível de pressão sonora, espectro de aceleração e o espectro de envelope de aceleração. O presente trabalho avalia estes processos de medição através de experimentos planejados, utilizando a metodologia seis sigma, com ênfase na ferramenta análise do sistema de medição, a qual é conhecida como MSA. Nesta análise os sistemas são avaliados quanto a estabilidade de medição, a discriminação, a repetibilidade e a reprodutibilidade. Uma avaliação empírica do ruído observado nos experimentos também é realizada, possibilitando compará-la com os valores obtidos através dos processos de medição estudados, o que auxilia na definição do processo que melhor quantifica o *squeal noise*.

**Palavras-chave:** *Squeal noise*. Análise do Sistema de Medição. Motor elétrico. Mancal de rolamento.

# Abstract

Companies aspire for leading position through competitive products that meet customer requests. Electrical rotating machines require, in addition to high efficiency, continuously reduce noise levels to meet customer demands. The origin of the noise present in the motor needs to be known in order to work on reducing it and consequently increase the machine life, making the product more robust. Bearing deterioration is the main factor that contribute to failures in electric motors. The evaluation of bearing behavior through noise and vibration analysis makes it possible to perform improvement studies and even machine intervention to increase its service life. Squeal noise is one of the noise types observed in bearings, characterized by its usually intermittent behavior and by apparent metal-to-metal sliding. A credible measurement system to quantify the desired measurand is a premise for any improvement work. Faced with the exposed, this dissertation contains the study of three different measurement process in order to define which process can quantify the squeal noise in deep groove ball bearings used in induction electric motors. The processes studied are: sound pressure level, acceleration spectrum and demodulation of acceleration spectrum. The present study evaluates these measurement process through planned experiments, using the six sigma methodology, with emphasis on the Measurement System Analysis tool, which is known as MSA. These systems are analyzed for measurement stability, discrimination, repeatability, and reproducibility. An empirical evaluation of the noise observed during the experiments is also performed. This enables a comparison between subjective values and results with the different measurement systems studied, helping to define which system best quantifies the squeal noise.

**Keywords:** Squeal noise. Measure System Analysis. Electric motor. Deep grove ball bearing.

# Lista de ilustrações

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Funcionamento de um motor elétrico de indução. . . . .                                    | 18 |
| Figura 2 – Componentes de um motor elétrico. . . . .   | 19 |
| Figura 3 – Rolamento de esferas e seus componentes. . . . .  | 20 |
| Figura 4 – Zona de carga de um rolamento sobre carregamento puramente radial. . . . .                | 22 |
| Figura 5 – Prováveis comportamentos dos elementos rolantes que geram o <i>squeal noise</i> . . . . . | 23 |
| Figura 6 – Representação de um microfone de eletreto. . . . .  | 25 |
| Figura 7 – Representação do sinal no domínio do tempo e da frequência. . . . .                       | 25 |
| Figura 8 – Circuitos de compensação sonora A, B, C e D. . . . .                                      | 26 |
| Figura 9 – Acelerômetro Piezoelétrico de compressão. . . . .   | 28 |
| Figura 10 – Sensibilidade relativa de um acelerômetro x frequência. . . . .                          | 29 |
| Figura 11 – Envelope de aceleração. . . . .  | 32 |
| Figura 12 – Representação da distribuição de um processo seis sigma. . . . .                         | 33 |
| Figura 13 – Exemplo de mapa de raciocínio. . . . .   | 35 |
| Figura 14 – Exemplo de mapa de processo de furação. . . . .  | 36 |
| Figura 15 – Exemplo de estratégia de amostragem para um MSA. . . . .                                 | 38 |
| Figura 16 – Exemplo de árvore de amostragem, carta $\bar{X}$ e carta R. . . . .                      | 40 |
| Figura 17 – Exemplos de distribuição normal sem e com causa especial. . . . .                        | 41 |
| Figura 18 – Exemplos de problemas de tendência. . . . .  | 42 |
| Figura 19 – Representação de uma causa especial de medição. . . . .                                  | 42 |
| Figura 20 – Medições realizadas em mm com diferentes sistemas de medição. . . . .                    | 43 |
| Figura 21 – Carta R de experimento com diferentes instrumentos de medição. . . . .                   | 44 |
| Figura 22 – Exemplos de carta $\bar{X}$ de dois experimentos com mesma árvore de amostragem. . . . . | 45 |
| Figura 23 – Componentes de variação de um experimento - Repetibilidade. . . . .                      | 46 |
| Figura 24 – Exemplo de medições realizadas com dois operadores diferentes. . . . .                   | 47 |
| Figura 25 – Componentes de variação de um experimento - Reprodutibilidade. . . . .                   | 48 |
| Figura 26 – Esquema da cadeia de medição para pressão sonora. . . . .                                | 51 |
| Figura 27 – Características do microfone e do pré-amplificador. . . . .                              | 51 |
| Figura 28 – Esquema da cadeia de medição para aceleração. . . . .                                    | 52 |
| Figura 29 – Acelerômetro <i>IMI</i> tipo 603C01. . . . .   | 53 |
| Figura 30 – Analisador de vibração VB7. . . . .  | 54 |
| Figura 31 – Ensaios de medição de pressão sonora e de vibração. . . . .                              | 55 |
| Figura 32 – Espectros de pressão sonora com e sem a presença de ruído. . . . .                       | 56 |
| Figura 33 – Espectros de vibração em aceleração sem e com ruído no rolamento. . . . .                | 57 |
| Figura 34 – Mapa de processo de medição. . . . .   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 35 – Tratativa das variáveis críticas do processo de medição. . . . .  | 59 |
| Figura 36 – Árvore de amostragem do experimento. . . . .  | 63 |
| Figura 37 – Ensaio para medição do espectro de envelope. . . . .  | 65 |
| Figura 38 – Resultados obtidos em ordem crescente. . . . .  | 66 |
| Figura 39 – <i>Variability Chart</i> para avaliação de tendência. . . . .   | 67 |
| Figura 40 – Cartas $R$ do experimento. . . . .  | 69 |
| Figura 41 – Cartas $\bar{X}$ do experimento. . . . .  | 70 |
| Figura 42 – Componentes de variação do espectro de aceleração. . . . .  | 71 |
| Figura 43 – Componentes de variação do espectro de envelope de aceleração. . . . .  | 72 |
| Figura 44 – <i>Variability Chart</i> para avaliação de reprodutibilidade - espectro de<br>aceleração. . . . .             | 73 |
| Figura 45 – Principais componentes de variação - espectro de aceleração. . . . .  | 74 |
| Figura 46 – <i>Variability Chart</i> para avaliação de reprodutibilidade - espectro de<br>envelope de aceleração. . . . . | 75 |
| Figura 47 – Principais componentes de variação - espectro de envelope de aceleração. . . . .                              | 76 |
| Figura 48 – Relação entre os valores obtidos do espectro de aceleração e a percepção<br>do operador. . . . .              | 78 |
| Figura 49 – Relação entre os valores obtidos do espectro de envelope de aceleração<br>e a percepção do operador. . . . .  | 79 |

# Lista de quadros

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 – Direcionamento quanto a escolha da tratativa a ser adotada em cada variável. . . . . | 59 |
| Quadro 2 – Valores de tensão para cada tratativa de ensaio. . . . .                             | 60 |
| Quadro 3 – Escala com respostas ordinais para medição do <i>squeal noise</i> . . . . .          | 77 |

# Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Critério orientativo para aprovação da repetibilidade. . . . .   | 46 |
| Tabela 2 – Critério orientativo para aprovação da reprodutibilidade. . . . .  | 47 |
| Tabela 3 – Principais configurações utilizadas na medição de pressão sonora. . . . .  | 52 |
| Tabela 4 – Principais características do acelerômetro <i>IMI</i> tipo 603C01. . . . .   | 53 |
| Tabela 5 – Principais características do VB7. . . . .   | 54 |
| Tabela 6 – Principais configurações utilizadas no analisador de vibrações. . . . .  | 54 |
| Tabela 7 – Valores atribuídos a cada fator no experimento. . . . .  | 61 |
| Tabela 8 – Comparação dos resultados obtidos no MSA. . . . .  | 80 |
| Tabela 9 – Resumo das características de medição para quantificar o <i>squeal noise</i><br>através do espectro de aceleração. . . . . | 81 |



# Sumário

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                              | <b>14</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Objetivos</b>                               | <b>15</b> |
| 1.1.1      | Objetivo Geral                                 | 15        |
| 1.1.2      | Objetivos Específicos                          | 15        |
| <b>1.2</b> | <b>Estrutura do Documento</b>                  | <b>16</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA</b>                   | <b>17</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Motores Elétricos de Indução</b>            | <b>17</b> |
| 2.1.1      | Princípio de Funcionamento                     | 17        |
| 2.1.2      | Mancais de Rolamento                           | 19        |
| <b>2.2</b> | <b><i>Squeal Noise</i></b>                     | <b>21</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Formas de Medição de Ruído em Rolamento</b> | <b>23</b> |
| 2.3.1      | Medição de Pressão Sonora                      | 24        |
| 2.3.2      | Medição de Vibração - Aceleração               | 27        |
| 2.3.3      | Medição de Vibração - Envelope de Aceleração   | 30        |
| <b>2.4</b> | <b>Análise do Sistema de Medição</b>           | <b>32</b> |
| 2.4.1      | Metodologia Seis Sigma                         | 32        |
| 2.4.1.1    | Mapa de Raciocínio                             | 34        |
| 2.4.1.2    | Mapa de Produto e Mapa de Processo             | 36        |
| 2.4.1.3    | Plano de Amostragem                            | 37        |
| 2.4.1.4    | Carta $\bar{X}$ - R                            | 38        |
| 2.4.2      | Análise do Sistema de Medição                  | 40        |
| 2.4.2.1    | Estabilidade das Medições                      | 41        |
| 2.4.2.2    | Discriminação                                  | 43        |
| 2.4.2.3    | Repetibilidade                                 | 44        |
| 2.4.2.4    | Reprodutibilidade                              | 46        |
| <b>3</b>   | <b>MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS</b>       | <b>49</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Aparato Experimental</b>                    | <b>49</b> |
| 3.1.1      | Objetivos e Restrições do Sistema              | 49        |
| 3.1.2      | Equipamentos Utilizados                        | 50        |
| 3.1.2.1    | Equipamentos para Medição de Pressão Sonora    | 50        |
| 3.1.2.2    | Equipamentos para Medição de Vibração          | 52        |
| <b>3.2</b> | <b>Avaliação Preliminar</b>                    | <b>55</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Planejamento Experimental</b>               | <b>58</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4</b>   | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>                           | <b>64</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Ensaio Realizados</b>                                | <b>64</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Avaliação dos resultados</b>                         | <b>66</b> |
| 4.2.1      | Avaliação da Estabilidade de Medição                    | 66        |
| 4.2.2      | Avaliação da Discriminação                              | 68        |
| 4.2.3      | Avaliação da Repetibilidade                             | 69        |
| 4.2.4      | Avaliação da Reprodutibilidade                          | 72        |
| 4.2.4.1    | Reprodutibilidade do Espectro de Aceleração             | 73        |
| 4.2.4.2    | Reprodutibilidade do Espectro de Envelope de Aceleração | 75        |
| 4.2.5      | Percepção do ruído                                      | 77        |
| <b>4.3</b> | <b>Comparativo dos Resultados</b>                       | <b>79</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                             | <b>82</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Conclusão</b>  | <b>82</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>                 | <b>84</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                                      | <b>86</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – DADOS DO EXPERIMENTO</b>                | <b>91</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos de indução são vastamente utilizados na indústria para transformar a energia elétrica em mecânica, tendo em vista a necessidade de um equipamento robusto, com rendimento elevado e de baixo custo de manutenção (GARCIA, 2003). Garantir uma boa confiabilidade deste equipamento é algo necessário para que o produto se mantenha competitivo no mercado.

O nível de ruído sonoro em máquinas elétricas girantes é importante para a indústria em geral, tendo em vista os impactos à saúde dos colaboradores submetidos ao som. Muitas vezes a alteração do produto se faz necessária para atender aos níveis especificados pelo cliente e o conhecimento da fonte do ruído é importante para propor as melhorias no produto (NAU; MELLO, 2000).

Motores elétricos são constituídos de diversos componentes, destacando a carcaça com estator, rotor com eixo, tampas, caixa de ligação, sistema de ventilação e mancais. Entre os mancais, o rolamento rígido de esferas é utilizado com maior frequência, para aplicações em geral. O ruído sonoro observado em motores elétricos pode ser proveniente de diversos destes componentes.

A presença de ruído em rolamentos pode expressar diversos defeitos, como falha na pista interna, na pista externa ou no elemento rolante. Embora o ruído de um motor elétrico esteja fortemente relacionado com a origem eletromagnética e com o sistema de ventilação, a parte oriunda dos mancais não deve ser desconsiderada, pois pode apresentar indícios de deterioração do componente (NAU; MELLO, 2000; CHERAGHI; KARIMI; BOOIN, 2018). A deterioração prematura dos mancais de um motor pode levar a máquina a sua falha ou interferir no intervalo de manutenção da mesma para troca dos rolamentos (HARRIS; KOTZALAS, 2006).

Segundo NSK Brasil (2001), a presença de anomalias quanto à temperatura de operação, níveis de vibração, condições do lubrificante e a presença de ruídos durante a operação dos rolamentos podem auxiliar em uma identificação prematura de falhas destes componentes. A presença de ruído elevado nos rolamentos gera a dúvida quanto a operacionalidade do componente.

A manutenção preditiva busca identificar a evolução de uma falha no equipamento, permitindo a realização da troca do componente com avaria antes que a máquina pare de operar abruptamente, permitindo a realização da manutenção. Este tipo de manutenção é aplicada cada vez mais na indústria com o objetivo de aumentar a produtividade, aumentando o intervalo entre intervenções na máquina e a vida dos equipamentos e diminuindo os custos de manutenção. Há diversas técnicas de manutenção preditiva como

monitoramento de vibração, análise de óleos, monitoramento de corrosões e emissões acústicas (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Este trabalho aborda formas diferentes de medir o *squeal noise* (também chamado de *squiling noise* ou ruído de arraste em tradução livre), com foco na análise de espectros de vibração. Momono e Noda (1999) mencionam que este tipo de ruído é predominante em rolamentos de rolos cilíndricos, mas pode ocorrer em rolamentos rígidos de esferas. A escolha pela análise em rolamentos rígidos de esferas se dá ao fato do autor acompanhar a presença de *squeal noise* em alguns casos práticos de motores elétricos operando em campo e em laboratório, com a presença de mancais deste tipo.

A escolha de um sistema de medição confiável para o *squeal noise* possibilita a identificação futura de sua causa, através de experimentos controlados. Não é um requisito deste trabalho a utilização industrial dos sistemas de medição abordados. No entanto, estes sistemas devem estar presentes nos laboratórios da empresa parceira.

## 1.1 Objetivos

Com o conhecimento de que rolamentos são componentes fundamentais para o funcionamento de uma máquina elétrica girante e que sua deterioração pode comprometer a vida do equipamento como um todo, é desejável possuir um sistema de medição confiável para quantificar o ruído gerado por este componente. Com um sistema confiável, é possível fazer estudos de melhorias para diminuição do ruído do rolamento.

Sendo assim, o trabalho se justifica com base na necessidade exposta anteriormente e na falta de um método de medição confiável para quantificar *squeal noise*, evidenciando as limitações metrológicas dos sistemas de medição utilizados. Para concepção do trabalho, os objetivos listados nas seções 1.1.1 e 1.1.2 são definidos como diretrizes para realização do trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é pesquisar e avaliar experimentalmente diferentes métodos de medição de ruído em rolamento, com ênfase na análise de espectros de vibração. Através desta análise, busca-se um sistema de medição de *squeal noise* confiável para possibilitar a realização futura de estudos de melhoria no produto, visando a diminuição ou eliminação de tal ruído.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral será alcançado a partir dos objetivos específicos listados na sequência:

- Pesquisar e comparar diferentes métodos de medição de ruído que possam ser aplicados à medição de *squeal noise* e, com base em uma revisão bibliográfica, determinar dois ou mais métodos considerados adequados para realização da medição na indústria, sendo estes métodos existentes na empresa parceira;
- Criar uma estratégia de amostragem para realização de experimentos comparativos entre os métodos considerados adequados para a medição. Esta amostragem visa avaliar se os métodos selecionados são confiáveis para medição do ruído;
- Relacionar experimentalmente os métodos mais relevantes a partir da estratégia de amostragem citada no parágrafo anterior;
- Validar a utilização de um ou mais métodos de medição, através da análise dos experimentos realizados.

## 1.2 Estrutura do Documento

No próximo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema, contendo conceitos básicos a respeito de motores elétricos, rolamentos, *squeal noise* e sistemas de medição para este tipo de ruído. O capítulo 2 também apresenta conceitos de como avaliar os diferentes sistemas de medição. Esta análise é realizada através da metodologia seis sigma, com a ferramenta MSA (análise do sistema de medição ou *measure system analysis*, em inglês) (WERKEMA, 2002).

O capítulo 3 contém a metodologia utilizada, apresentando o aparato experimental, bem como a descrição dos experimentos realizados e a justificativa dos fatores levados à árvore de amostragem. Neste capítulo são apresentados alguns testes preliminares contemplando diferentes processos de medição.

Já o capítulo 4 contém os resultados dos experimentos realizados, bem como a análise de cada processo de medição avaliado. A análise do sistema de medição é realizada com base na metodologia seis sigma. Uma avaliação subjetiva dos níveis ruído apresentados durante os experimentos também é realizada neste capítulo, possibilitando comparar estes valores observados com as medições realizadas através dos diferentes processos de medição estudados.

Por fim, o capítulo 5 traz as conclusões dos experimentos realizados, apresentando considerações sobre o processo de medição que se mostra mais efetivo para avaliação do *squeal noise*. Este capítulo contém sugestões de trabalhos futuros a partir das conclusões geradas pelo trabalho. Além destes capítulos são apresentadas as referências bibliográficas no final do documento e os dados obtidos no experimento no Apêndice A.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O capítulo de revisão de literatura possui o objetivo de contextualizar e embasar teoricamente o presente trabalho. Ele está estruturado de maneira a fazer uma breve explanação a respeito do funcionamento dos motores elétricos e apresentar seus principais componentes na seção 2.1.

A seção 2.2 contém o conceito do *squeal noise*, o ruído a ser estudado, apresentando uma melhor caracterização do mesmo. Já na seção 2.3 são apresentadas técnicas de medição do ruído, possíveis de serem aplicadas em motores elétricos, com ênfase nas técnicas referentes à vibração e medição acústica.

Por fim, na seção 2.4 são apresentadas as técnicas empregadas na avaliação dos processos de medição estudados. Nesta seção são apresentadas técnicas da metodologia seis sigma como o mapa de processo e o MSA (análise do sistema de medição).

### 2.1 Motores Elétricos de Indução

Motores elétricos de indução são máquinas que transformam energia elétrica em mecânica. Segundo Silva e Cardoso (2005), motor de indução é o tipo de máquina elétrica mais utilizada na indústria, possuindo uma larga aplicação em diversos setores, como mineração, papel e celulose, siderurgia e saneamento. Para compreender a importância do estudo do *squeal noise* em motores elétricos, é necessário conhecer os princípios básicos de funcionamento destes motores e os principais componentes que os compõem.

#### 2.1.1 Princípio de Funcionamento

As máquinas elétricas girantes podem ser classificadas de acordo com o tipo de estrutura em que são construídas, como os de indução com rotor de gaiola de esquilo ou rotor sólido, ímã permanente, polo de garra, homopolar, máquinas síncronas e de relutância (SOBRINHO, 2008). Tendo em vista que a maior parte da produção de motores da empresa parceira é do tipo indução com gaiola de esquilo trifásico e que o ruído é observado em alguns motores deste tipo de construção, decide-se pelo estudo destes motores.

Motores de indução possuem velocidade de rotação constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo, e são os mais utilizados na indústria em geral, devido a sua simplicidade, robustez e baixo custo (GONÇALEZ, 2007). Esta forma construtiva de motor é formada basicamente por duas partes: rotor e estator.

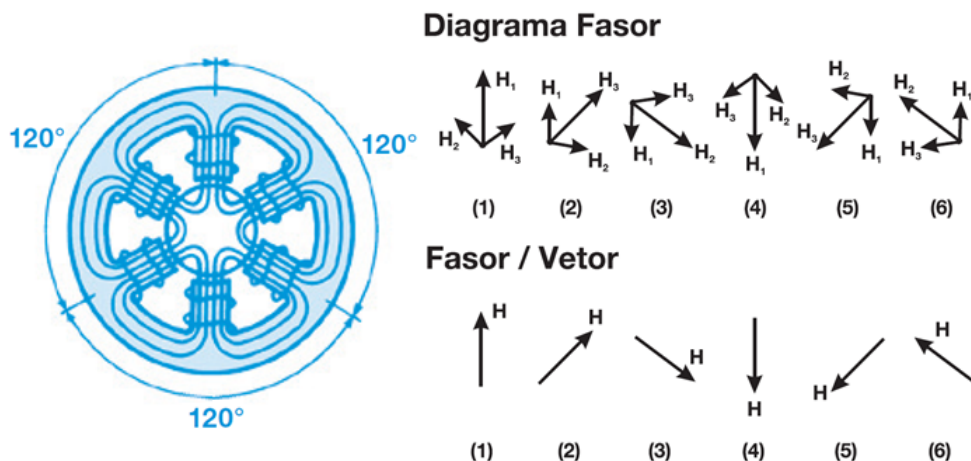
O rotor é a parte girante da máquina e constitui-se de um núcleo formado por

material ferromagnético e de uma gaiola condutora, também chamada de gaiola de esquilo. O núcleo é laminado para aumentar a resistividade vista pelas correntes parasitas, forçando que a corrente que produz o torque utilize a parte superior das barras que compõem a gaiola. A gaiola de esquilo é confeccionada de um material condutor que facilite a passagem da corrente (SOBRINHO, 2008).

A parte estática do motor é chamada de estator. O estator possui em sua construção enrolamentos e um núcleo de chapas (material ferromagnético), o qual possui principal objetivo idêntico ao núcleo do rotor, ou seja, agir como aumento da resistividade. Os enrolamentos trifásicos são formados por três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, sendo ligados ao sistema trifásico da rede de alimentação (SOBRINHO, 2008; GONÇALEZ, 2007).

A Figura 1 apresenta o funcionamento simplificado de um motor elétrico de indução. A esquerda é representado um enrolamento trifásico, composto por três enrolamentos monofásicos espaçados  $120^\circ$  entre si. Ao alimentar o enrolamento por um sistema trifásico, a corrente de cada enrolamento monofásico gera seu próprio campo magnético ( $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ ). Estes campos são deslocados  $120^\circ$  entre si, no tempo. O campo total  $H$  resultante, a cada instante, é igual à soma gráfica dos três campos  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$  naquele instante, conforme ilustrado à direita da Figura 1. É possível observar que a resultante do campo realiza um movimento de rotação, ao comparar seu sentido em cada um dos 6 instantes sucessivos de tempo presentes na figura (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS SA, 2021).

Figura 1 – Funcionamento de um motor elétrico de indução.

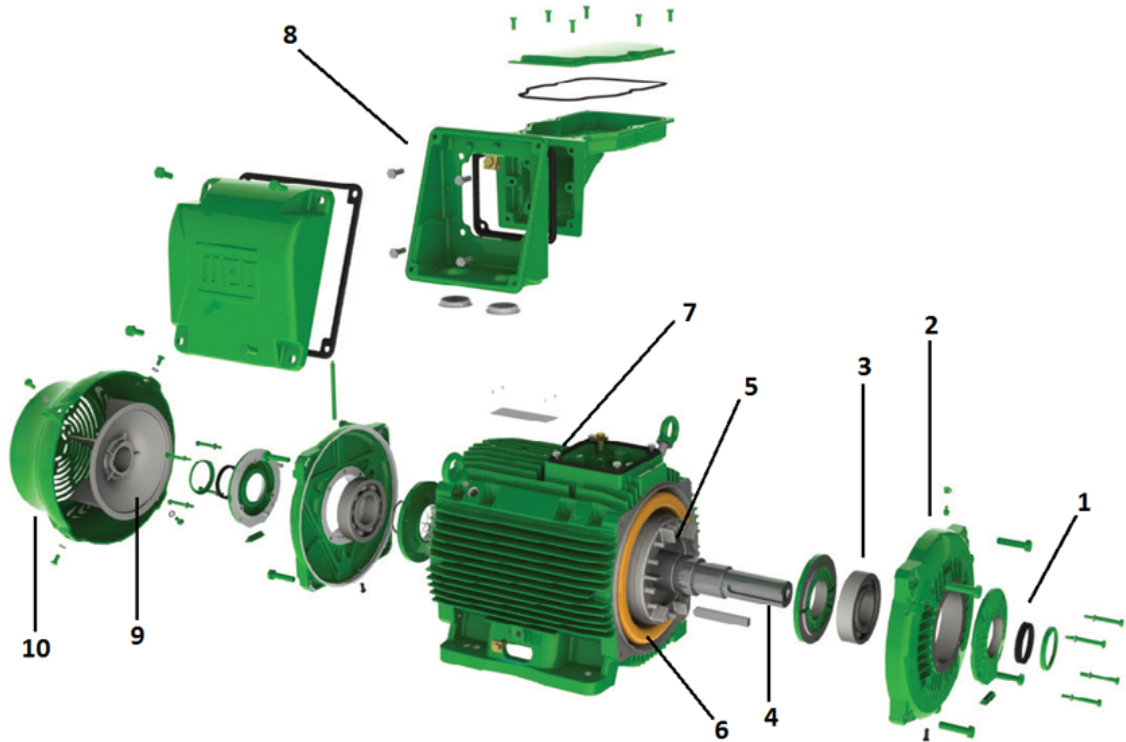


Fonte: Adaptado de WEG Equipamentos Elétricos SA (2021)

O motor de indução é caracterizado pelo fato de apenas o estator ser ligado à rede de alimentação, ou seja, o rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele são induzidas eletromagneticamente pelo estator, por isso o seu nome é motor de indução (GONÇALEZ, 2007). A Figura 2 apresenta os principais componentes de um

motor elétrico de indução, destacando o rotor (5), o estator (6) e os mancais de rolamento (3).

Figura 2 – Componentes de um motor elétrico.



Legenda: 1) Componentes de vedação; 2) Tampa; 3) Rolamento; 4) Eixo; 5) Rotor; 6) Estator; 7) Carcaça; 8) Caixa de Ligação; 9) Ventilador; 10) Defletora de Ar.

Fonte: Adaptado de WEG Equipamentos Elétricos SA (2018)

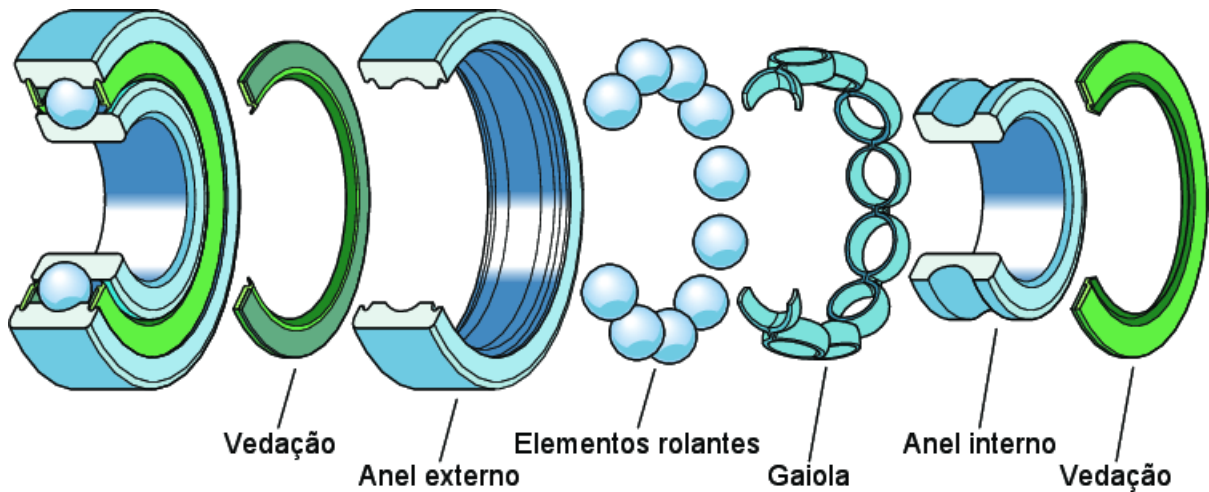
### 2.1.2 Mancais de Rolamento

Os mancais de um motor elétrico são muito importantes, pois suportam a massa do rotor, possibilitando que ele gire. Eles garantem a ausência de arraste mecânico entre rotor e estator, e sua deterioração é o que mais contribui para falhas em motores elétricos. Há diferentes tipos de mancais, como os mancais de deslizamento (hidrodinâmicos), magnéticos e mancais de rolamento, sendo estes os mais utilizados em motores de indução (AZIZI et al., 2018).

Dentre os mancais de rolamento existentes, há diversas formas construtivas para aplicações variadas. Eles são constituídos de quatro componentes básicos: anel interno (também chamado de pista interna), anel externo (também chamado de pista externa), elementos rolantes e gaiola (NSK BRASIL, 2013). Além destes componentes, o rolamento pode conter uma vedação, a qual protege a parte interna do rolamento quanto a contaminantes externos, mantendo o lubrificante dentro do rolamento (GRUPO SKF, 2015). A Figura 3 apresenta os componentes presentes em um rolamento de uma carreira de esferas.



Figura 3 – Rolamento de esferas e seus componentes.



Fonte: Grupo SKF (2018)

As pistas do rolamento rígido de esferas (interna e externa) são compostas por perfil lateral em arco, com raio ligeiramente maior que o raio das esferas, permitindo a aplicação de carga radial (principal sentido de carga suportado pelo rolamento) e o apoio da carga axial em ambos os sentidos (NSK BRASIL, 2013). Em motores elétricos, geralmente a pista externa permanece estática durante operação, assentada em um cubo presente na tampa do motor, enquanto a pista interna gira em conjunto com o eixo do rotor, ao qual é fixo por interferência.

Os elementos rolantes (esferas ou rolos) transferem a carga entre os anéis interno e externo, sendo que normalmente o mesmo aço é utilizado para os elementos rolantes e os anéis dos rolamentos. Em alguns casos, os elementos rolantes são fabricados em material cerâmico, com o objetivo de aumentar a resistência elétrica entre as pistas do rolamento. Os rolamentos com este tipo de elemento rolante são chamados de híbridos (GRUPO SKF, 2018).

Entre os elementos rolantes são utilizadas gaiolas que possuem como objetivo separar os elementos rolantes, diminuindo o calor de atrito gerado e distribuindo-os uniformemente para otimizar a distribuição da carga. Além disso, a gaiola guia os elementos rolantes na zona sem carregamento (GRUPO SKF, 2018).

Em motores elétricos, utilizam-se principalmente rolamentos rígidos de esferas (também conhecidos como rolamentos fixos de esferas). Este tipo de rolamento se caracteriza pela presença de esferas como elementos rolantes, possibilitando a aplicação de cargas radiais e axiais em ambos os sentidos. O rolamento rígido de esferas pode ser aberto, blindado (com vedação através de placas de aço) ou vedado (utilizando vedação de borracha) (NSK BRASIL, 2013).

A lubrificação de rolamentos é realizada para que a operação seja confiável, visando

evitar o contato direto de metal com metal entre os corpos rolantes, pistas e gaiolas, inibindo, assim, o desgaste e preservando o rolamento de oxidação (GRUPO SKF, 2015). Geralmente os rolamentos são lubrificados por óleo ou graxa, em motores elétricos, sendo sua escolha dependente das condições de operação, como as faixas de temperatura e rotação.

Já a graxa é definida como um material sólido ou semissólido composto de espessante ou “base”, óleo lubrificante e aditivos. Apenas o óleo desempenha a função de lubrificação e a função do “corpo” da graxa é manter o óleo em contato com as superfícies de atrito. Para motores elétricos de indução, a lubrificação a graxa é amplamente utilizada em mancais de rolamento (LIMA, 2009).

## 2.2 *Squeal Noise*

Rolamentos em operação podem gerar diferentes tipos de ruído sonoro. A partir do ruído existente é possível apresentar a condição de operação do componente, verificando possíveis falhas por meio do tratamento dos sinais acústicos emitidos (KAKISHIMA et al., 2000). Isto demonstra a importância do comportamento sonoro do rolamento durante sua operação

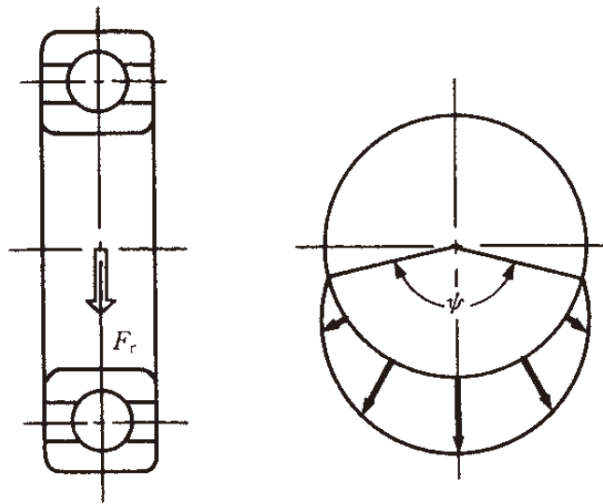
Dentre os diferentes tipos de ruído, o *squeal noise* é geralmente relacionado à operação de rolamento de rolos cilíndricos. Este ruído aparenta ser um escorregamento metal-metal, não gera alteração na temperatura de operação do mancal e não existem evidências de que pode ou não causar diminuição da vida do rolamento (MOMONO; NODA, 1999). Há algumas características presentes neste tipo de ruído:

- Geralmente ocorre em rolamentos com altas folgas radiais (MOMONO; NODA, 1999);
- Possui maior ocorrência em rolamentos lubrificados a graxa em comparação com rolamentos lubrificados a óleo (MOMONO; NODA, 1999);
- Ocorre com maior frequência no inverno ou em ambientes mais frios (MOMONO; NODA, 1999);
- Ocorre em um intervalo de rotação, o qual pode estar relacionado com o tamanho do rolamento (MOMONO; NODA, 1999; NAKAI et al., 1991);
- Há indícios de que sua ocorrência é imprevisível, mas pode estar relacionada com o tipo e quantidade de graxa e com condições operacionais do rolamento (MOMONO; NODA, 1999);

- A alteração do material da gaiola do rolamento não altera as frequências em que o *squeal noise* se pronuncia no espectro de vibração em aceleração (NAKAI et al., 1991).

Os rolamentos possuem folga interna radial, sendo um de seus objetivos permitir que ocorra uma variação de temperatura relativa entre a pista interna e externa do rolamento durante a operação, permitindo que o rolamento não trave mesmo com a temperatura da pista interna mais elevada (GRUPO SKF, 2015). Considerando um carregamento radial puro imposto sobre o rolamento, percebe-se a presença de uma zona de carga no componente (NSK LTDA, 2013). A Figura 4 apresenta a zona de carga de um rolamento submetido a esforço puramente radial.

Figura 4 – Zona de carga de um rolamento sobre carregamento puramente radial.



Fonte: NSK Ltda (2013)

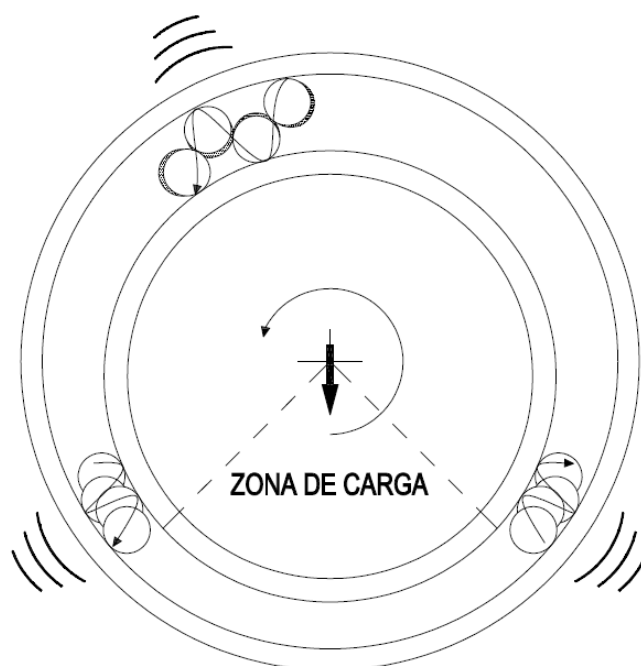
Na região de carga do rolamento o elemento rolante está em contato simultaneamente com as duas pistas (interna e externa), fazendo com que a rotação angular da esfera em seu próprio eixo possa ser calculada a partir do diâmetro e da rotação angular da pista interna do rolamento (considerando a pista externa estática) (NSK LTDA, 2013; IIDA; IGARASHI, 1959). A Equação 2.1 apresenta a relação da velocidade angular do elemento rolante na zona de carga do rolamento, desconsiderando distorções ou deslizamentos entre os componentes.

$$\omega_e = \frac{D\omega_p}{d} \quad (2.1)$$

Na Equação 2.1,  $\omega_e$  é a velocidade angular do elemento rolante em torno do seu próprio eixo,  $D$  é o diâmetro da pista interna do rolamento na região de contato do elemento rolante,  $\omega_p$  é a velocidade angular da pista interna do rolamento e  $d$  é o diâmetro externo do elemento rolante

Na região do rolamento que não possui carga, o elemento rolante e as duas pistas do rolamento não estão em contato no mesmo instante de tempo. Isto pode gerar uma desaceleração e deslizamento do elemento rolante logo após a saída da zona de carga e uma aceleração do elemento rolante na entrada da zona de carga, gerando o *squeal noise* (OHTA, 2013). Com isso, a rotação do elemento rolante não possui um comportamento bem definido, dificultando o entendimento de seu comportamento instantâneo fora da zona de carga.

Figura 5 – Prováveis comportamentos dos elementos rolantes que geram o *squeal noise*.



Fonte: Autor

Não há uma convicção sobre em qual parte do rolamento é gerado o *squeal noise*. O surgimento do ruído pode ocorrer na transição da zona de carga para a zona sem carga (desaceleração), durante a passagem do elemento rolante na zona sem carga ou provém da transição da zona sem carga para zona de carga do rolamento (aceleração) (MOMONO; NODA, 1999; NAKAI et al., 1991). A Figura 5 apresenta, de forma exagerada, o provável comportamento do elemento rolante que gera o *squeal noise*.

## 2.3 Formas de Medição de Ruído em Rolamento

Diversas técnicas para medição de ruído em rolamento podem ser adotadas. Neste trabalho é estudada a melhor maneira de quantificar o *squeal noise*, para que no futuro sejam realizados estudos sobre os fatores que mais influenciam a ocorrência deste tipo de ruído.

Nas próximas seções são apresentadas três possíveis maneiras de medir o *squeal noise*, sendo elas: medição de pressão sonora, medição de vibração em aceleração e medição de vibração através da técnica do envelope. Estas técnicas são utilizadas na indústria para avaliações de fenômenos específicos, sendo necessário entender a aplicação de cada processo de medição para poder utilizá-lo no ruído de interesse deste trabalho.

### 2.3.1 Medição de Pressão Sonora

A medição de ruído através do sinal de pressão sonora é muito utilizada para analisar propriedades dos motores elétricos, tendo como principal objetivo averiguar se o nível de ruído apresentado pelo motor pode prejudicar a saúde humana. Motores são projetados para atender determinados níveis de ruído e sua medição é necessária para comprovar se os níveis informados pelos fabricantes estão coerentes com os valores obtidos em operação (NAU; MELLO, 2000). Há normas para a medição de ruído em máquinas elétricas girantes, sendo a ISO 3744 uma das mais conhecidas e utilizadas pelos fabricantes deste tipo de máquina.

O som é gerado pela variação da pressão ou da velocidade das moléculas em um meio e é propagado através do ambiente em forma de onda sonora, a qual possui uma frequência e amplitude. O ouvido humano é capaz de perceber o intervalo de frequências entre 20 Hz e 20 000 Hz. Para medir a intensidade deste som é comumente utilizado o nível de pressão sonora, o qual depende da energia das oscilações (RIFFEL et al., 2001).

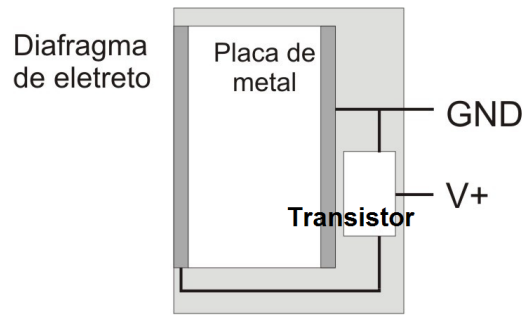
Para captar o som, utiliza-se o microfone, o qual converte vibrações sonoras em sinal elétrico. Em geral os microfones possuem um diafragma (película fina e flexível) que se movimenta conforme as ondas sonoras são incididas sobre ele. Esta movimentação é convertida em sinal elétrico e a forma em que é realizada esta conversão determina o tipo de microfone (PATSKO, 2006).

Entre os tipos de microfone destacam-se os capacitivos e os de eletreto. Em ambos há uma placa metálica pequena em conjunto com o diafragma, com o objetivo de formar um capacitor. Com a movimentação do diafragma, a capacitância do conjunto ( $C$  em Farad) varia, podendo observar a variação da tensão ( $V$  em volts) ao se manter a carga elétrica ( $Q$  em Coulomb) sobre este capacitor constante (PATSKO, 2006). A Equação 2.2 contém esta relação.

$$Q = CV \tag{2.2}$$

A Figura 6 apresenta o interior de um microfone de eletreto. É possível observar a placa de metal, o diafragma e o transistor, bem como a tensão gerada  $V$  em relação a uma referência  $GND$ . A tensão gerada pelo componente possui baixa magnitude, sendo usual a utilização de um amplificador de sinal.

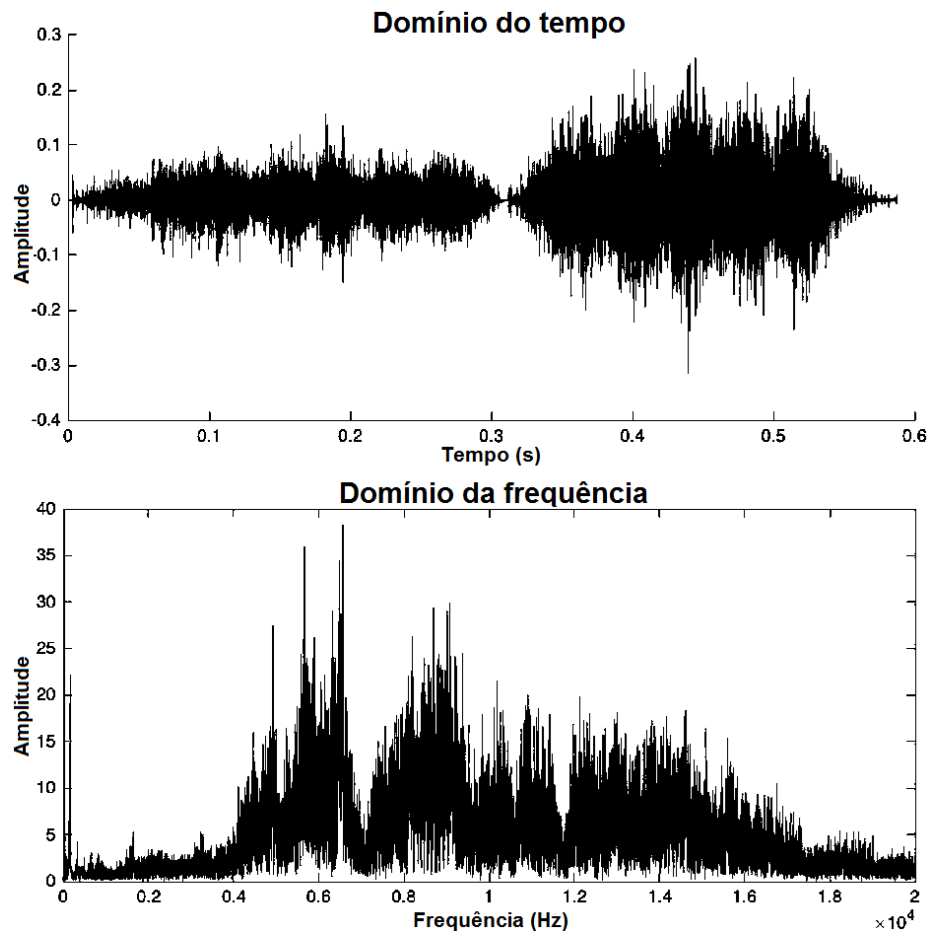
Figura 6 – Representação de um microfone de eletreto.



Fonte: Adaptado de Patsko (2006)

A percepção da emissão de sons pode sofrer influência de diferentes aspectos inerentes ao ser humano, como a distância a que a pessoa está da fonte sonora, personalidade, humor e cultura. Para minimizar estas variações, a utilização de um sistema de medição de pressão sonora auxilia na aquisição do sinal sonoro, o qual pode ser melhor trabalhado através da transformada rápida de Fourier (em inglês *fast Fourier transform*, ou FFT), apresentando o espectro de ruído a ser analisado (MOORE et al., 2017).

Figura 7 – Representação do sinal no domínio do tempo e da frequência.



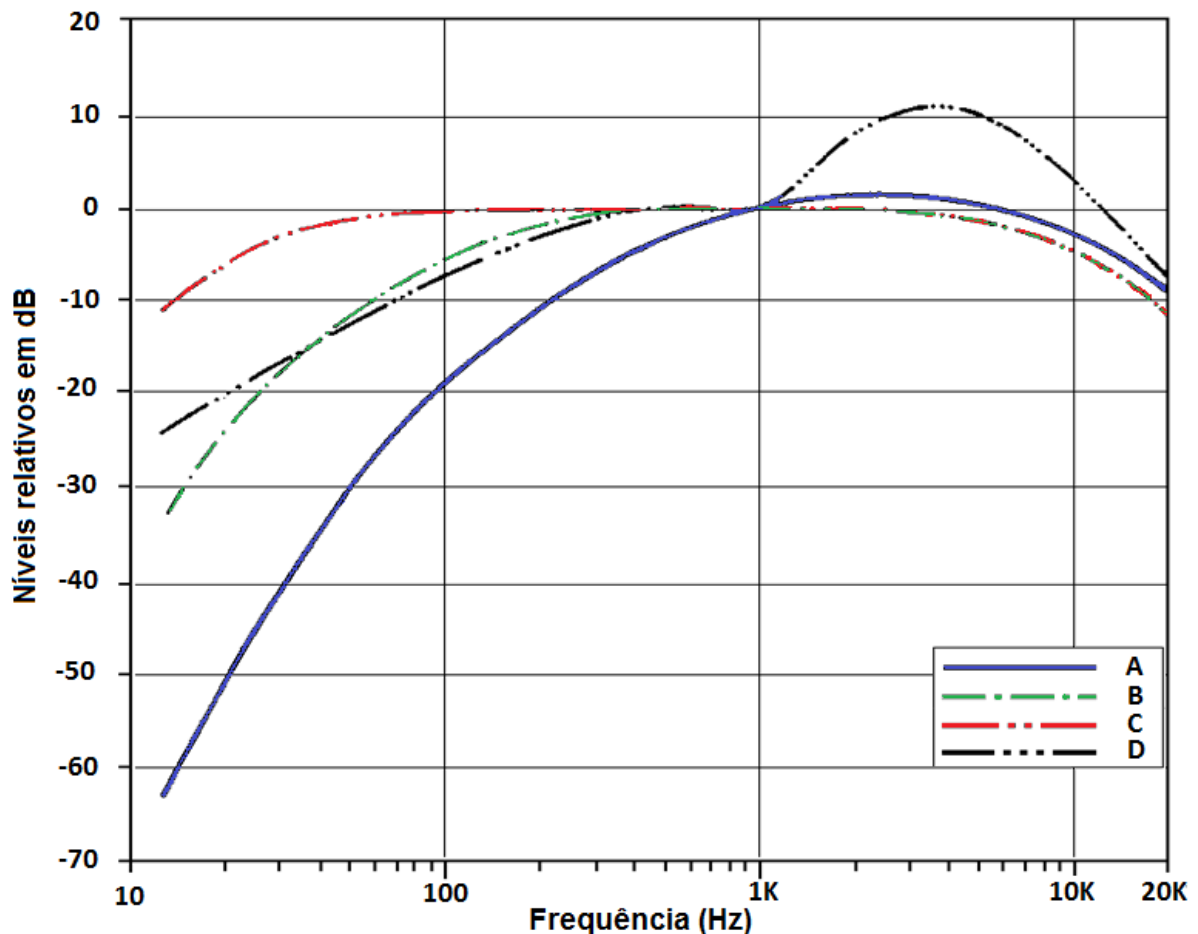
Fonte: Adaptado de Moore et al. (2017)

A Figura 7 mostra o sinal do som presente no ambiente em que um servo motor opera. Esta imagem contém o sinal no domínio do tempo, em sua parte superior, e após passar pela transformada rápida de Fourier (domínio da frequência) apresentado em sua parte inferior. O espectro em frequência facilita a visualização das frequências em que o som é pronunciado com maior intensidade, o que possui difícil análise baseando-se apenas pelo sinal no domínio do tempo (MOORE et al., 2017).

A pressão sonora é geralmente medida em escala logarítmica, através da unidade de medida Bel (B), sendo o decibel (dB) a unidade de medida mais aplicada. O nível de pressão sonora ( $NPS$ ) pode ser expresso pela Equação 2.3, a qual relaciona a pressão sonora medida ( $P$ ) com a pressão sonora de referência ( $P_o$ ). A pressão de referência é o limiar da audição na frequência de 1 000 Hz, correspondendo a 20  $\mu\text{Pa}$  ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ) (GERGES, 2000).

$$NPS = 10 \log \left( \frac{P}{P_o} \right)^2 = 20 \log \frac{P}{P_o} \quad (2.3)$$

Figura 8 – Circuitos de compensação sonora A, B, C e D.



Fonte: Adaptado de Gerges (2000)

O nível de pressão sonora de 1 dB é a menor variação que o ouvido humano pode perceber e o acréscimo de 6 dB representa o dobro da pressão sonora, ou seja, um ruído com 82 dB representa o dobro de pressão sonora em relação a um ruído de 76 dB. A percepção do ouvido humano varia com a frequência da onda sonora, sendo necessária a utilização de escalas apropriadas para apresentar os valores medidos. Para isso, circuitos de compensação são utilizados, sendo os circuitos A, B, C e D, apresentados na Figura 8, os mais conhecidos. Atualmente, apenas o circuito de compensação A é largamente utilizado, representando as medições em dB (A) (GERGES, 2000).

### 2.3.2 Medição de Vibração - Aceleração

O monitoramento da operação de motores elétricos é importante para verificar o começo da falha em seus componentes e este monitoramento torna o equipamento mais seguro. A análise do nível de vibração da máquina, a qual pode ser expressa em deslocamento, velocidade ou aceleração, é uma importante ferramenta de monitoramento (RAMALHO et al., 2014). Os limites de vibração de um motor elétrico devem atender aos requisitos da norma que os rege, sendo duas as normas mais usuais: NEMA MG1 parte 7 e a IEC 60034-14.

Diferentes tipos de ruído presentes em um motor elétrico podem ser provenientes de vibrações em um ou mais de seus componentes. Se o rotor possuir um desbalanceamento acentuado, o motor pode apresentar um ruído característico e um aumento dos níveis de vibração, bem como se o rolamento possuir alguma avaria ocorre o acréscimo dos níveis de vibração e ruído (JANDA; VITEK; SKALKKA, 2010).

Para medição de vibração em aceleração utiliza-se um transdutor, o qual apresenta um sinal proveniente da oscilação na superfície medida. Este sinal é a resultante de diversas excitações com frequência e amplitude distintas e, para melhor compreender o fenômeno, utiliza-se a transformada rápida de Fourier, passando o sinal para o domínio da frequência, assim como apresentando anteriormente na Figura 7. Através do espectro de vibração no domínio da frequência é possível avaliar quais as causas de cada pico apresentado, relacionando a frequência pronunciada com a causa do surgimento da mesma (JUNIOR et al., 2016).

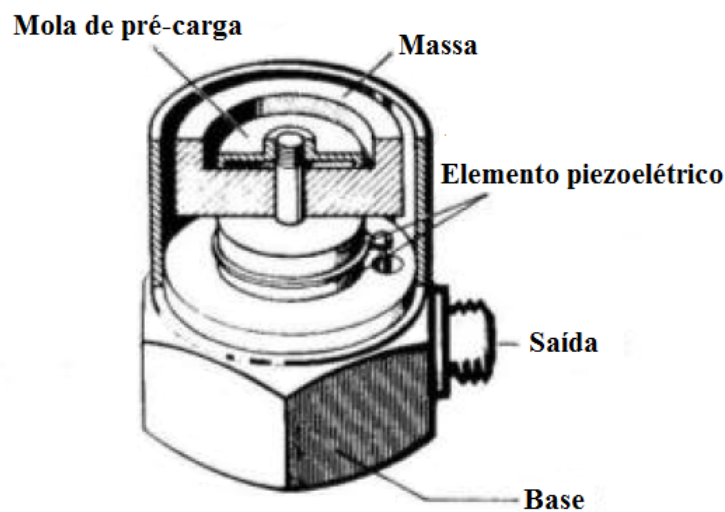
Além dos valores de vibração evidenciados em cada pico presente no espectro, o valor global de vibração também é utilizado. Este valor pode ser obtido através de uma relação matemática simplificada, a qual pode ser descrita na Equação 2.4. Nesta equação o valor global de vibração é representado por  $A_{global}$ , enquanto  $A_k$  é a amplitude de vibração do espectro em cada componente de frequência  $k$  do espectro, até a componente de maior frequência  $A_n$  (SILVA, 2021).



$$A_{global} = \sqrt{\sum_1^n A_k^2} \quad (2.4)$$

O transdutor mais utilizado para medição da vibração em aceleração é o acelerômetro do tipo piezoelétrico, o qual possui material piezoelétrico em seu interior, podendo ser natural (como cristal de quartzo) ou sintético (como algumas cerâmicas). Este material gera cargas elétricas proporcionais às forças ou movimentos a que são submetidos (GONÇALVES, 2012). A Figura 9 apresenta um acelerômetro e seus componentes.

Figura 9 – Acelerômetro Piezoelétrico de compressão.



Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2010)

O transdutor gera uma carga elétrica através da variação das tensões mecânicas aplicadas ao material piezoelétrico. A variação do movimento da superfície medida faz com que a massa ( $m$ ) presente no interior do acelerômetro gere uma força ( $F$ ), produzindo uma tensão mecânica no material piezoelétrico o qual gera uma carga elétrica ( $Q$ ) proporcional ao movimento. A Equação 2.5 apresenta esta relação, sendo  $d_{ij}$  o coeficiente do material piezoelétrico e  $a$  a aceleração (RODRIGUES et al., 2010).

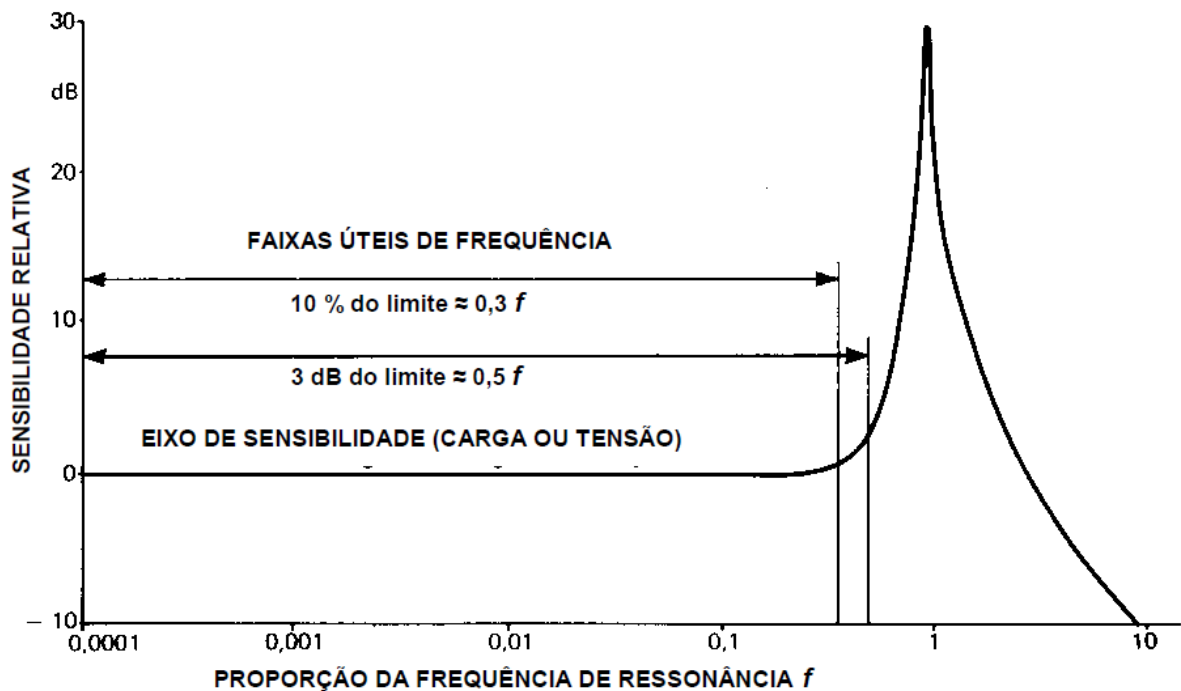
$$Q = d_{ij}F = d_{ij}ma \quad (2.5)$$

A utilização da grandeza carga elétrica não é comum para o tratamento de dados em instrumentos de medição. A alta impedância na saída dos elementos piezoelétricos faz com que a carga gerada pelo acelerômetro seja muito baixa (na ordem de pico Coulombs). Assim, faz-se necessária a utilização de um circuito condicionador de sinais. O circuito mais utilizado para medições com acelerômetros é um amplificador de carga, que converte o sinal de carga elétrica em um sinal de tensão elétrica e amplifica o sinal de saída (RODRIGUES et al., 2010).

Ao escolher um acelerômetro é muito importante verificar o intervalo de frequências de interesse. Cada acelerômetro possui uma frequência mínima de medição a qual é limitada pelo ruído presente no sistema, e sua frequência máxima de medição é determinada por fatores estruturais do componente, sendo a frequência natural do sensor um limitante (RODRIGUES et al., 2010).

A sensibilidade de um acelerômetro é constante em determinado intervalo de frequência, mas ao se aproximar da frequência natural do sensor, o comportamento se altera. A Figura 10 apresenta a curva de resposta em frequência de um acelerômetro, mostrando a variação no sinal elétrico de saída quando o acelerômetro é excitado por uma vibração de nível constante ao longo de uma ampla faixa de frequências (GONÇALVES, 2012).

Figura 10 – Sensibilidade relativa de um acelerômetro x frequência.



Fonte: Gonçalves (2012)

Diferentes tipos de fixação do acelerômetro, os quais alteram a massa e rigidez do sistema, influenciam na frequência natural. A Equação 2.6 apresenta de maneira simplificada a frequência natural ( $F_n$ ) do sistema não amortecido para um grau de liberdade, em que  $m$  é a massa e  $K$  a rigidez do sistema.

$$F_n = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (2.6)$$

### 2.3.3 Medição de Vibração - Envelope de Aceleração

Conhecer o comportamento dos mancais para avaliação da lubrificação e do começo das avarias nos rolamentos é importante para prever paradas da máquina, minimizando as perdas de produção. Diversas técnicas buscam prever o início da deterioração dos mancais e muitas delas estão relacionadas com a medição de vibração, como a análise de *wavelet*, análises de tempo-frequência e análise de espectro em alta frequência (ZUO-WEI et al., 2014). Uma das técnicas mais utilizadas é a análise de envelope de aceleração (*demodulation*), a qual está apresentada nesta seção.

As avarias em um rolamento são originadas pelo desgaste em algum de seus quatro principais elementos (pista interna, pista externa, elemento rolante e gaiola), e estes desgastes originam frequências no sinal de vibração não síncronas, ou seja, não múltiplas das frequências de rotação do rotor. Estas frequências são conhecidas pelas seguintes nomenclaturas (SILVEIRA et al., 2011):

- BPGI (*Ball Pass Frequency Inner Race*), a qual é associada a defeitos na pista interna ( $f_{BPGI}$ );
- BPGO (*Ball Pass Frequency Outer Race*), a qual é associada a defeitos na pista externa ( $f_{BPGO}$ );
- BSF (*Ball Spin Frequency*), a qual é associada aos defeitos presentes nos elementos rolantes ( $f_{BSF}$ );
- FTF (*Fundamental Train Frequency*), a qual é associada com os defeitos presentes na gaiola do rolamento ( $f_{FTF}$ ).

Cada uma destas frequências de falha possui relação com a geometria do rolamento e sua rotação. Estas frequências (em Hz) são obtidas através das Equações 2.7 a 2.10, sendo  $Z$  o número de elementos rolantes,  $d_p$  o diâmetro primitivo (mm), o qual é o diâmetro em que está o centro do elemento rolante,  $d_e$  o diâmetro do elemento rolante (mm),  $\alpha$  o ângulo de contato (graus) e  $n$  a rotação da pista interna (Hz), considerando que apenas a pista interna gira (ALMEIDA, 2007).

$$f_{BPGI} = \frac{Z}{2}n \left( 1 + \frac{d_e}{d_p} \cos \alpha \right) \quad (2.7)$$

$$f_{BPGO} = \frac{Z}{2}n \left( 1 - \frac{d_e}{d_p} \cos \alpha \right) \quad (2.8)$$

$$f_{BSF} = \frac{D_p}{2D_e}n \left( 1 - \left( \frac{d_e}{d_p} \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (2.9)$$

$$f_{FTF} = \frac{n}{2} \left( 1 - \frac{d_e}{d_p} \cos \alpha \right) \quad (2.10)$$

Defeitos em rolamentos possuem intensidade de vibração muito reduzida se comparada com defeitos que dissipam elevada energia, como o desbalanceamento e o desalinhamento. A técnica de envelope de aceleração permite eliminar essas componentes, detectando com maior clareza e antecedência apenas os defeitos de rolamentos (SILVEIRA et al., 2011).

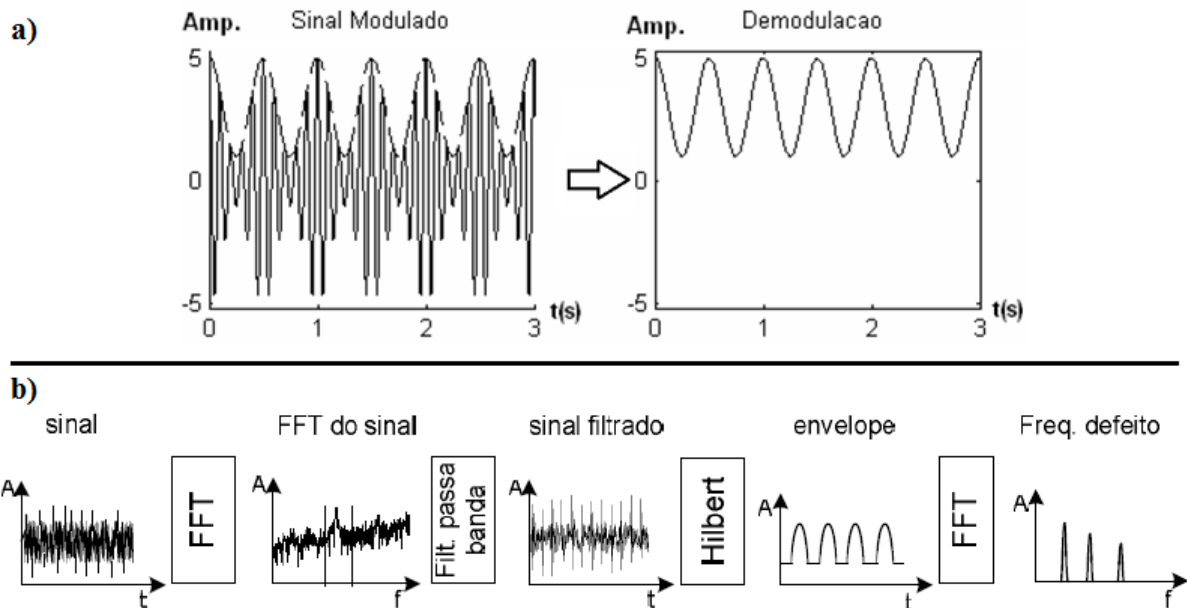
Esta técnica consiste em converter os altos harmônicos das frequências de defeito do rolamento em componentes de frequência dentro da faixa do espectro de vibração. Para isso, utiliza-se um filtro passa banda, com o objetivo de avaliar apenas uma faixa de frequência do sinal, selecionando o intervalo de frequências em que se percebe a presença de maiores picos, em altas ou intermediárias frequências (SILVEIRA et al., 2011). Geralmente utiliza-se o espectro de aceleração para verificar a faixa de frequências em que os picos são mais pronunciados.

O procedimento para avaliação de um sinal através do envelope de aceleração consiste nos seguintes passos (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004):

- Aplicar uma transformada rápida de Fourier (FFT) no sinal de vibração com o objetivo de identificar uma faixa de frequências em que apresenta elevação das amplitudes de vibração. Este aumento ocorre devido à excitação das frequências naturais características do rolamento provenientes do começo da falha em um de seus componentes;
- Aplicar o filtro passa banda, com o objetivo de eliminar os sinais de baixa frequência e alta amplitude, os quais geralmente estão relacionados ao desbalanceamento e desalinhamento da máquina;
- Demodular o sinal através da Transformada de Hilbert, com o objetivo de obter o envelope do sinal de defeito (sinal de baixa frequência);
- Aplicar a transformada rápida de Fourier ao envelope, para evidenciar as frequências de defeito.

A Figura 11 apresenta o procedimento adotado na realização do envelope em aceleração e exemplifica a transformada de Hilbert, a qual demodula o sinal. A parte *a*) desta figura apresenta em resumo a aplicação da Transformada de Hilbert em um sinal no domínio do tempo, enquanto a parte *b*) contém todo o processo a ser realizado para avaliação do sinal com o envelope de aceleração.

Figura 11 – Envelope de aceleração.



Legenda: a) Envelopamento do sinal através da Transformada de Hilbert; b) Procedimento de análise do sinal com a utilização do envelope de aceleração.

Fonte: Adaptado de Bezerra (2004)

## 2.4 Análise do Sistema de Medição

As técnicas de medição apresentadas anteriormente são validadas para medir grandezas específicas de determinados fenômenos. Este trabalho visa aplicá-las a um fenômeno que ainda não possui um processo de medição avaliado.

Com isso, uma metodologia de avaliação destes sistemas deve ser realizada para identificar se o mesmo possui os requisitos adequados para medir o *squeal noise*. A metodologia seis sigma é a escolhida para este trabalho. Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica da metodologia aplicada para avaliação dos sistemas de medição.

Inicialmente é apresentada a metodologia seis sigma e algumas de suas principais ferramentas, na subseção 2.4.1. Já a subseção 2.4.2 apresenta especificamente a análise do sistema de medição (MSA), contida nesta metodologia e adotada na avaliação dos resultados dos experimentos.

### 2.4.1 Metodologia Seis Sigma

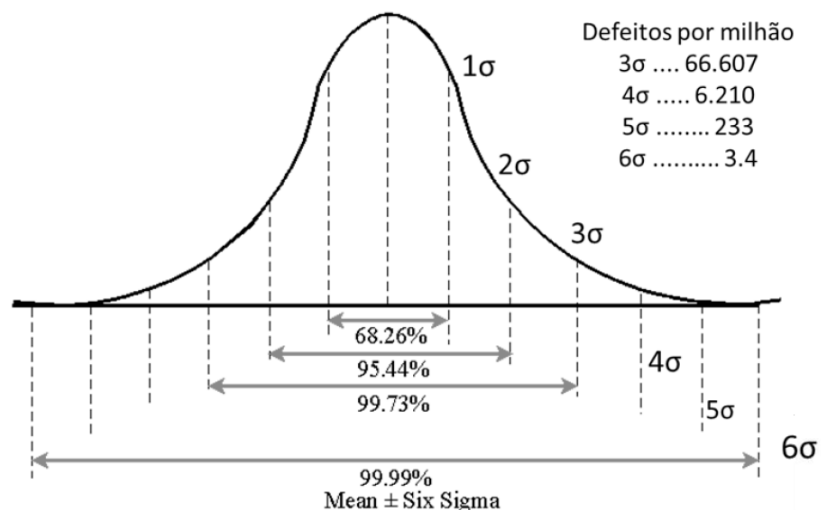
A aplicação da metodologia seis sigma na indústria tem se tornado cada vez mais frequente para aumentar a capacidade competitiva da organização e melhorar a qualidade de produtos e serviços. A aplicação de projetos utilizando esta metodologia não visa apenas o lucro, mas também o cumprimento das metas da organização e o aumento da satisfação do cliente (CARUSO; HELLENO, 2009).

Esta metodologia surgiu no ano 1987, quando colaboradores da empresa Motorola realizaram diversos estudos sobre conceitos de variabilidade de processos de produção, tendo como objetivo melhorar a qualidade dos produtos (HENDERSON; EVANS, 2000). A metodologia criada utiliza ferramentas já desenvolvidas anteriormente. Com a aplicação da metodologia, a empresa melhorou a confiabilidade do produto e conseguiu reduzir as perdas do processo (SENAPATI, 2004). Após o case de sucesso da Motorola, a metodologia seis sigma se expandiu para outras empresas, sendo amplamente aplicada ao redor do mundo.

A metodologia seis sigma não é um sistema, mas uma ferramenta de controle estatístico do processo, com foco na redução de defeitos através de oportunidades de melhorias obtidas de medições sistemáticas. Isso resulta em uma maior produtividade, redução de custos e satisfação do cliente (RAISINGHANI et al., 2005).

O termo seis sigma refere-se ao o número de desvios padrões que um processo deve conter entre a sua média e os requisitos do cliente (limites de especificação), sendo Sigma a medida de dispersão em torno da média (desvio padrão) e Seis a quantidade desvios padrões entre a média e os limites de especificações (OLIVEIRA, 2004). A Figura 12 apresenta a distribuição de probabilidade normal, cuja média das medições está centralizada. Esta figura contém a quantidade de defeitos por milhão de oportunidades (PPM) ao considerar os limites de especificação com diferentes desvios padrões, destacando-se a quantidade de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades quando os limites de especificação se encontram a seis desvios padrões da média.

Figura 12 – Representação da distribuição de um processo seis sigma.



Fonte: Vieira, Junior e Terra (2018)

A condução dos projetos seis sigma é geralmente realizada utilizando o integrador de ferramentas chamado DMAIC, o qual constitui-se de 5 etapas que definem cada letra do nome da ferramenta: definir os problemas e situações a melhorar (*Define*), medir as

informações e coletar dados de forma confiável (*Measure*), analisar os dados coletados (*Analyse*), implementar as melhorias para o processo (*Improve*) e controlar os processos ou produtos (*Control*), a fim de sustentar os resultados e metas (VIEIRA; JUNIOR; TERRA, 2018). Outro integrador de ferramentas muito utilizado é o PDCA (*Plan, Do, Check e Action*), o qual consiste em seguir as ações de planejar, fazer, controlar e agir (AGUIAR, 2002). Ambos integradores de ferramentas são ciclos de melhoria contínua.

O seis sigma possibilita a utilização de uma infinidade de ferramentas. Porém, oito ferramentas são consideradas fundamentais, sendo elas (BREYFOGLE, 2003):

- Mapeamento de processos;
- Análise do sistema de medição (MSA);
- Estudo de capacidade de processos;
- Análise de modo e efeito de falhas potenciais (FMEA);
- Estudos multivalorados;
- Projetos de experimentos (DOE);
- Plano de controle.

Entre estas ferramentas, destaca-se a análise do sistema de medição, o qual possui a sigla MSA (*Measure System Analysis*). Ela realiza a avaliação do sistema de medição para definir se o mesmo está adequado para medir o mensurando. Há outras ferramentas que direcionam o trabalho e valem ser destacadas, como o mapa de raciocínio, o mapa de processo e mapa de produto. Na sequência deste capítulo estas ferramentas estão apresentadas, bem como o plano de amostragem e as cartas  $\bar{X}$  - R.

#### 2.4.1.1 Mapa de Raciocínio

O mapa de raciocínio, também chamado de mapa de pensamento, é um documento vivo que centraliza o conhecimento adquirido durante a execução do trabalho. Nele devem constar o objetivo geral do trabalho, os questionamentos a serem respondidos sobre o tema, bem como as atividades realizadas para responder tais questionamentos (WERKEMA, 2002).

O mapa de raciocínio não possui uma sistemática única para sua construção, pois o conhecimento de um processo pode ser adquirido de diversas maneiras (USEVICIUS, 2004). Porém, alguns elementos críticos devem constar no mapa de raciocínio (WERKEMA, 2002; HILD; SANDERS; ROSS, 1999):

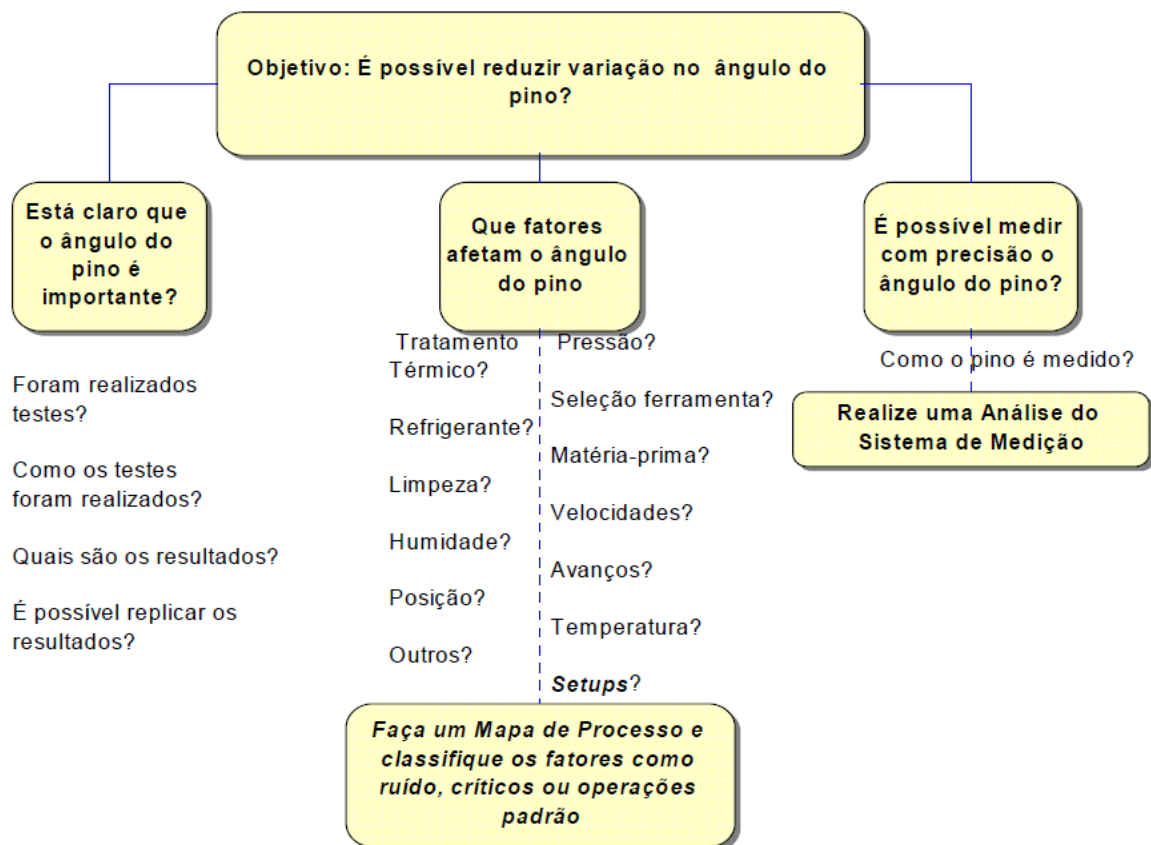
- Objetivo geral do projeto;

- Principais alternativas e questões iniciais consideradas;
- Caminhos paralelos de questionamentos e trabalhos desenvolvidos;
- Priorização das questões a serem respondidas;
- Metodologias e ferramentas utilizadas para respostas aos questionamentos;
- Justificativa das ferramentas utilizadas no projeto;
- Histórico do que foi realizado no trabalho.

O registro do trabalho pode ser realizado de maneira diferente, sem a utilização do mapa de raciocínio. No entanto, existem diversas vantagens em utilizar esta ferramenta, fazendo com que seja amplamente utilizada em projetos seis sigma, como a presença do objetivo do trabalho para visualização durante todo o período de execução, bem como o registro de todo o estudo em um documento único e vivo (constantemente atualizado) (PIUCCO et al., 2019).

A Figura 13 apresenta um exemplo de mapa de raciocínio em que é possível destacar o objetivo do projeto, bem como questionamentos paralelos.

Figura 13 – Exemplo de mapa de raciocínio.



Fonte: Usevicius (2004)

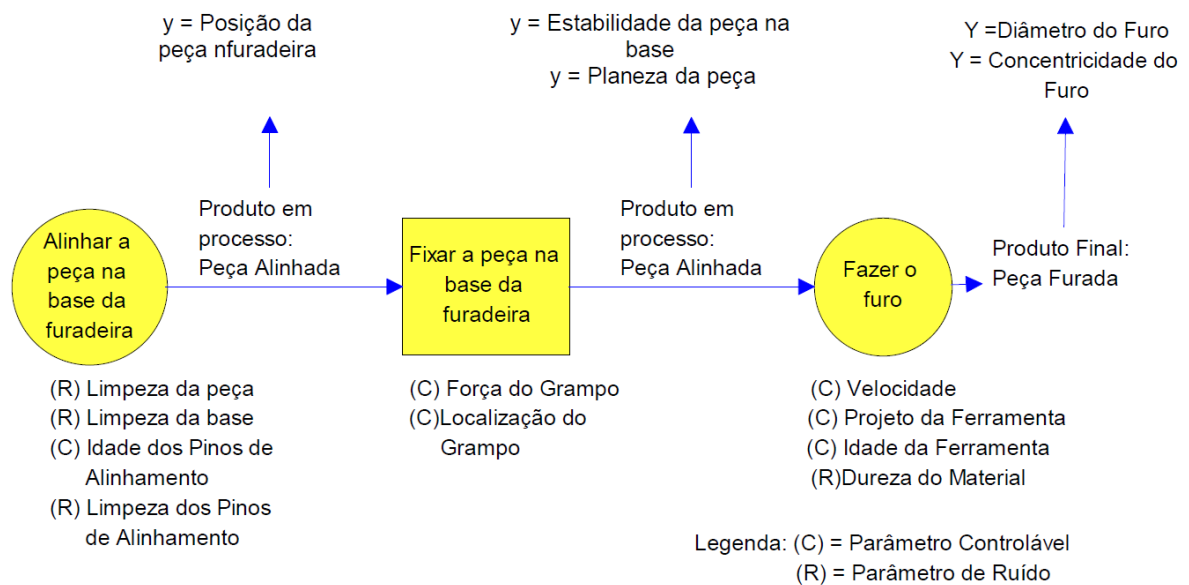


### 2.4.1.2 Mapa de Produto e Mapa de Processo

O mapa de processo é utilizado para registrar o conhecimento do processo. Esta ferramenta deve conter os limites do processo, as principais atividades realizadas no mesmo, as entradas e saídas de cada etapa, bem como os respectivos parâmetros (WERKEMA, 2002).

A Figura 14 exemplifica um mapa de processo de furação, contendo três etapas: alinhar a peça na base da furadeira, fixar a peça na base da furadeira e fazer o furo. Nesta imagem é possível visualizar as saídas de cada etapa com a denominação  $y$  na parte superior do mapa. Já os fatores do processo que impactam nestas saídas estão presentes abaixo de cada etapa do processo e são classificados como parâmetros controláveis (C) ou não controláveis, também chamados de ruídos (R).

Figura 14 – Exemplo de mapa de processo de furação.



Fonte: Usevicius (2004)

O mapa de produto é similar ao mapa de processo, mas com ênfase nos componentes relacionados ao produto. Esta ferramenta desdobra o produto e seus subcomponentes, atribuindo uma função a cada uma das partes com interação direta a uma variável resposta prescrita (SANDRI; BASTOS; PIUCCO, 2015). A partir deste, é possível avaliar os fatores relacionados ao produto que podem influenciar no fenômeno analisado.

No decorrer de um trabalho seis sigma são realizadas descobertas que influenciam no mapa de processo e de produto. Ambos os mapas devem ser revisitados, mantendo-os atualizados (AGUIAR, 2002). Estes mapas são geralmente alocados dentro do mapa de raciocínio para centralizar todas as informações do projeto.

### 2.4.1.3 Plano de Amostragem

Avaliar processos produtivos realizando medições em 100 % de tudo que é produzido pode gerar um custo muito elevado, inviabilizando a produção. Existem diferentes formas de coletar dados para evitar este tipo de problema, medindo uma parcela do volume produzido para caracterizar o processo. Entre alguns métodos de amostragem, destacam-se (PIUCCO et al., 2019):

- Amostragem aleatória ou observacional pura, a qual coleta peças do processo aleatoriamente, dificultando o conhecimento das causas que possam aparecer no decorrer do tempo;
- Amostragem direcionada, em que coleta-se dados a partir de combinações de fontes de variação, através de uma árvore de amostragem. Este é o método de amostragem geralmente utilizado em MSAs (análise do sistema de medição) e COV (*Components of Variation*, ou componentes de variação em tradução livre);
- Experimento planejado, o qual contempla um estudo a partir da coleta de dados manipulando variáveis e não apenas o resultado da observação do processo. Este estudo é chamado de DOE; (*Design of Experiment*, ou Planejamento de Experimentos em tradução livre) .

Para realizar uma boa estratégia de amostragem é primeiramente necessário definir as fontes de variação. Estas informações devem ser retiradas do mapa de raciocínio do projeto, visualizando principalmente o mapa de produto, o mapa de processo e as hipóteses levantadas (PIUCCO et al., 2019).

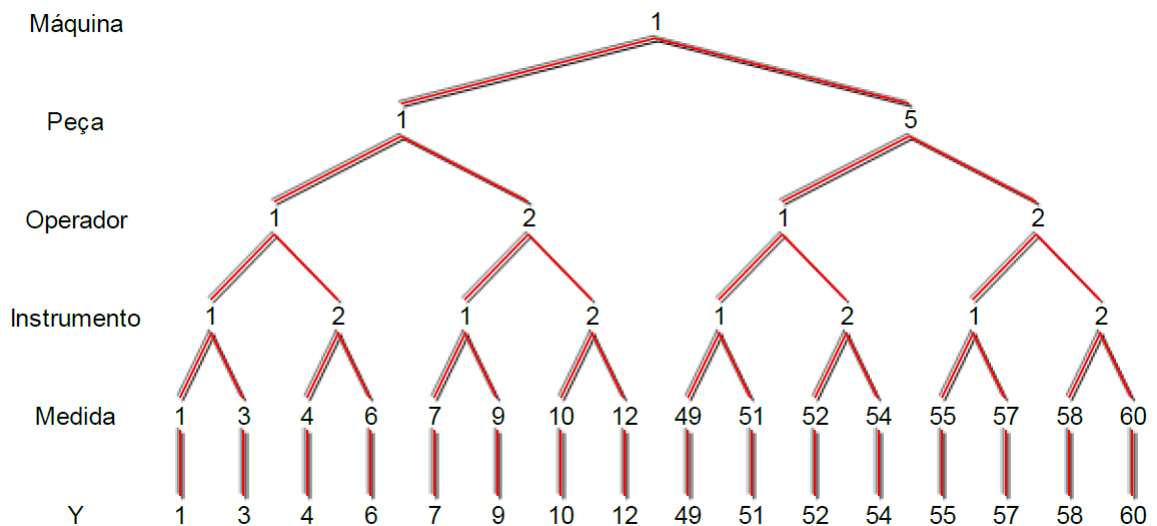
O conhecimento da frequência de mudança de cada fonte de variação ou variável é importante para definir os níveis da coleta de dados sugerida. A frequência de mudança pode ser definida como o intervalo de tempo em que as características das fontes de variação se alteram (PIUCCO et al., 2019). Um exemplo está em processos que possuem diferentes turnos de operação, o que deve ser levado em consideração ao gerar a estratégia de amostragem.

Outro passo muito importante para elaboração de um plano de amostragem é a sequência em que as fontes de variação são organizadas. Este sequenciamento deve considerar as restrições à randomização das medições, necessitando que as fontes de variação que possuem tal restrição sejam alocadas no topo da estratégia de amostragem (PIUCCO et al., 2019). Um exemplo de restrição a randomização é a utilização de diferentes turnos como uma característica a ser variada no experimento. Tal característica é de difícil randomização, pois resultaria em um elevado tempo para realização do experimento. Recomenda-se que fatores com elevado custo, tempo ou dificuldade de serem manuseados sejam alocados na parte superior da estratégia de amostragem.

A randomização dos ensaios deve ser realizada sempre que possível, com o objetivo de assegurar a independência estatística do estudo (AIAG, 2010). Quando isto não é considerado para realização do experimento, os dados coletados podem levar a interpretações erradas quanto a quais dos fatores avaliados são significativos (PIUCCO et al., 2019).

A Figura 15 apresenta um exemplo de estratégia de amostragem para um MSA. A distribuição visual do experimento apresentada na figura pode ser chamada de árvore de amostragem, a qual possui as fontes de variação (máquina, peça, operador, instrumento e medida) e o resultado da medição (Y) a sua esquerda. Ao lado de cada fonte de variação são atribuídos os níveis utilizados nos ensaios, sendo a utilização de 5 peças confeccionadas em uma mesma máquina, a qual é medida por 2 operadores diferentes, que utilizam 2 instrumentos de medição, repetindo a medição por 3 vezes em cada tentativa do experimento (PIUCCO et al., 2019). As linhas presentes na imagem facilita a visualização das combinações das fontes de variação utilizadas na estratégia.

Figura 15 – Exemplo de estratégia de amostragem para um MSA.



Fonte: Piucco et al. (2019)

O experimento realizado a partir da árvore de amostragem contida na Figura 15 resulta em 60 medidas, as quais são posteriormente avaliadas no MSA. Não existe uma receita única e padronizada para elaborar a estratégia de amostragem, sendo uma boa estratégia a que resultar na resposta aos questionamentos levantados para o sistema de medição (PIUCCO et al., 2019).

#### 2.4.1.4 Carta $\bar{X}$ - R

A utilização de cartas de controle é fundamental para o controle dos processos de medição e permite uma avaliação correta da conformidade de um produto ou de um diagnóstico. Além disso, estas cartas possibilitam visualizar de forma mais fácil as

necessidades de ações corretivas de um processo e até mesmo a necessidade de calibração do instrumento de medição. Estes gráficos são inicialmente propostos por Walter Shewhart na década de 1920 e os gráficos desenvolvidos segundo esses princípios são denominados cartas de controle de Shewhart (OLIVEIRA et al., 2013).

As cartas de controle podem ser utilizadas para avaliações de atributos (características que não podem ser expressas numericamente) ou de variáveis (características medida em uma escala numérica) (OLIVEIRA et al., 2013). Dentre as cartas de controle para variáveis destacam-se as cartas abaixo, sendo as cartas  $\bar{X}$  e R as mais utilizadas em MSAs (OLIVEIRA et al., 2013; PIUCCO et al., 2019):

- Cartas  $\bar{X}$  e R, a qual trabalha com média e amplitude de variação;
- Cartas  $\bar{X}$  e S, representando média e desvio padrão;
- Cartas I e MR, relacionando valores individuais e amplitude móvel;
- CUSUM, que apresenta soma cumulativa.

Ao realizar a análise de um sistema de medição, propõe-se um experimento que utilize uma árvore de amostragem, a qual necessita da definição das fontes de variação avaliadas, bem como o tamanho dos subgrupos. O tamanho do subgrupo refere-se à quantidade de uma mesma fonte de variação contida na estratégia de amostragem. Por exemplo, a realização de cinco conjuntos de resultado contendo três réplicas possui cinco subgrupos de tamanho três (OLIVEIRA et al., 2013).

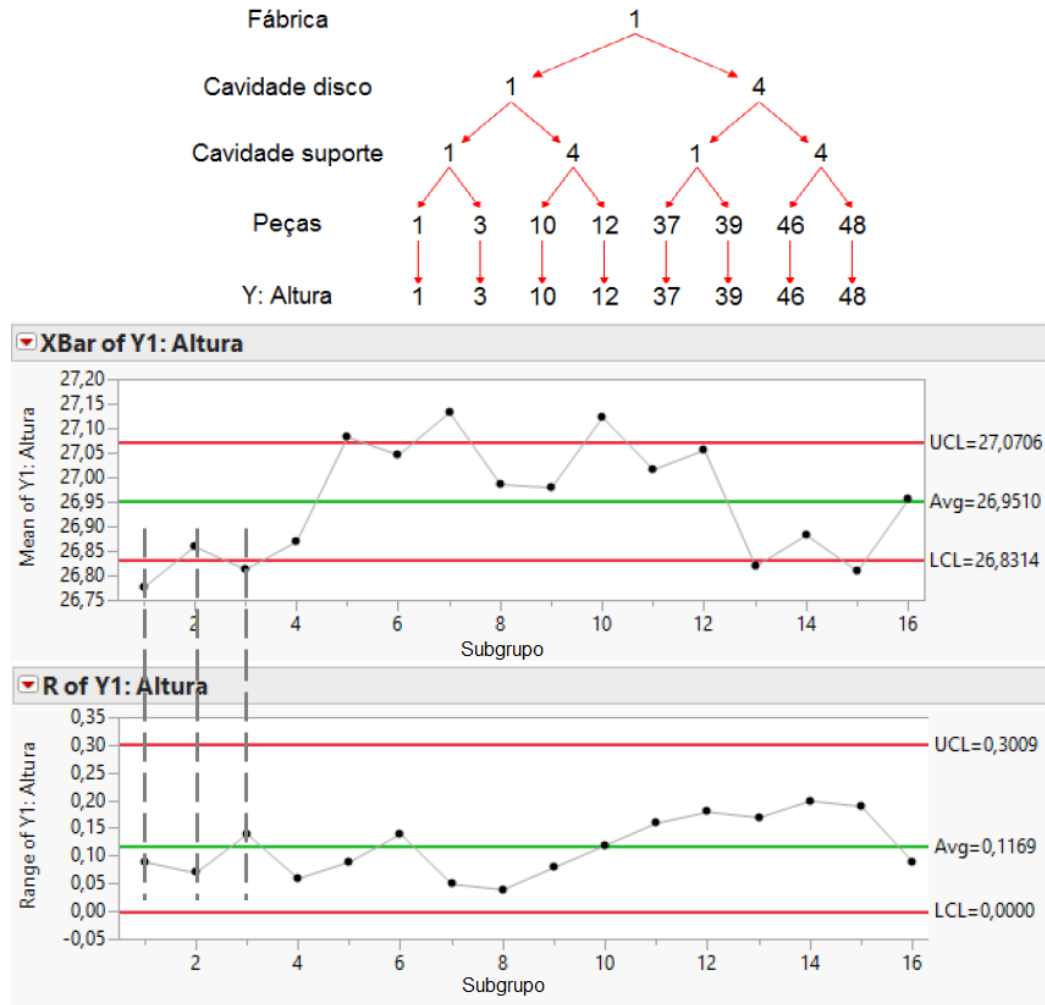
As cartas  $\bar{X}$  - R são utilizadas com o interesse de verificar se a variação está dentro ou fora do subgrupo (PIUCCO et al., 2019). Ambas contém no eixo das abcissas o subgrupo. Já no eixo das ordenadas, a carta  $\bar{X}$  possui a média de cada subgrupo, enquanto a carta R apresenta a variação máxima de cada subgrupo (diferença entre o maior e menor valor obtido no subgrupo).

Além dos pontos plotados, o gráfico apresenta duas linhas horizontais que representam os limites de controle das cartas, sendo o limite superior de controle (UCL - *Upper Control Limit*, em inglês) e o limite inferior de controle (LCL - *lower Control Limit*, em inglês). Ambos os limites são calculados através do desvio padrão dos subgrupos, estabelecendo uma estimativa para conter  $3\sigma$  entre a média do gráfico e seus limites, resultando no total de  $6\sigma$  entre os limites. Assim, estima-se que entre os limites de controle estão entre 99 % e 100 % dos pontos de um conjunto de dados homogêneo (PIUCCO et al., 2019).

A Figura 16 apresenta um exemplo da análise das medições de altura de peças, estando na sua parte superior a árvore de amostragem do experimento, contendo um subgrupo de tamanho 3 quanto a quantidade de peças. Ao centro da imagem é possível

visualizar a carta  $\bar{X}$  com base nos dados medidos e a parte inferior da figura contém a carta R deste experimento.

Figura 16 – Exemplo de árvore de amostragem, carta  $\bar{X}$  e carta R.



Fonte: Adaptado de Piucco et al. (2019)

Na elaboração das cartas  $\bar{X}$  - R recomenda-se que os resultados das médias e das amplitudes estejam alinhadas para uma melhor interpretação dos resultados (OLIVEIRA et al., 2013). A Figura 16 contém linhas verticais nos três primeiros pontos, representando que os valores de média e amplitude ligados pelas linhas correspondem ao mesmo subgrupo analisado. Por exemplo, o subgrupo 2 possui sua média (carta  $\bar{X}$ ) dentro dos limites de controle com valor aproximado de 28,87 mm e variação total (carta R) também dentro dos limites de controle, de aproximadamente 0,07 mm.

## 2.4.2 Análise do Sistema de Medição

Antes de realizar qualquer experimento de melhoria, é necessário definir as grandezas a serem medidas. Inicialmente é importante investir tempo e energia para definir as variáveis

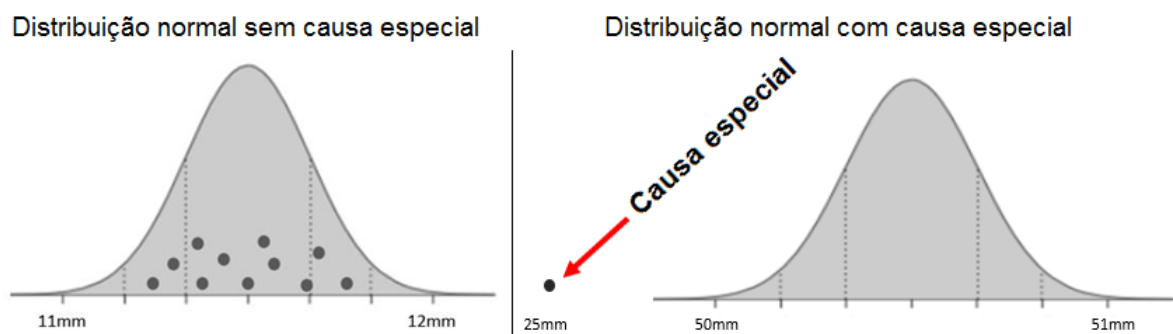
mensuráveis de saída do experimento, para identificação do que necessita ser melhorado (BERTELS; PATTERSON, 2003). A escolha das características a serem medidas é uma das primeiras preocupações da organização em trabalhos de melhoria (RAISINGHANI et al., 2005).

Após a escolha do trabalho, é necessário verificar se as variáveis mensuráveis de saída são medidas de forma confiável. A Análise do Sistema de Medição (em inglês *Measure System Analysis*, ou MSA) é a ferramenta utilizada para avaliar a capacidade de mensurar as características a serem otimizadas, realizando um estudo para abordar separadamente dois fatores: a repetibilidade e a reprodutibilidade (CARUSO; HELLENO, 2009). Além disso, outros dois fatores são geralmente utilizados nesta análise: a estabilidade das medições e a discriminação (PIUCCO et al., 2019).

#### 2.4.2.1 Estabilidade das Medições

O experimento realizado para avaliação do sistema de medição necessita estar estatisticamente controlado. Isso significa que sobre condições repetidas de medição o sistema deve apresentar variações relacionadas apenas a causas comuns e não devido a causas especiais (AIAG, 2010). As causas comuns podem ser definidas como uma variação aleatória e esperada do processo, não sendo atribuída uma causa específica, assim como apresentado em uma distribuição normal (lado esquerdo da Figura 17). Já as causas especiais são atribuídas a uma variação inesperada, não aleatória e com causa atribuível, assim como apresentado à direita da Figura 17 (PIUCCO et al., 2019).

Figura 17 – Exemplos de distribuição normal sem e com causa especial.

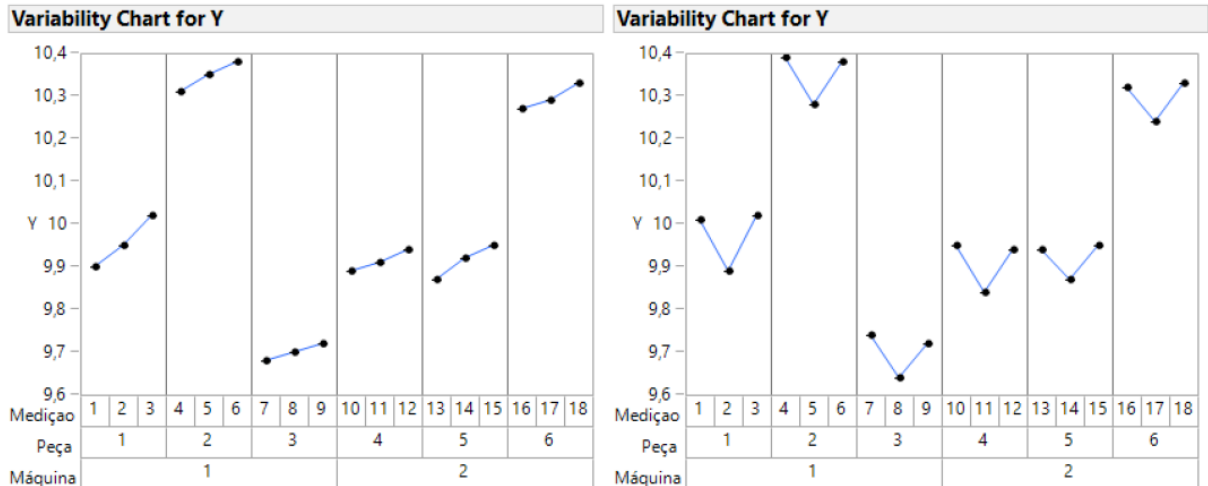


Fonte: Adaptado de Piucco et al. (2019)

A estabilidade de um instrumento de medição pode ser conceituada como uma propriedade do instrumento que mostra a constância de suas propriedades metrológicas ao longo do tempo (INMETRO, 2012; ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Dentro do MSA, a avaliação da estabilidade de medição procura desvios temporais de medição, ou seja, busca causas especiais evidenciadas nas medições realizadas ou tendências de medições. Caso seja observado algum problema de estabilidade de medição, o sistema precisa ser corrigido antes de iniciar uma nova coleta de dados (PIUCCO et al., 2019).

A análise da tendência de medição avalia as sequências de medidas em um determinado sentido, seja crescente ou decrescente, ou sequências onde ciclos se repetem de maneira não aleatória (PIUCCO et al., 2019). A Figura 18 apresenta a evidência de problemas de tendência, sendo que a primeira carta apresenta tendências crescentes de medição e a segunda carta apresenta comportamento repetido na segunda medição realizada em cada peça.

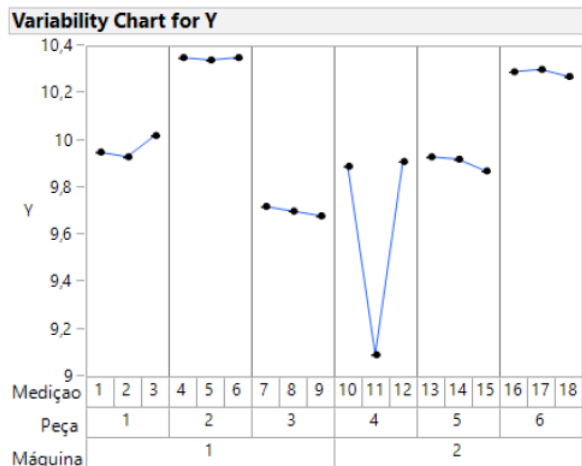
Figura 18 – Exemplos de problemas de tendência.



Fonte: Adaptado de Piucco et al. (2019)

Já a presença de causas especiais de medição é atribuída a alterações de curto prazo que são esporádicas e imprevisíveis (PIUCCO et al., 2019). A causa especial se destaca em um gráfico de distribuição de medições como um ponto muito abaixo ou muito acima dos demais. A Figura 19 apresenta um conjunto de medições em que se destaca a medição 11 como uma causa especial

Figura 19 – Representação de uma causa especial de medição.



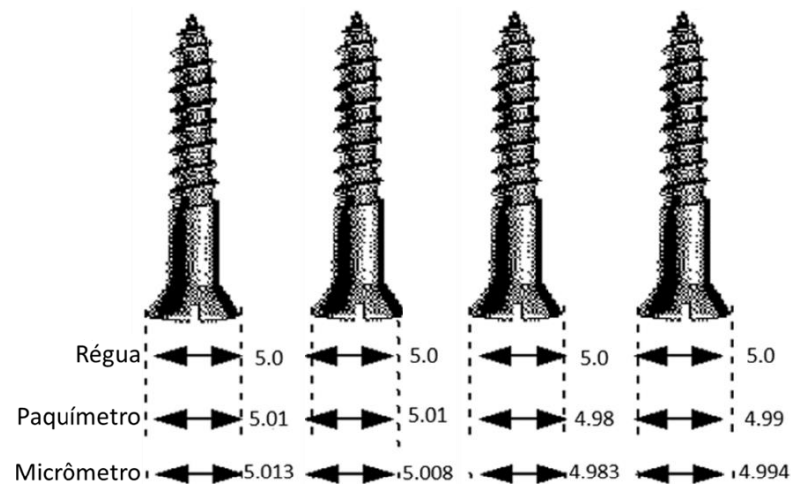
Fonte: Piucco et al. (2019)

### 2.4.2.2 Discriminação

A avaliação da discriminação está relacionada com a resolução do instrumento de medição, a qual é denominada como a menor diferença entre indicações que pode ser percebida no instrumento (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). A escolha de um instrumento com resolução adequada para o mensurando de interesse é fundamental para o conhecimento do fenômeno. Recomenda-se que a tolerância ou a variação do processo seja ao menos 10 vezes maior que a resolução do instrumento de medição (PIUCCO et al., 2019).

A Figura 20 apresenta quatro parafusos em que o diâmetro da cabeça foi medido com instrumentos diferentes. É possível observar que as medições realizadas com a régua não apresentaram diferenças entre as peças. Já as medições com micrômetro possibilitaram diferenciar o diâmetro entre as mesmas.

Figura 20 – Medições realizadas em mm com diferentes sistemas de medição.



Fonte: Piucco et al. (2019)

A análise de discriminação é realizada avaliando a variação entre os valores obtidos de medida a medida. Se a variação entre as medições, de um mesmo tratamento, encontrada no experimento for igual a zero, entende-se que o sistema de medição não apresenta uma adequada resolução do equipamento para medir a característica desejada, ou seja, a discriminação do sistema de medição não é adequado para a medição do mensurando (PIUCCO et al., 2019).

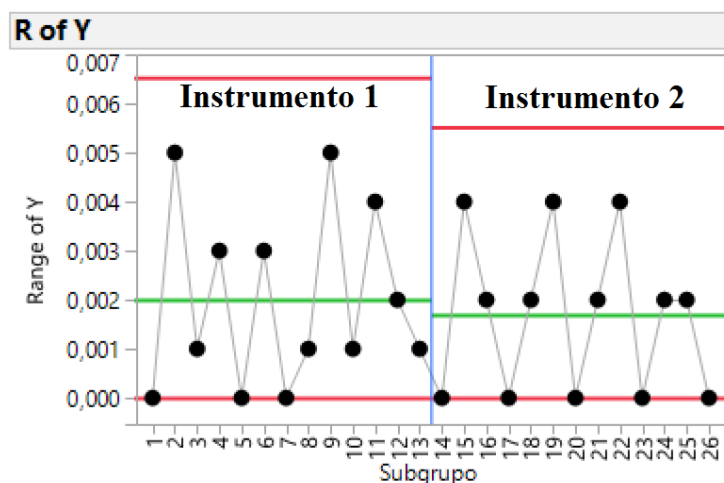
Uma maneira de avaliar a discriminação está no uso da carta R, avaliando a quantidade de categorias de dados dentro dos limites desta carta, aprovando a discriminação do experimento caso exista ao menos 4 categorias para um subgrupo de medida 2. Para experimentos com subgrupos de tamanho 3, 4 ou 5 recomenda-se o mínimo de 5 categorias e para subgrupos de tamanho superior a 5, o mínimo de 6 categorias (AIAG, 2010).

A Figura 21 apresenta a carta R de um experimento com subgrupo de tamanho dois, com dois instrumentos diferentes de mesma resolução (0,001 mm). É possível observar



que a discriminação do instrumento 1 está aprovada devido a presença de seis patamares, enquanto o instrumento 2 possui apenas três patamares, o que é inferior a quantidade mínima recomendada para este tamanho de subgrupo (quatro patamares).

Figura 21 – Carta R de experimento com diferentes instrumentos de medição.



Fonte: Piucco et al. (2019)

Os conceitos de discriminação e resolução são por vezes confundidos. Enquanto a discriminação analisa todo o sistema de medição, a resolução avalia somente o instrumento de medição. Há casos, como no exemplo acima, em que a resolução do instrumento de medição é satisfatória para o mensurando, mas a discriminação do sistema de medição não é adequada (PIUCCO et al., 2019).

#### 2.4.2.3 Repetibilidade

A repetibilidade é definida como a faixa de valores em que o erro aleatório de um sistema de medição é esperado (INMETRO, 2012). A análise da repetibilidade do sistema de medição é realizada ao utilizar um mesmo conjunto de condições de medições, o qual compreende no mesmo procedimento de medição, mesmos operadores, mesmo sistema de medição, mesmas condições de operação e mesmo local de medição, assim como medições realizadas em um mesmo objeto em intervalos curtos de tempo (INMETRO, 2012).

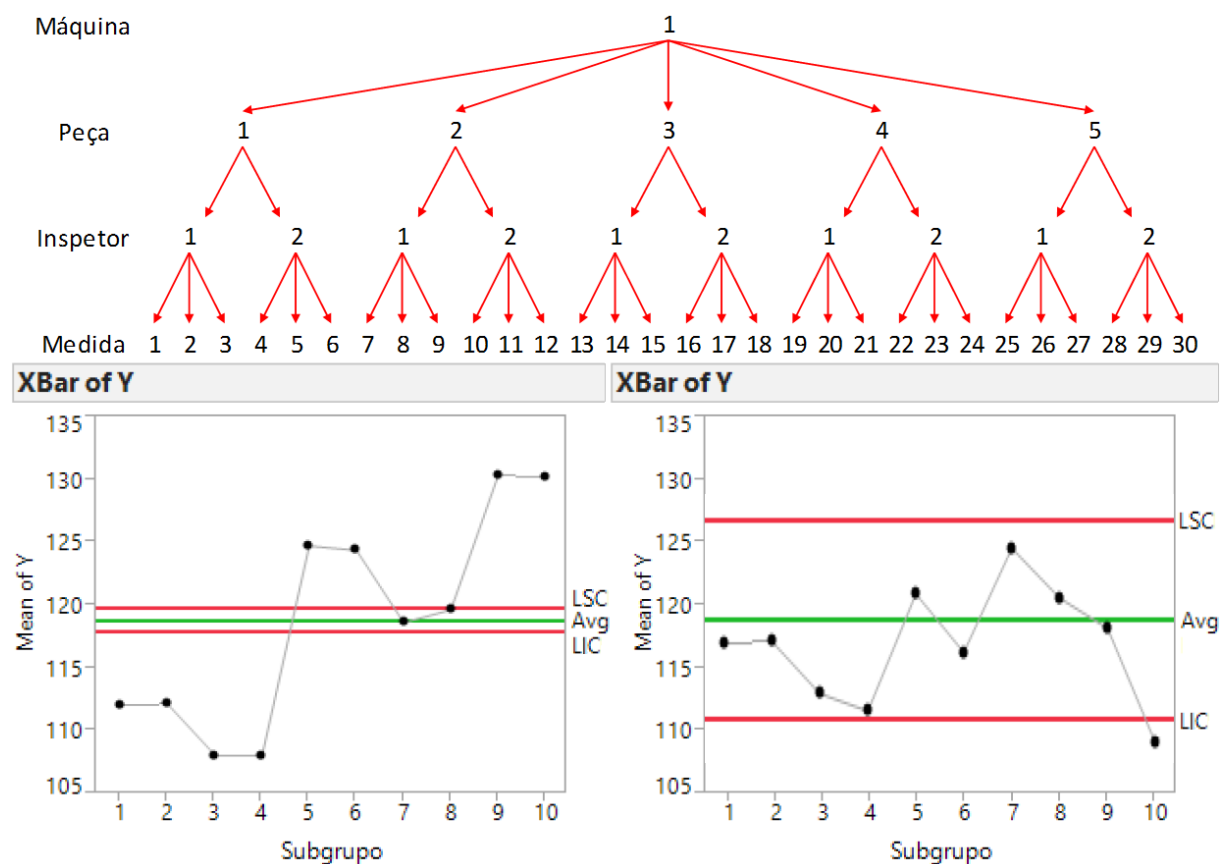
Para realizar esta análise, é possível utilizar o *variability chart* (carta de variação, em tradução livre), comparando visualmente os valores entre medições com fatores iguais. Outra forma de realizar esta análise é através da carta  $\bar{X}$ , na qual é possível identificar se a maior variação está dentro ou fora do subgrupo (PIUCCO et al., 2019).

A análise da carta  $\bar{X}$  é realizada ao comparar a quantidade de pontos dentro e fora dos limites de controle, ao comparar subgrupos de medida. Um experimento com boa repetibilidade possui a maioria dos pontos fora dos limites de controle, indicando que a maior variação ocorre entre os subgrupos. Quando a maioria dos pontos está entre os

limites de especificação é possível afirmar que a maior variação está ocorrendo entre as medidas, ou seja, dentro do subgrupo (PIUCCO et al., 2019).

A Figura 22 contém uma estratégia de amostragem em sua parte superior e dois exemplos de carta  $\bar{X}$  para esta estratégia. A carta à esquerda possui apenas dois pontos entre os limites de controle, o que mostra uma boa repetibilidade, estando a maior variação entre os subgrupos. Já a carta à direita apresenta a maioria dos pontos entre os limites de controle, ou seja, a maior variação está entre as medições de um mesmo tratamento (dentro dos subgrupos), não estando aprovado quanto a repetibilidade.

Figura 22 – Exemplos de carta  $\bar{X}$  de dois experimentos com mesma árvore de amostragem.



Fonte: Adaptado de Piucco et al. (2019)

Para melhor visualizar a variação de cada característica do experimento é possível calcular os componentes de variação dos dados coletados (PIUCCO et al., 2019). Uma alternativa para obter estes valores é a utilização do software JMP, o qual é utilizado durante a realização deste trabalho. Este software calcula os componentes de variação, também chamado de *Variance Components* na língua inglesa.

Para considerar que o sistema de medição possui boa repetibilidade é possível considerar o critério orientativo presente na Tabela 1, a qual relaciona a variação que medidas diferentes de um mesmo tratamento representa na variação total do experimento.

Tabela 1 – Critério orientativo para aprovação da repetibilidade.

| Avaliação de repetibilidade através dos componentes de variação |                               |
|---|-------------------------------|
| Característica avaliada   | Critério                      |
| Varição entre medidas   | $\leq 10\%$ da variação total |

Fonte: Piucco et al. (2019)

A Figura 23 apresenta os componentes de variação de um experimento. Em destaque está apresentada a componente medida, representando 3,1 % da variação total do experimento, atendendo ao critério orientativo para aprovar o sistema de medição quanto a repetibilidade.

Figura 23 – Componentes de variação de um experimento - Repetibilidade.

| Variance Components                |               |            |             |                |
|------------------------------------|---------------|------------|-------------|----------------|
| Component                          | Var Component | % of Total | 20 40 60 80 | Sqrt(Var Comp) |
| Total                              | 0,00005628    | 100,0      |             | 0,00750        |
| Instrumento                        | 0,00004016    | 71,4       |             | 0,00634        |
| Inspetor*Instrumento               | 0,00000658    | 11,7       |             | 0,00256        |
| Inspetor*Peças                     | 0,00000578    | 10,3       |             | 0,00240        |
| Medidas                            | 0,00000172    | 3,1        |             | 0,00131        |
| Peças*Instrumento                  | 0,00000111    | 2,0        |             | 0,00106        |
| Inspetor*Peças*Instrumento         | 0,00000093    | 1,6        |             | 0,00096        |
| Inspetor                           | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Peças                              | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Inspetor*Medidas                   | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Peças*Medidas                      | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Inspetor*Peças*Medidas             | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Instrumento*Medidas                | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Inspetor*Instrumento*Medidas       | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Peças*Instrumento*Medidas          | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Inspetor*Peças*Instrumento*Medidas | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Within                             | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |

Fonte: Piucco et al. (2019)

#### 2.4.2.4 Reprodutibilidade

Já a reprodutibilidade faz referência a um conjunto de condições de medição que envolvem diferentes locais de medição, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares (INMETRO, 2012). Em outras palavras, a análise da reprodutibilidade de um sistema de medição resulta no conhecimento de quais fatores da medição, tanto provenientes do operador quanto a parâmetros de medição, influenciam no resultado da mesma.

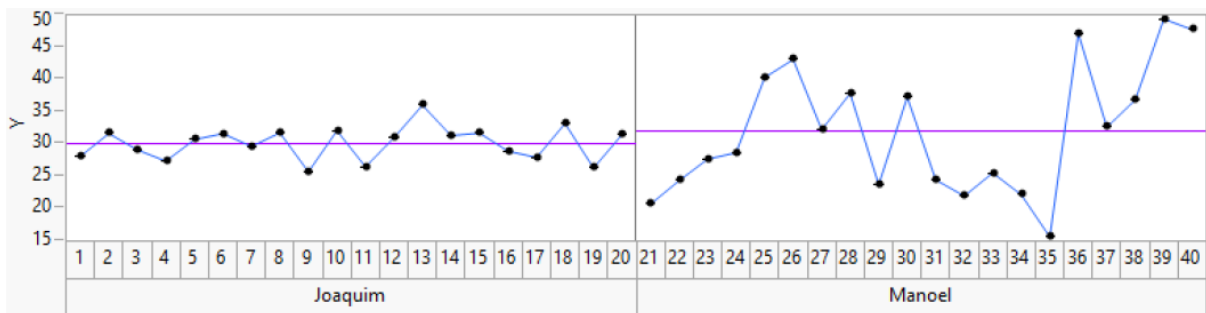
A reprodutibilidade é similar a repetibilidade, mas considerando condições de medição diferenciadas, como diferentes operadores, locais de medição e equipamentos

de medição. Esta avaliação é muito utilizada para fins comparativos entre empresas e laboratórios.

Uma forma de avaliação da reprodutibilidade é através do *variability chart*, conforme apresentado na Figura 24. Esta ferramenta possibilita avaliar quais fatores da árvore de amostragem estão influenciando nos resultados.

Um experimento que não possui uma boa reprodutibilidade pode inviabilizar o estudo, pois gera dúvidas quanto a quais dados estão corretos (AIAG, 2010). A Figura 24 apresenta medições realizadas por operadores diferentes para os mesmos mensurandos. É possível observar que o operador Manoel apresentou medições com maior variação que o operador Joaquim, mostrando que o experimento não possui uma boa reprodutibilidade entre os operadores de medição. A partir destes dados é possível recomendar duas ações: trabalhar no sistema de medição para que ambos operadores possuam variação similar em suas medições ou utilizar o operador que representa melhor o processo a ser avaliado (PIUCCO et al., 2019).

Figura 24 – Exemplo de medições realizadas com dois operadores diferentes.



Fonte: Piucco et al. (2019)

Assim como na repetibilidade, a avaliação da reprodutibilidade pode ser realizada através dos componentes de variação. Porém, nesta análise avalia-se as variações relacionadas ao instrumento de medição e aos inspetores (operadores de medição) (PIUCCO et al., 2019). A Tabela 2 apresenta os critérios orientativos para aprovação do MSA quanto a reprodutibilidade.

Tabela 2 – Critério orientativo para aprovação da reprodutibilidade.

| Avaliação de reprodutibilidade através dos componentes de variação |                               |
|--|-------------------------------|
| Característica avaliada  | Critério                      |
| Varição entre instrumentos   | $\leq 10\%$ da variação total |
| Varição entre inspetores   | $\leq 10\%$ da variação total |
| Interação entre instrumentos e inspetores                          | $\leq 10\%$ da variação total |

Fonte: Piucco et al. (2019)

A Figura 25 apresenta os componentes de variação de um experimento com diferentes

instrumentos de medição e operador. É possível observar em destaque os componentes de variação relacionadas ao operador, ao instrumento de medição e a interação entre operador e instrumento. Os valores observados para as três componentes de variação destacadas são inferiores aos limites orientativos da Tabela 2, ou seja, o sistema de medição está aprovado quanto a reprodutibilidade.

Figura 25 – Componentes de variação de um experimento - Reprodutibilidade.

| Variance Components                 |               |            |                |
|-------------------------------------|---------------|------------|----------------|
| Component                           | Var Component | % of Total | Sqrt(Var Comp) |
| Total                               | 0,00095553    | 100,0      | 0,03091        |
| Peças                               | 0,00085381    | 89,4       | 0,02922        |
| Operador                            | 0,00004962    | 5,2        | 0,00704        |
| Instrumento                         | 0,00004021    | 4,2        | 0,00634        |
| Instrumento*Peças                   | 0,00000643    | 0,6726     | 0,00254        |
| Medições                            | 0,00000472    | 0,4937     | 0,00217        |
| Peças*Operador                      | 0,00000074    | 0,0776     | 0,00086        |
| Instrumento*Operador                | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Instrumento*Peças*Operador          | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Instrumento*Medições                | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Peças*Medições                      | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Instrumento*Peças*Medições          | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Operador*Medições                   | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Instrumento*Operador*Medições       | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Peças*Operador*Medições             | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Instrumento*Peças*Operador*Medições | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |
| Within                              | 0,00000000    | 0,0        | 0,00000        |

Fonte: Piucco et al. (2019)

Na próxima seção são abordados os materiais e equipamentos utilizados nos experimentos realizados para a análise dos sistemas de medição listados até aqui. Ela contém alguns resultados preliminares, avaliando previamente as medições em pressão sonora e em vibração. Nesta seção também é apresentado o planejamento experimental para análise dos sistemas de medição, justificando as escolhas dos parâmetros utilizados no experimento.

## 3 MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O presente capítulo aborda todo o planejamento das análises e experimentos necessários para a avaliação dos sistemas de medição. Ele inicia com a apresentação do aparato experimental utilizado nos ensaios, o que está presente na seção 3.1.

A seção 3.2 apresenta uma avaliação preliminar dos sistemas de medições abordados na revisão bibliográfica. Os resultados destes testes são importantes para a realização do planejamento experimental.

Por fim é apresentado o planejamento dos experimentos a serem realizados na seção 3.3. Esta seção contém a árvore de amostragem definida para o experimento, bem como o raciocínio utilizado para elaboração da mesma.

### 3.1 Aparato Experimental

Esta seção visa apresentar o aparato experimental a ser utilizado no trabalho. Os equipamentos foram definidos a partir da revisão bibliográfica e da disponibilidade dos equipamentos de medição na empresa parceira, local a serem realizados os ensaios.

Os requisitos do sistema são definidos na seção 3.1.1. Em seguida, a seção 3.1.2 detalha os principais componentes que serão utilizados, sendo organizado em componentes para medição de pressão sonora na seção 3.1.2.1 e medições de vibração em 3.1.2.2.

#### 3.1.1 Objetivos e Restrições do Sistema

Conforme visto anteriormente, o objetivo do trabalho consiste em avaliar diferentes sistemas de medição para mensurar um ruído específico, apresentado em determinadas condições no rolamento, chamado *squeal noise*. Este ruído pode ser mensurado por diferentes técnicas e cada uma delas necessita de equipamentos específicos.

Na revisão bibliográfica estão destacadas três maneiras possíveis de mensurar o ruído de interesse: medição de pressão sonora, medição de vibração em aceleração e o envelope de aceleração. Cada uma destas técnicas possui vantagens e desvantagens, sendo a escolha adequada dos equipamentos e os parâmetros de medição características fundamentais para obter bons resultados.

Os equipamentos utilizados necessitam de uma interface que possibilite a medição em motores elétricos, com fácil manipulação dos seus componentes. Além disso, é impor-

tante que os equipamentos possibilitem o armazenamento dos dados obtidos durante os ensaios para posterior processamento dos dados e averiguação.

Todos os equipamentos selecionados devem possibilitar a utilização nos laboratórios da empresa parceira, pois os ensaios são realizados neste local. Isto ocorre devido às dificuldades de transporte e operação dos motores, já que o ruído geralmente se faz presente em motores de médio e grande porte.

### 3.1.2 Equipamentos Utilizados

Durante a realização dos experimentos, três técnicas de medição de ruído foram analisadas. A medição de pressão sonora necessita de um sinal diferente do necessário para as medições de vibração. Com isso, a seção 3.1.2.1 apresenta os equipamentos utilizados para esse sistema de medição.

As medições de vibração são executadas por um mesmo sistema de medição, embora sejam realizadas em processos de medição diferentes (espectro de aceleração e envelope de aceleração). A diferença entre os processos de medição está no processamento do sinal obtido pelo mesmo sistema de medição. Os equipamentos utilizados neste sistema são apresentados na seção 3.1.2.2

Além dos instrumentos de medição, um software de análise estatística é necessário para facilitar a avaliação dos dados retirados de cada instrumento de medição. Neste trabalho utilizou-se o software JMP, pertencente ao instituto SAS. O software possui diversas funcionalidades como a exibição dos dados no *variability chart* e a criação de cartas de controle.

Todos os equipamentos e softwares mencionados são de propriedade da empresa parceira, estando disponíveis para utilização nos ensaios previstos.

#### 3.1.2.1 Equipamentos para Medição de Pressão Sonora

Existem diversos equipamentos para medição de pressão sonora. Neste trabalho é utilizada uma configuração de equipamentos que consiste em: microfone (transdutor), pré-amplificador, dispositivo de aquisição de dados e um software para tratamento do sinal. A Figura 26 demonstra a cadeia de medição de pressão sonora utilizada.

O transdutor utilizado é o microfone da fabricante *Brüel & Kjær*, modelo 4188. Em conjunto com o microfone é adicionado o pré-amplificador de mesmo fabricante e modelo 2671, com o objetivo de aumentar a amplitude do sinal medido. A Figura 27 apresenta algumas características importantes destes componentes.

O sinal obtido pelo microfone é amplificado pelo pré-amplificador para passar pela placa de aquisição de dados *Photon +*, a qual faz a interface do sinal com o software de



computador. O software utilizado no experimento é denominado *RT Pro Photon*. Ambos, a placa de aquisição de dados e o software, são da fabricante *Brüel & Kjær*.

Figura 26 – Esquema da cadeia de medição para pressão sonora.



Fonte: Adaptado de WEG Equipamentos Elétricos SA (2019) e Brüel & Kjær (2016b)

Figura 27 – Características do microfone e do pré-amplificador.

#### Especificações - Microfone 4188

|   |                     |
|---|---------------------|
| Sensibilidade em circuito aberto (250 Hz) | 31,6 mV/Pa          |
|   | - 30±2 dB re 1 V/Pa |
| Frequência limite inferior (-3 dB)        | 1 a 5 Hz            |
| Capacitância (250 Hz)                     | 12 pF               |
| Amplitude máxima de medição dinâmica      | >146 dB             |
| Máxima pressão sonora (pico)              | 157 dB              |
| Temperatura de operação                   | - 30 °C a 125 °C    |



#### Especificações - Microfone 4188 e pré-amplificador 2671

| mV/Pa | dB re 1 V/Pa | ±2 dB – Amplitude de frequência (Hz) | Amplitude dinâmica (dB) |
|-------|--------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 31,6  | -30          | 20 000 a 12 500                      | 19 a 138                |



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær (2014), Brüel & Kjær (2016a) e Brüel & Kjær (2016c)

Durante a medição de pressão sonora é utilizada a escala dB (A) por apresentar uma resposta similar ao percebido pelo ouvido humano. Com base nas normas ISO 1680 e ISO 3744, as quais apresentam informações relevantes para o ensaio de ruído em máquinas elétricas girantes, definem-se alguns parâmetros para a realização da medição.

Entre estes parâmetros é possível citar a utilização de um local de ensaio em que a presença do ruído ambiente com a máquina desligada (também conhecido como ruído de



fundo) possua diferença de amplitude igual ou superior a 15 dB (A) em relação ao ruído de interesse. Para isso é realizada a medição dentro de uma câmara semi anecoica.

Outro fator importante é a realização de uma média dos valores obtidos nos primeiros 10 segundos de medições, com o objetivo de estabilizar os valores medidos e de não apresentar sinais que possam mascarar a real medição, obtendo um espectro sem a presença de componentes que não se tenha interesse. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de medição utilizados no ensaio de pressão sonora.

Tabela 3 – Principais configurações utilizadas na medição de pressão sonora.

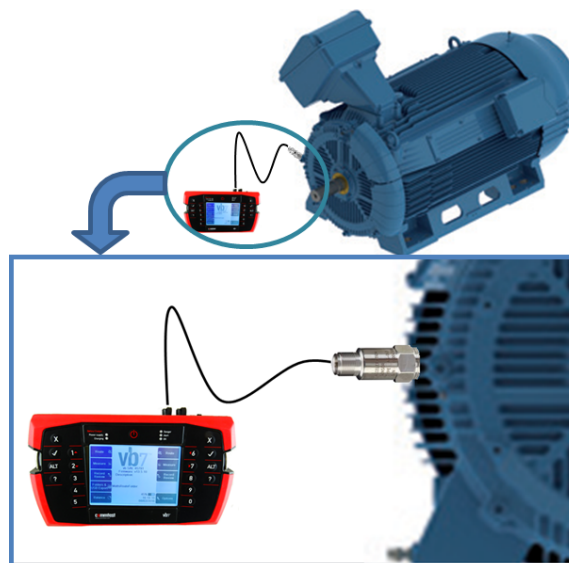
| <b>Medição de pressão sonora</b> |                        |
|----------------------------------|------------------------|
| <b>Característica</b>            | <b>Valor Utilizado</b> |
| Número de linhas da FFT          | 800 linhas             |
| Frequência mínima                | 10 Hz                  |
| Frequência máxima                | 10 kHz                 |
| Unidade                          | dB (A)                 |

Fonte: Autor

### 3.1.2.2 Equipamentos para Medição de Vibração

A medição de vibração em aceleração consiste em um transdutor chamado acelerômetro, de um amplificador e de um analisador de vibração, o qual realiza o tratamento do sinal proveniente do acelerômetro de acordo com o que o operador selecionou como resposta de interesse. A Figura 28 apresenta de maneira esquemática a cadeia de medição do sistema.

Figura 28 – Esquema da cadeia de medição para aceleração.



Fonte: Adaptado de WEG Equipamentos Elétricos SA (2019), Backer Hughes (2016) e Brüel & Kjær (2019)

O acelerômetro utilizado nos experimentos é da fabricante *IMI* do tipo Piezoelétrico, uniaxial. O modelo é 603C01, o qual já possui um amplificador em conjunto com o transdutor. A Tabela 4 possui as principais características do componente, destacando-se metrologicamente o erro de linearidade em 1 %. Já a Figura 29 contém a imagem do acelerômetro utilizado.

Tabela 4 – Principais características do acelerômetro *IMI* tipo 603C01.

| <b>Acelerômetro <i>IMI</i> tipo 603C01</b> |   |
|--|---|
| <b>Característica</b>                      | <b>Valor</b>                                |
| Sensibilidade ( $\pm 10\%$ )               | 10,2 mV/(m/s <sup>2</sup> ) ou 100 mV/g     |
| Intervalo de medição                       | $\pm 490$ m/s <sup>2</sup> ( $\pm 50$ g)    |
| Intervalo de frequência                    | 0,5 Hz a 10 000 Hz                          |
| Frequência natural                         | 25 kHz                                      |
| Erro de linearidade                        | $\pm 1\%$                                   |
| Limite de sobrecarga (choque)              | 49 050 m/s <sup>2</sup> Pico (5 000 g Pico) |
| Temperatura de operação                    | - 54 °C a 121 °C                            |
| Grau de proteção                           | IP68  |

Fonte: Adaptado de IMI Sensors (2007)

Figura 29 – Acelerômetro *IMI* tipo 603C01.



Fonte: Adaptado de IMI Sensors (2007)

O analisador de vibração utilizado nos testes é da antiga Commtest, a qual foi adquirida pela Bently Nevada (pertencente ao grupo General Electric). Este analisador permite medições em dois canais simultaneamente e pode realizar diversas funções como espectro de vibração, *Coast Down*, balanceamento, demodulação (envelope) e tacômetro (medição de rotação).

A Tabela 5 contém as principais características do analisador de vibração utilizado nos experimentos, destacando metrologicamente um erro máximo de  $\pm 1\%$  o valor de escala para medidas em corrente contínua (CC). O equipamento possui uma interface com o computador, em que é possível baixar os dados salvos durante a medição e converter em arquivo digital de formato comumente utilizado (.jpeg, .pdf, .doc, entre outros), mas não permite que o sinal seja salvo durante um período de tempo de forma contínua. A Figura 30 apresenta o equipamento.

Tabela 5 – Principais características do VB7.

| <b>Analisador de Vibração VB7</b> |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>Característica</b>             | <b>Valor</b>                                      |
| Sensores compatíveis              | Acelerômetro, Velocidade, Deslocamento e corrente |
| Conectores                        | 2 canais BNC (CH1 e CH2)                          |
| Máxima aceleração medida          | 10 000 m/s <sup>2</sup> (1 000 g)                 |
| Máxima velocidade medida          | 25 000 mm/s                                       |
| Máximo deslocamento medido        | 500 mm  |
| Unidade de aceleração             | m/s <sup>2</sup> , g ou adB                       |
| Unidade de velocidade             | m/s, in/s ou vdB                                  |
| Unidade de deslocamento           | m, $\mu$ m ou polegadas                           |
| Parâmetro estatístico             | Zero a Pico, Pico a Pico ou RMS                   |
| Frequência máxima                 | 26 opções entre 25 Hz e 40 kHz                    |
| Resolução                         | 400, 800, 1 600, 3 200 ou 6 400 linhas            |
| Número de médias                  | 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 ou 128                     |
| Filtros de frequência             | 26 filtros entre 125 Hz e 1,25 kHz                |
| Erro de medição (CA)              | $\pm 1$ % do valor medido                         |
| Erro de medição (CC)              | $\pm 1$ % do valor de escala                      |

Fonte: Adaptado de Backer Hughes (2016)

Figura 30 – Analisador de vibração VB7.



Fonte: Adaptado de Backer Hughes (2016)

Durante as medições, dois processos de medição são avaliados: o espectro de vibração para a medição de aceleração e o espectro de envelope de aceleração. A Tabela 6 contém os parâmetros de medição utilizados em cada processo de medição em vibração, sendo o sinal tratado em corrente contínua (CC) para ambas grandezas.

Tabela 6 – Principais configurações utilizadas no analisador de vibrações.

| <b>Espectro de Aceleração</b> |                        | <b>Espectro de Envelope</b> |                        |
|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| <b>Característica</b>         | <b>Valor Utilizado</b> | <b>Característica</b>       | <b>Valor Utilizado</b> |
| Número de linhas              | 3 200 linhas           | Número de Linhas            | 800 linhas             |
| Frequência mínima             | 12 Hz                  | Frequência mínima           | 8 Hz                   |
| Frequência máxima             | 10 kHz                 | Frequência máxima           | 1 kHz                  |
| Unidade                       | g Pico                 | Unidade                     | g Pico a Pico          |
| -                             | -                      | Filtro                      | 250 Hz a 10 KHz        |

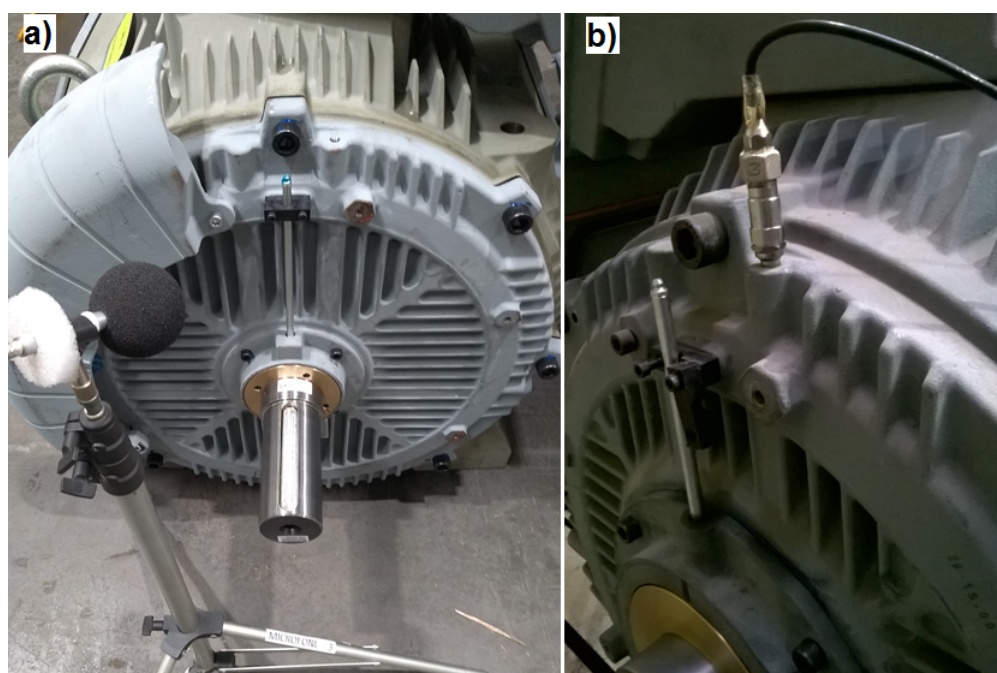
Fonte: Autor

## 3.2 Avaliação Preliminar

Ensaio preliminares foram realizados para verificar se os métodos de medição apresentados previamente conseguem mostrar a alteração dos níveis medidos enquanto a máquina apresenta ou não o ruído. A partir desta análise foram avaliados os métodos de medição utilizados no plano de amostragem experimental.

Os ensaios foram realizados em um motor protótipo da empresa parceira. Durante a operação deste motor nota-se que o *squeal noise* possui um comportamento intermitente, ou seja, o ruído está aparente em determinados momentos, mas desaparece em outros. Com isso, aplicou-se o método de medição de pressão sonora e o espectro de vibração em aceleração. A Figura 31 apresenta os ensaios sendo realizados no motor.

Figura 31 – Ensaio de medição de pressão sonora e de vibração.



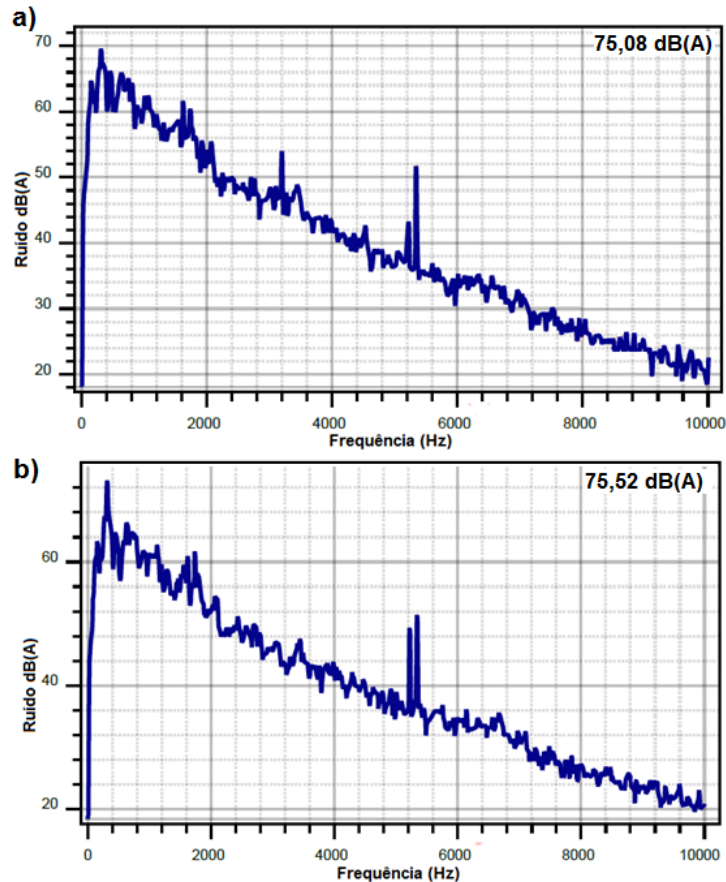
Legenda: a) Medição de pressão sonora; b) Medição de vibração.

Fonte: Autor

A Figura 32 mostra os espectros de pressão sonora medidos em dois momentos, sendo um com a presença de ruído e o outro sem. Estes espectros contêm o nível global de ruído no canto superior direito, em dB (A).

Não é possível afirmar, analisando visualmente, uma relação entre a variação das amplitudes de alguma região do espectro com a presença ou não do ruído de interesse. Além disso, é possível observar que a diferença entre os valores globais medidos, o qual equivale a 0,44 dB (A), é um valor baixo. Logo, o sistema de medição de pressão sonora utilizado neste trabalho, com os parâmetros de medição definidos para este ensaio, não aparenta ser efetivo para a avaliação do *squeal noise*.

Figura 32 – Espectros de pressão sonora com e sem a presença de ruído.



Legenda: a) Medição sem *squeal noise*; b) Medição com *squeal noise*.

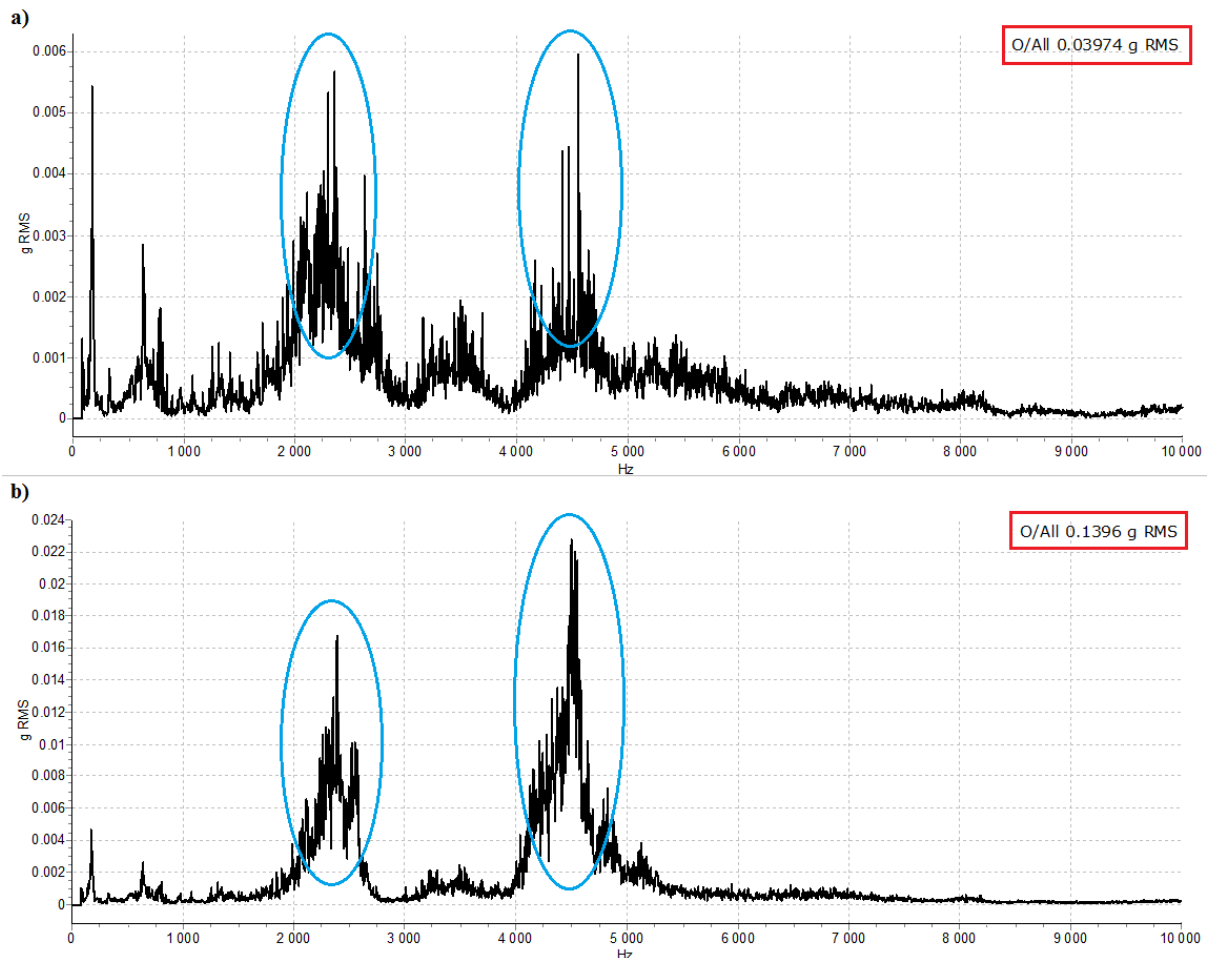
Fonte: Autor

Um experimento similar é realizado medindo o espectro de aceleração. Ao avaliar instantaneamente o espectro de vibração, nota-se um aumento abrupto da amplitude medida, conforme o apresentado na Figura 33. O nível global de vibração, o qual está contido no canto superior direito de cada espectro em g RMS (destaque em vermelho), aumenta em aproximadamente 350 % na condição em que o ruído de interesse é percebido. Isso evidencia uma forte relação do sistema de medição com o *squeal noise*. Também é possível notar a região do espectro em que os picos apresentam um aumento de amplitude (região próxima de 2 300 Hz e 4 500 Hz, destacada em azul).

Os ensaios realizados apresentam diferenças em suas respostas, ao comparar a pressão sonora e o espectro de aceleração. Nota-se uma melhor relação entre os espectros de vibração e a presença ou não do ruído, pois os espectros mostram uma grande elevação de sua amplitude com o surgimento do fenômeno.

Como o ruído pode apresentar-se de forma intermitente, fazendo com que os níveis de vibração sofram variação no tempo, opta-se por realizar as medições durante um período, registrando o maior valor encontrado. Este procedimento garante que a medição não apresente variação devido ao comportamento intermitente do *squeal noise*.

Figura 33 – Espectros de vibração em aceleração sem e com ruído no rolamento.



Legenda: a) Sem a presença de *squeal noise*; b) Com a presença de *squeal noise*.

Fonte: Autor

Os ensaios realizados com a medição de pressão sonora não apresentam boa relação entre o ruído presente no motor e os espectros gerados no ensaio. Uma possível causa para isso ocorrer é o grande tempo de aquisição dos dados durante ensaio, já que optou-se por realizar a média de 10 segundos de medições. Como este tempo é relativamente elevado, o ruído de interesse aparece e desaparece algumas vezes durante as medições para um espectro de pressão sonora.

Tendo em vista a dificuldade encontrada na medição do ruído através da pressão sonora e da forte relação entre ruído e o espectro de aceleração, decide-se por levar ao plano de amostragem apenas o espectro de vibração em aceleração e o envelope de aceleração. A não utilização da medição de pressão sonora se dá devido às limitações dos equipamentos de medição da empresa parceira e ao fato da análise de falhas em rolamento ser comumente utilizada através de técnicas de análise de vibração.



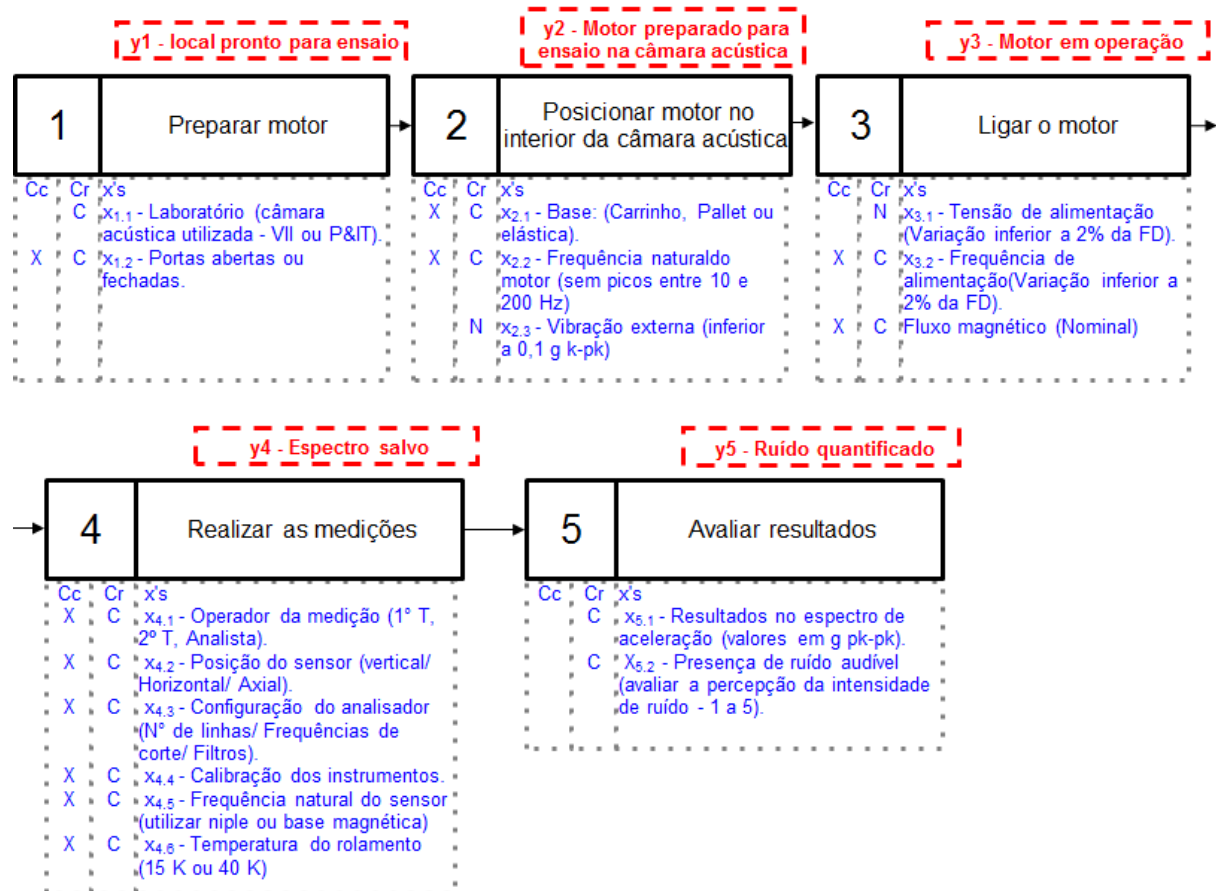
### 3.3 Planejamento Experimental

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, a análise dos sistemas de medição é realizada abordando quatro fatores: repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade das medições e discriminação. Para avaliar estes fatores é necessário um experimento controlado, variando fatores presentes no produto ou no processo de medição.

O primeiro passo realizado para avaliação dos fatores a serem levados para o experimento é a elaboração de um mapa de raciocínio. Este mapa apresenta, entre outras informações, o objetivo do trabalho, hipóteses quanto ao fenômeno estudado, mapas de processo e produto e o histórico do projeto.

A elaboração de um mapa de processo de medição auxilia na avaliação de fatores que podem influenciar na medição do ruído. Neste mapa consta cada etapa do processo, indicando os fatores (x) que influenciam no resultado da respectiva etapa (y). Além disso, é possível classificar cada fator como crítico (Cc) e apresentar se o mesmo é controlável (Cr). A Figura 34 apresenta o mapa de processo de medição gerado neste trabalho.

Figura 34 – Mapa de processo de medição.



A partir do levantamento dos fatores que influenciam no processo de medição, é necessário avaliar qual a ação será tomada para cada um destes fatores, durante o experimento. O resultado dessa decisão pode ser classificada como: Ignorar, Fixar, Monitorar ou Controlar.

Segundo Piucco et al. (2019) a escolha do que fazer com as fontes de variação deve estar relacionada com a necessidade de aprender sobre a mesma e com a habilidade de controle. O Quadro 1 apresenta um resumo de como avaliar as ações a serem definidas para cada fator. Vale ressaltar que este quadro serve como auxílio para escolha de como tratar cada variável, sendo o responsável pelo projeto encarregado por definir as tratativas com base em seu raciocínio crítico.

Quadro 1 – Direcionamento quanto a escolha da tratativa a ser adotada em cada variável.

| Preciso aprender? | Habilidade de controle |           |
|-------------------|------------------------|-----------|
|                   | ALTA                   | BAIXA     |
| SIM               | Controlar              | Monitorar |
| NÃO               | Manter constante       | Ignorar   |

Fonte: Piucco et al. (2019).

Este direcionamento auxilia a avaliar cada fator apresentado no mapa de processo de medição, dando ênfase aos fatores abordados como críticos. Através desta orientação, as tratativas das variáveis críticas são definidas, resultando nas informações presentes na Figura 35.

Figura 35 – Tratativa das variáveis críticas do processo de medição.

| VARIÁVEIS CRÍTICAS   |  | TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS NO MSA                            |                       |
|--|--|--|-----------------------|
|  |  | Variável   | Tratamento            |
| X <sub>1,2</sub> - Portas abertas ou fechadas (C)          |  | X <sub>1,1</sub> - Portas abertas ou fechadas (C)          | Fixar (Fechadas)      |
| X <sub>2,1</sub> - Base (carrinho, pallet ou elástica) (C) |  | X <sub>2,1</sub> - Base (carrinho, pallet ou elástica) (C) | Fixar (carrinho)      |
| X <sub>2,2</sub> - Frequência natural (C)                  |  | X <sub>2,2</sub> - Frequência natural (C)                  | Monitorar             |
| X <sub>3,1</sub> - Tensão de alimentação (C)               |  | X <sub>3,1</sub> - Tensão de alimentação (C)               | Controlar             |
| X <sub>3,2</sub> - Frequência de alimentação (C)           |  | X <sub>3,2</sub> - Frequência de alimentação (C)           | Controlar             |
| X <sub>4,1</sub> - Operador da medição (C)                 |  | X <sub>4,1</sub> - Operador da medição (C)                 | Ignorar               |
| X <sub>4,2</sub> - Posição do sensor (C)                   |  | X <sub>4,2</sub> - Posição do sensor (C)                   | Controlar             |
| X <sub>4,3</sub> - Configuração do analisador (C)          |  | X <sub>4,3</sub> - Configuração do analisador (C)          | Fixar (config padrão) |
| X <sub>4,4</sub> - Calibração dos instrumentos (C)         |  | X <sub>4,4</sub> - Calibração dos instrumentos (C)         | Fixar (calibrado)     |
| X <sub>4,5</sub> - Frequência natural do sensor (C)        |  | X <sub>4,5</sub> - Frequência natural do sensor (C)        | Controlar             |
| X <sub>4,6</sub> - Temperatura do rolamento (C)            |  | X <sub>4,6</sub> - Temperatura do rolamento (C)            | Monitorar             |

Fonte: Autor



Além da definição das tratativas a serem realizadas nos fatores, é importante definir os valores a serem utilizados em cada um deles. A Figura 35 apresenta em parênteses, na região indicada como tratativa, o valor adotado aos fatores que estarão fixos durante o experimento. Já para os fatores controláveis é necessário definir dois níveis em que se espera encontrar uma variação no processo de medição.

A variação do fluxo magnético visa alterar a força radial aplicada nos rolamentos devido a força magnética radial exercida entre o rotor e estator. Esta força existe apenas na presença de excentricidade entre rotor e estator, a qual ocorre em maior ou menor intensidade dependendo das variações de processo de fabricação dos componentes. Estes valores são definidos a partir do mapa de produto, sendo os valores escolhidos: o fluxo nominal do motor e o fluxo equivalente a um quarto do valor nominal.

A força magnética radial exercida entre o rotor e o estator está relacionada com a variação do fluxo magnético. Já o fluxo é diretamente proporcional à razão entre a tensão e a frequência de alimentação. Como a frequência de alimentação é um fator a ser avaliado em dois níveis durante o experimento, a tensão do motor é manipulada para resultar em diferentes níveis de fluxo magnético.

O motor utilizado no experimento possui sua condição nominal de frequência em 60 Hz e tensão 4 000 V. A tensão a ser aplicada para cada nível de fluxo magnético está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de tensão para cada tratativa de ensaio.

| Frequência ( $f_n$ ) | Fluxo Magnético | Tensão (V) | $\frac{V}{F}$ |
|----------------------|-----------------|------------|---------------|
| 30 Hz                | 100 % Nominal   | 2 000 V    |               |
|                      | 25 % Nominal    | 500 V      |               |
| 60 Hz                | 100 % Nominal   | 4 000 V    |               |
|                      | 25 % Nominal    | 1 000 V    |               |

Fonte: Autor

O objetivo de variar a frequência de alimentação do motor é obter diferentes níveis de ruído a partir de diferentes velocidades angulares. Os valores definidos para este experimento são da frequência nominal e a metade da mesma.

Quanto ao controle da posição do sensor, deseja-se avaliar se o sentido da zona de carga do rolamento influencia nos resultados da medição. Como o motor testado opera na horizontal e a força peso do rotor possui resultante vertical, seleciona-se os valores no sentido da zona de carga (sentido vertical) ou no sentido fora da zona de carga (sentido horizontal). Espera-se que a resposta no sentido vertical apresente maiores amplitudes.

Como os resultados preliminares apresentam variações da amplitude de vibração em frequências elevadas, a frequência natural do sensor é um fator importante a ser avaliado.

Para variar este fator, utilizam-se formas diferentes de fixar o acelerômetro ao motor. Define-se a fixação magnética e por *niple* roscado como os dois níveis de variação deste fator. Espera-se que a medição com o sensor fixo por base magnética possua uma menor frequência natural em comparação ao *niple* roscado, devido a sua superior altura e inferior rigidez de fixação.

Os fatores variados no experimento são apresentados na árvore de amostragem em dois níveis. A Tabela 7 contém os valores definidos para cada nível. A escolha dos níveis é realizada com base no raciocínio crítico e nas informações retiradas do mapa de processo de medição, mapa de produto e da revisão bibliográfica. A seleção da frequência natural do sensor e da posição do sensor tem como objetivo avaliar características dos processos de medição, enquanto a frequência de alimentação e o fluxo magnético visam variar a intensidade do *squeal noise* durante o experimento.

Tabela 7 – Valores atribuídos a cada fator no experimento.

| <b>Valores utilizados no experimento</b> |                |                      |
|--|----------------|----------------------|
| <b>Fator</b>                             | <b>Nível 1</b> | <b>Nível 2</b>       |
| Frequência natural do sensor             | Base magnética | <i>Niple</i> roscado |
| Posição do sensor                        | Horizontal     | Vertical             |
| Frequência de alimentação                | 60 Hz          | 30 Hz                |
| Fluxo magnético                          | Nominal        | 25 % nominal         |

Fonte: Autor

A árvore de amostragem a ser utilizada no experimento é construída a partir da definição das tratativas a serem realizadas em cada fator. O experimento conta com 16 configurações diferentes de medição e cada configuração receberá duas medições, atribuindo repetição a árvore de amostragem.

Ambas as medições são realizadas através do valor global do espectro apresentado. O espectro em aceleração utiliza a unidade g Pico, enquanto no espectro de envelope de aceleração é adotado o g Pico a Pico. A medição coletada para cada configuração do experimento é obtida durante a observação dos níveis de vibração do motor enquanto ele opera por dois minutos, registrando o valor com maior intensidade observada neste período. Este procedimento faz-se necessário tendo em vista que o ruído apresenta-se de forma intermitente.

A Figura 36 apresenta a árvore de amostragem para o experimento realizado neste trabalho. Nesta imagem é possível visualizar os fatores que são variados no experimento, os fatores fixados e as variáveis respostas.

A árvore de amostragem permite visualizar o planejamento do experimento, apresentando as combinações dos fatores para cada ensaio realizado. O plano de amostragem utilizado neste trabalho (Figura 36) está composto por 3 fatores que foram fixos (base

do ensaio, configuração do analisador de vibração e operador) e outros 4 fatores que são variados durante o experimento, conforme apresentado na Tabela 7.

Além disso, o planejamento do experimento apresenta duas medições para cada combinação de fatores, com o objetivo de avaliar a repetibilidade do experimento. Limita-se a uma repetição simples com o objetivo de reduzir o tempo para execução dos testes. Assim, o experimento resulta em 32 rodadas e 16 tratativas. A árvore de amostragem ainda contém as medições que serão realizadas, caracterizadas como Y1 (medição de aceleração) e Y2 (medição do espectro de envelope).

Para melhor interpretar a árvore de amostragem da Figura 36, é possível observar os pontos de medição 5 e 6, os quais correspondem a duas medições distintas para um mesmo tratamento. Este tratamento, em destaque na imagem, corresponde a fixação do sensor por base magnética, no sentido horizontal de medição, com frequência de alimentação de 30 Hz e fluxo magnético em seu valor nominal.

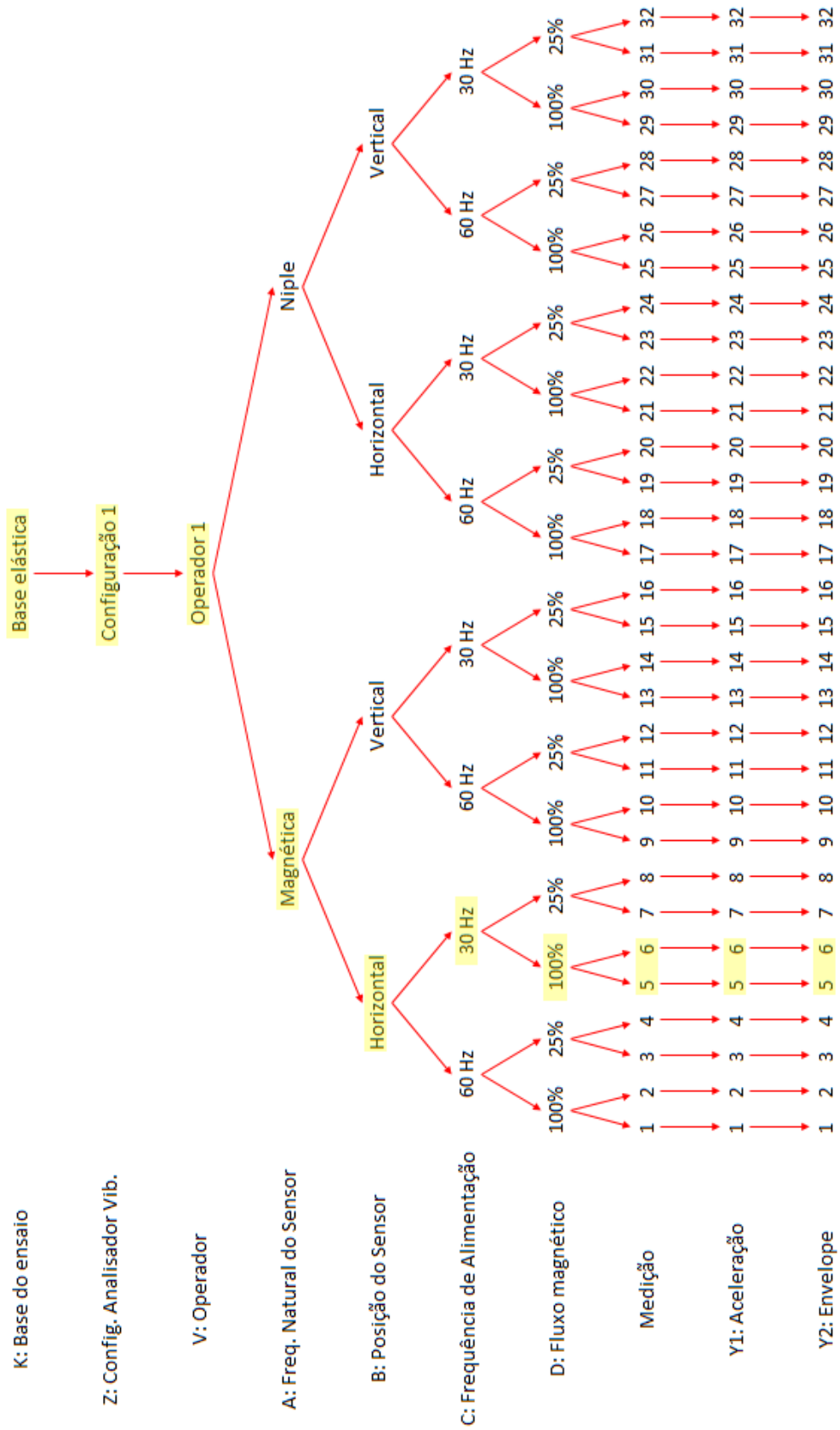
O motor elétrico utilizado nos ensaios é o mesmo para todas as tratativas. Trata-se de um motor 370 kW, 60 Hz, 4 polos com tensão nominal de 4 000 V, que utiliza rolamentos rígidos de esfera em ambos os mancais. O mancal dianteiro contém o rolamento 6322 com sua pista externa fixa no sentido axial. Este rolamento possui diâmetro externo de 240 mm, diâmetro interno de 110 mm e largura de 50 mm.

Já no mancal traseiro é utilizado o rolamento 6319 sem fixar sua pista externa axialmente, para permitir que a configuração dos mancais absorva a dilatação do rotor. Este rolamento possui as seguintes dimensões: diâmetro externo de 200 mm, diâmetro interno de 95 mm e largura de 45 mm.

A folga interna dos rolamentos rígidos de esferas pode ser classificada geralmente como C2, CN (folga normal), C3, C4 e C5, em ordem crescente de folga. Ambos os rolamentos utilizados no motor são lubrificados com graxa e possuem folga C3, sendo a folga usual para os rolamentos utilizados neste tamanho de motor elétrico.

A próxima seção contém os resultados obtidos a partir do plano de amostragem elaborado. Nela os resultados das medições são avaliados através da metodologia seis sigma, comparando os dois processos de medição avaliados: espectro de aceleração e espectro de envelope.

Figura 36 – Árvore de amostragem do experimento.



Fonte: Autor

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma análise dos dois processos de medição avaliados, através dos resultados provenientes do experimento cujo planejamento é abordado no capítulo 3. Este experimento visa adquirir dados para realizar a análise do sistema de medição (MSA). A primeira seção do presente capítulo (seção 4.1) mostra informações dos ensaios realizados desde a ordem de execução até as peculiaridades encontradas no decorrer do experimento.

Já a seção 4.2 apresenta a análise dos dados coletados no experimento. Nesta etapa são apresentadas as análises com base nos conhecimentos adquiridos através da revisão bibliográfica.

### 4.1 Ensaios Realizados

Antes do início dos ensaios planejados define-se a sequência em que os mesmos serão realizados. A randomização é definida por muitos autores como uma forma de garantir a aleatoriedade da distribuição de ruídos ao longo dos dados coletados. A randomização do experimento dificulta o aparecimento problemas de tendência e a interpretações errôneas dos resultados.

Optou-se por randomizar os tratamentos, seguindo uma ordem diferente da indicada na árvore de amostragem da Figura 36. Com isso, a sequência de ensaios não segue a ordem de 1 a 32, conforme apresentado na estratégia de amostragem, mas sim uma ordem aleatória. As duas medições para mesma tratativa também não são realizadas em sequência. Neste experimento é possível realizar a randomização completa do mesmo, considerando que os fatores envolvidos não apresentam restrições a randomização.

Durante a execução dos 32 ensaios é observado o aparecimento do ruído em alguns tratamentos e em outros o *squeal noise* não é perceptível. Isso é satisfatório pois possibilita a visualização de diferentes níveis de vibração, tanto do espectro de aceleração quanto do espectro de envelope, que estão relacionados com tal ruído.

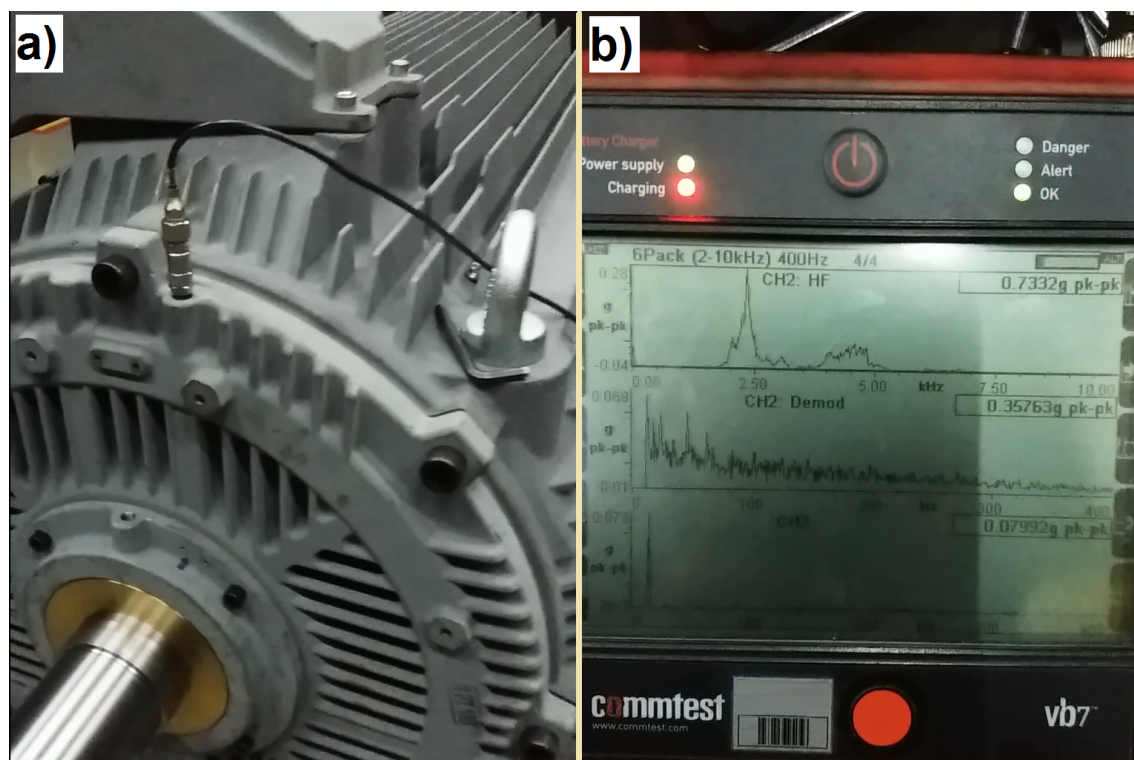
Nas tratativas em que o ruído está presente é possível observar que o mesmo é intermitente, possuindo variações de percepção no decorrer do tempo. Ao comparar com os níveis de vibração apresentados no analisador de vibração, percebe-se uma forte relação entre a percepção do ruído e os níveis de vibração medidos nos dois espectros de interesse (Y1 e Y2), assim como apresentado previamente na seção 3.2 ao comparar o espectro de vibração em aceleração com a medição por pressão sonora. Entretanto, desta vez é possível observar no espectro de envelope comportamento similar ao espectro de aceleração.

Ao ligar o motor, o mesmo opera na condição selecionada por aproximadamente dois minutos com o objetivo de estabilizar sua operação e os níveis de vibração. Após este período, o operador de medição monitora o valor global do espectro, registrando o maior valor apresentado durante dois minutos de operação.

O objetivo de realizar a medição por um determinado tempo de operação do motor é registrar o momento em que o ruído intermitente possui maior amplitude, minimizando a possibilidade da realização de uma medição em que o ruído não está aparente (baixa amplitude). Entre os ensaios realizados, o motor é desligado para alterar os fatores manipulados na estratégia de amostragem, como a posição dos sensores (horizontal ou vertical) e a forma de fixação dos mesmos (base magnética ou niple roscado).

A Figura 37 apresenta o ensaio realizado em uma das tratativas da estratégia de amostragem, a qual possui sensor de vibração fixo com niple roscado no sentido vertical (sentido da zona de carga do rolamento). No centro do visor do analisador de vibração (parte *b* da imagem) é possível observar o espectro de envelope medido, apresentando o valor global momentâneo de 0,358 g Pico a Pico.

Figura 37 – Ensaio para medição do espectro de envelope.



Legenda: a) Imagem da realização do ensaio; b) Tela do analisador de vibração com o espectro de envelope.

Fonte: Autor

Nota-se que para a análise proposta do sistema de medição não é realizada a avaliação das frequências de maior amplitude vibração. A avaliação proposta consiste em monitorar apenas o valor global dos espectros. Além disso, um segundo operador avalia de

forma subjetiva a intensidade de ruído observada durante cada tentativa do experimento, com o objetivo de comparar os resultados com os dados provenientes das medições de vibração.

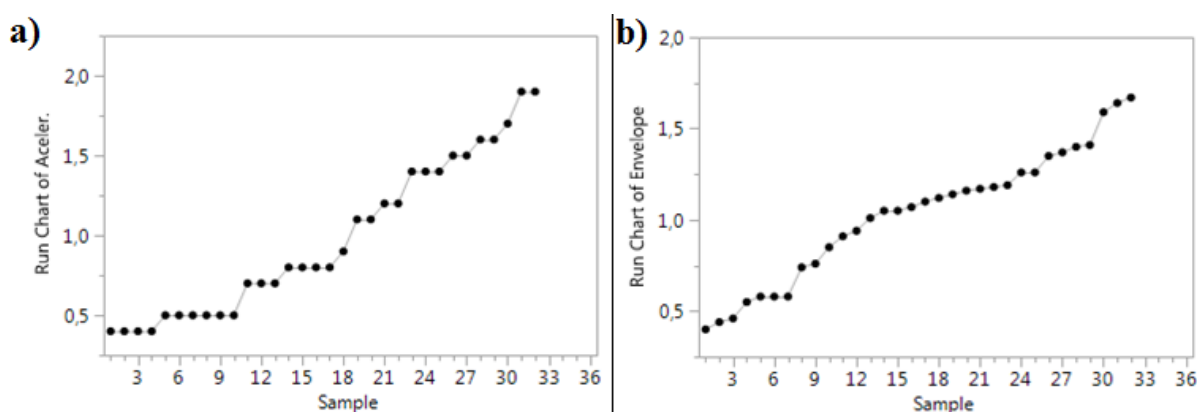
## 4.2 Avaliação dos resultados

A revisão bibliográfica deste trabalho destaca que o MSA necessita analisar quatro pontos principais do sistema de medição: estabilidade de medição, discriminação, repetibilidade e reprodutibilidade. As seções a seguir apresentam uma análise de cada uma destas avaliações para ambos os processos de medição, sendo a seção 4.2.1 responsável pela avaliação da estabilidade da medição, a seção 4.2.2 pela discriminação, a seção 4.2.3 pela repetibilidade e a seção 4.2.4 pela reprodutibilidade. Além disso, a seção 4.2.5 contém uma comparação entre os valores obtidos nas medições de vibração com uma análise empírica do mensurando durante a coleta dos dados. No Apêndice A estão os resultados registrados no experimento.

### 4.2.1 Avaliação da Estabilidade de Medição

A avaliação da estabilidade de medição é realizada para buscar tendências de medições ou causas especiais no experimento, ou seja, observar a possível presença de desvios temporais nos resultados. Caso alguma problema relativo a estabilidade das medições seja encontrado, o sistema precisa ser corrigido antes de prosseguir com as demais avaliações dos dados. Uma opção seria repetir a medição da configuração em que a análise apresenta a causa especial.

Figura 38 – Resultados obtidos em ordem crescente.



Legenda: a) Medições do espectro de aceleração; b) Medições do espectro de envelope de aceleração.

Fonte: Autor

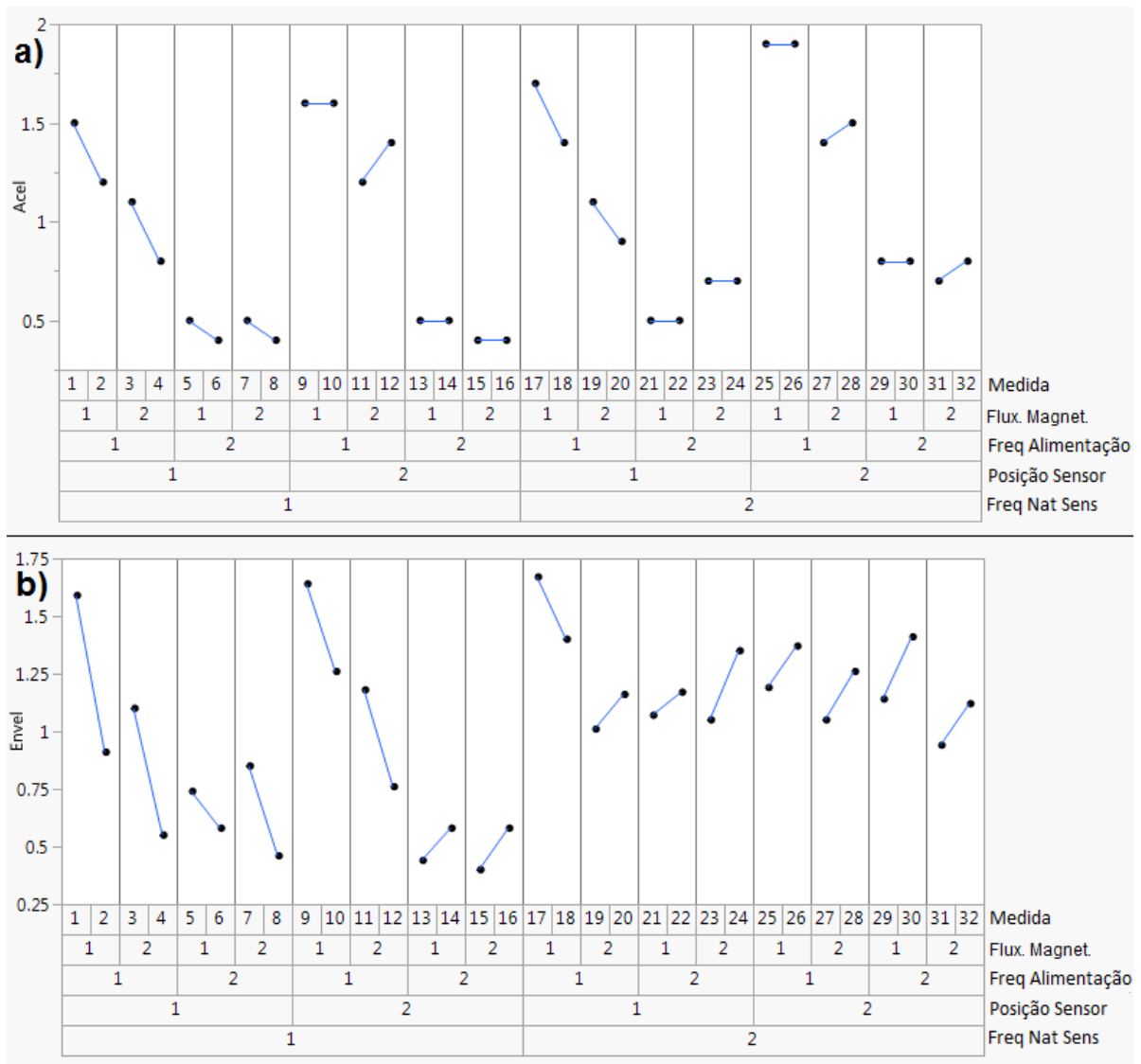
Ao colocar os resultados de cada medição em ordem crescente é possível observar se há algum ponto com comportamento estranho, possuindo amplitude destoada dos demais.



A Figura 38 apresenta os 32 resultados de medição em ordem crescente de amplitude para os dois processos de medição. É possível observar que a distribuição dos dados não apresenta nenhum valor que evidencie a presença de causa especial em ambos os processos de medição, o que é satisfatório ao experimento.

A utilização do *Variability Chart* proporciona a visualização de tendências de medição. A Figura 39 apresenta os dados de amplitude global dos espectros de vibração levantados no experimento, para realizar tal avaliação. Com o propósito de facilitar a visualização dos dados, cada fator presente no *Variability Chart* está em dois níveis: 1 e 2. Os valores para cada um destes níveis estão previamente apresentados na Tabela 7 (Seção 3.3). As linhas entre os pontos ligam medições realizadas para a mesma tratativa dos fatores.

Figura 39 – *Variability Chart* para avaliação de tendência.



Legenda: a) Medições do espectro de aceleração em g Pico; b) Medições do espectro de envelope de aceleração em g Pico a Pico.

Fonte: Autor



Com os dados apresentados no *Variability Chart* não é possível observar tendências de medição aparentes em ambos os processos de medição. Isso, aliado a ausência de pontos discrepantes na análise dos valores medidos em ordem crescente, comprova que tanto a medição do espectro de vibração quanto a medição do espectro de envelope de aceleração possuem resultados estáveis, ou seja, estão aprovados quanto a estabilidade de medição. Esta conclusão possibilita prosseguir com a análise do MSA, sem a necessidade de repetir o experimento em alguma configuração.

#### 4.2.2 Avaliação da Discriminação

O sistema de medição é avaliado com boa discriminação quando a resolução do instrumento consegue apresentar variações do mensurando que sejam de interesse. O primeiro ponto observado nesta análise é a variação de amplitude total medida no experimento com relação a menor variação observada entre medições. Esta análise pode ser realizada com os valores plotados na Figura 38, a qual possui os valores em ordem crescente de amplitude.

Nesta figura é possível observar que a maior diferença entre as amplitudes medidas no espectro de aceleração corresponde a aproximadamente 1,5 g Pico. Já a menor diferença entre medições corresponde a 0,1 g Pico, ou seja, a diferença total de amplitude das medições é 15 vezes superior a menor variação encontrada entre medições. Esta relação por si só é satisfatória (acima de 10 vezes).

Quanto ao espectro de envelope de aceleração, observa-se uma variação máxima de 1,27 g Pico a Pico e mínima de 0,01 g Pico a Pico, o que representa uma relação entre a variação mínima e máxima do experimento igual a 127. Este valor é ainda maior que o valor encontrado para o espectro de aceleração, ou seja, a resolução do experimento também é satisfatória.

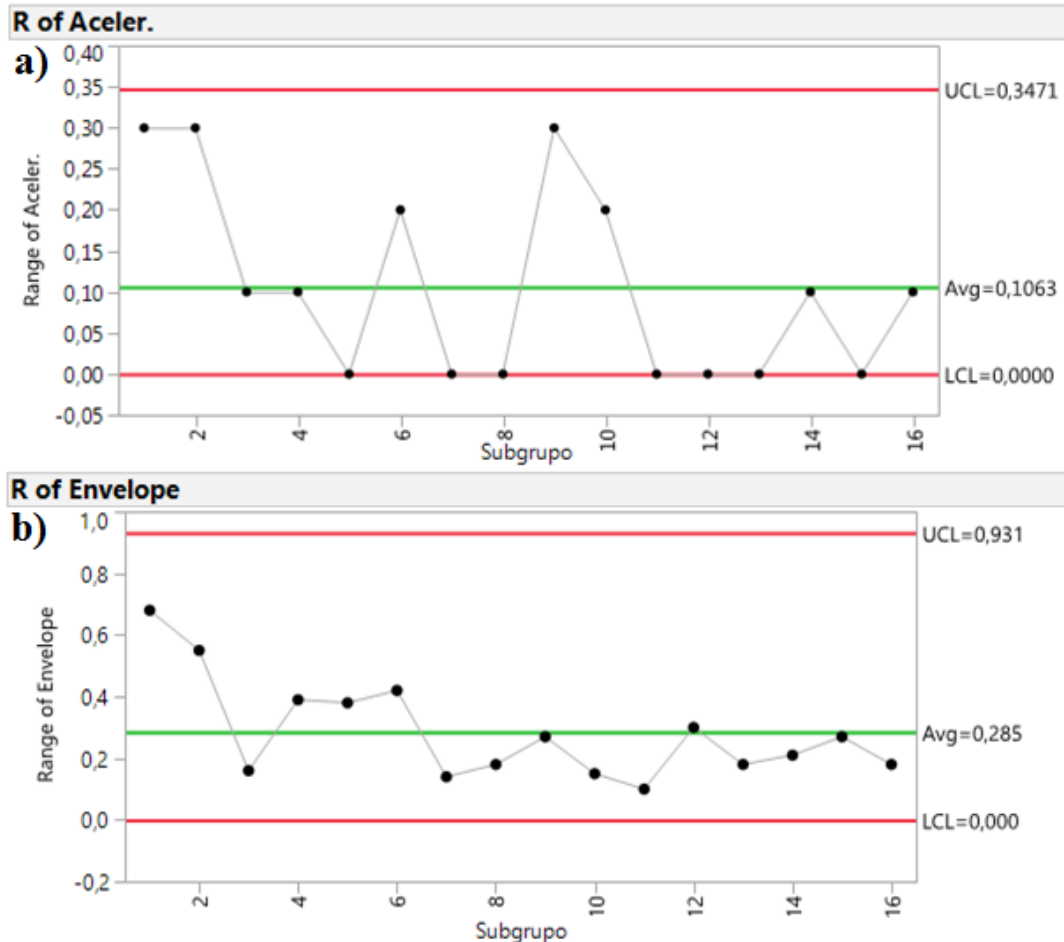
Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a discriminação pode ser avaliada através da quantidade de categorias apresentadas na carta R do experimento, considerando o tamanho de subgrupo. Tendo em vista que o subgrupo deste experimento possui tamanho 2, a discriminação do sistema de medição é aprovada caso a quantidade de categorias seja igual ou superior a 4.

A carta R de cada processo de medição está contida na Figura 40. Observa-se que as medições através do espectro de aceleração possuem 4 categorias, ou seja, possui o número mínimo de categorias para aprovar o processo de medição.

Para as medições com espectro de envelope de aceleração, 12 categorias são vistas na respectiva carta R. Este valor é superior ao mínimo recomendado para este tamanho de subgrupo. Os resultados comprovam que ambos processos de medição possuem discriminação aprovada, ou seja, possuem boa discriminação para realizar a medição do

*squeal noise*. Com isso, o estudo pode prosseguir com a avaliação da repetibilidade e da reprodutibilidade.

Figura 40 – Cartas  $R$  do experimento.



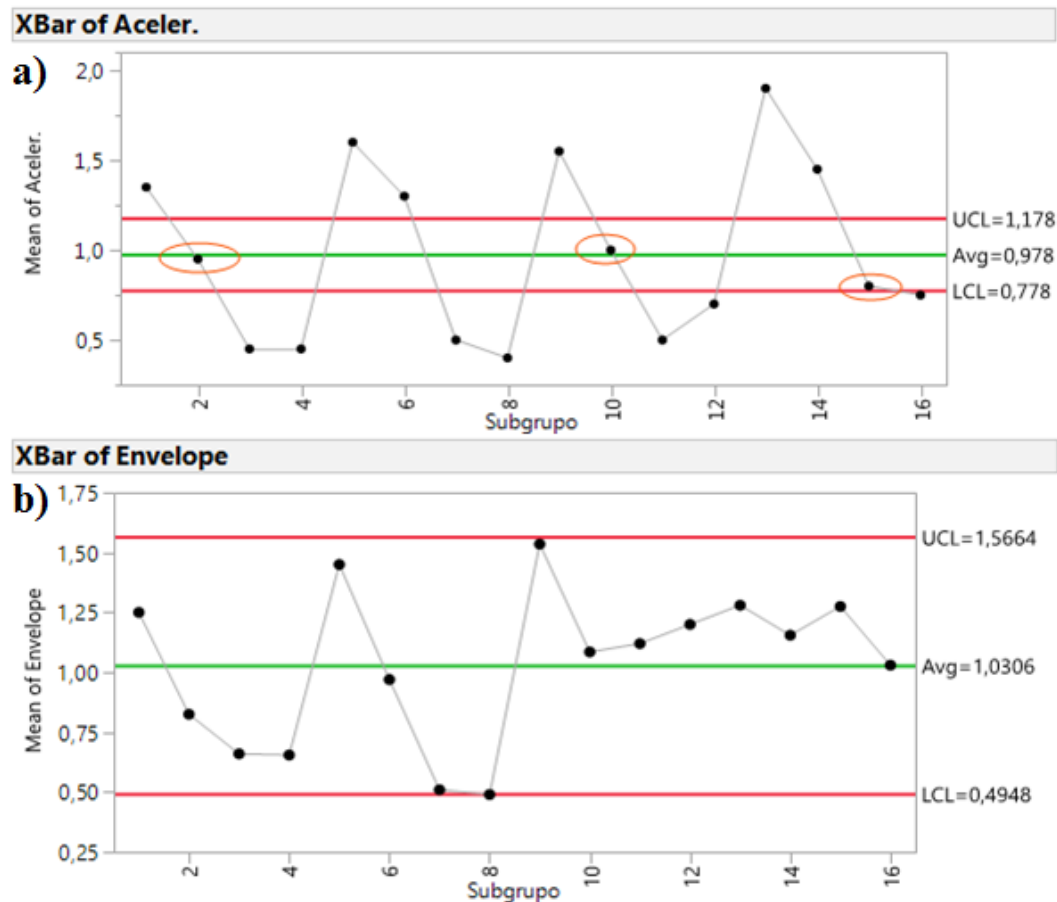
Legenda: a) Medições do espectro de aceleração; b) Medições do espectro de envelope de aceleração.

Fonte: Autor

### 4.2.3 Avaliação da Repetibilidade

A análise da repetibilidade visa avaliar se a variação das medições realizadas com um sistema de medição está fortemente relacionado com a variação entre medidas de um mesmo mensurando. Considera-se um sistema de medição com boa repetibilidade quando repetições de medições de um mesmo tratamento apresentam variações dos valores com magnitude inferior às medições realizadas em diferentes tratamentos.

Há diferentes formas de avaliar a repetibilidade de um sistema de medição. Entre elas, destaca-se a avaliação da carta de controle  $\bar{X}$ . Ao avaliar esta carta é possível observar se a variação está dentro ou fora do subgrupo medida. A Figura 41 apresenta as cartas  $\bar{X}$  das medições realizadas com ambos processos de medição, destacando-se a quantidade de pontos dentro dos limites de controle.

Figura 41 – Cartas  $\bar{X}$  do experimento.

Legenda: a) Medições do espectro de aceleração; b) Medições do espectro de envelope de aceleração.

Fonte: Autor

A repetibilidade do experimento utilizando o espectro de aceleração se mostra satisfatório, pois apenas três pontos estão entre os limites de especificação, ou seja, a maioria dos pontos estão fora dos limites de controle. Em outras palavras, a variação entre os subgrupos é superior a variação entre medidas (dentro do subgrupo).

Já a carta  $\bar{X}$  do experimento medindo o espectro de envelope de aceleração contém todos os pontos dentro dos limites de especificação. Isso representa uma maior variação dentro do subgrupo, mostrando que este processo de medição não possui uma repetibilidade satisfatória.

Outra forma de realizar tal avaliação está na análise dos componentes de variação a partir dos dados coletados no experimento. Nesta análise é possível visualizar qual a influência de cada fator presente na árvore de amostragem em relação a variação total do experimento.

A Figura 42 apresenta a análise de componentes de variação (*Variance Components*) para os valores de espectro de envelope. Nele é possível visualizar a parcela em que cada fator varia no experimento, através da coluna *% of Total*. Além da influência direta de

cada fator manipulado, é possível visualizar a influência das interações entre diferentes fatores.

Figura 42 – Componentes de variação do espectro de aceleração.

| Variance Components   |               |            |             |                |
|---|---------------|------------|-------------|----------------|
| Component   | Var Component | % of Total | 20 40 60 80 | Sqrt(Var Comp) |
| Freq. Natural Sensor  | 0,01861842    | 4,5        |             | 0,13645        |
| Pos. Sensor   | 0,01361842    | 3,3        |             | 0,11670        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor                                      | 0,00338816    | 0,8226     |             | 0,05821        |
| Freq. Alimentação   | 0,30523438    | 74,1       |             | 0,55248        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação                                | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação   | 0,01468750    | 3,6        |             | 0,12119        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação                    | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Fluxo Magn.   | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Fluxo Magn.                                      | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Fluxo Magn.   | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Fluxo Magn.                          | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.   | 0,04208059    | 10,2       |             | 0,20514        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.                    | 0,00115132    | 0,2795     |             | 0,03393        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.                             | 0,00240132    | 0,583      |             | 0,04900        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.        | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Medida  | 0,01070724    | 2,6        |             | 0,10348        |
| Freq. Natural Sensor*Medida   | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Medida                               | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Medida                         | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Medida                                  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Medida             | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Fluxo Magn.*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Fluxo Magn.*Medida                               | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Fluxo Magn.*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Fluxo Magn.*Medida                   | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida                                  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida             | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida                      | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Within  | 0,00000000    | 0,0        |             | 0,00000        |
| Total   | 0,41188734    | 100,0      |             | 0,64178        |

Fonte: Autor

Em destaque na Figura 42 está o fator medida, mostrando que a repetição das medidas corresponde a 2,6 % da variação total do experimento. Isso comprova que a repetibilidade utilizando o espectro de aceleração está aprovada para realizar a medição do ruído de interesse.

Já a Figura 43 apresenta os componentes de variação para o experimento utilizando o espectro de envelope de aceleração. A avaliação desta figura deve ser realizada da mesma maneira que a anterior, dando ênfase a variação que diferentes medidas proporcionam ao experimento se comparado com a variação total deste experimento.

Para a análise do envelope de aceleração é possível observar que o componente de variação para medida possui valor de 24,6 %, ou seja, a repetição das medidas representa aproximadamente um quarto da variação total do experimento. Como visto na revisão bibliográfica, a orientação para aprovar a repetibilidade do sistema de medição utilizando

Figura 43 – Componentes de variação do espectro de envelope de aceleração.

| Variance Components   |               |            |    |    |    |    |                |
|---|---------------|------------|----|----|----|----|----------------|
| Component   | Var Component | % of Total |    |    |    |    | Sqrt(Var Comp) |
|   |               |            | 20 | 40 | 60 | 80 |                |
| Freq. Natural Sensor  | 0,04042500    | 23,2       |    |    |    |    | 0,20106        |
| Pos. Sensor   | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor                                      | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Alimentação   | 0,01896611    | 10,9       |    |    |    |    | 0,13772        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação                                | 0,04250529    | 24,4       |    |    |    |    | 0,20617        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação   | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação                    | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Fluxo Magn.   | 0,00878750    | 5,0        |    |    |    |    | 0,09374        |
| Freq. Natural Sensor*Fluxo Magn.                                      | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Fluxo Magn.   | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Fluxo Magn.                          | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.   | 0,02065529    | 11,9       |    |    |    |    | 0,14372        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.                    | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.                             | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.        | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Medida  | 0,04277019    | 24,6       |    |    |    |    | 0,20681        |
| Freq. Natural Sensor*Medida   | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Medida                               | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Medida                         | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Medida                                  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Medida             | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Fluxo Magn.*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Fluxo Magn.*Medida                               | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Fluxo Magn.*Medida  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Fluxo Magn.*Medida                   | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida                                  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida             | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida                      | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.*Medida | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Within  | 0,00000000    | 0,0        |    |    |    |    | 0,00000        |
| Total   | 0,17410937    | 100,0      |    |    |    |    | 0,41726        |

Fonte: Autor

os componentes de variação é um valor máximo de 10 % para medida. Como o valor encontrado foi superior ao dobro do limite, este processo de medição está reprovado quanto a repetibilidade.

Vale ressaltar que ambas as formas de avaliação da repetibilidade (através da carta  $\bar{X}$  ou dos componentes de variação) convergiram para o mesmo resultado em ambos processos de medição. Portanto, apenas o espectro de aceleração apresentou resultados satisfatórios em relação a repetibilidade.

#### 4.2.4 Avaliação da Reprodutibilidade

A reprodutibilidade está relacionada com os fatores do sistema que possam influenciar nos resultados. Esta avaliação é realizada para conhecer quais fatores abordados no processo de medição impactam nos resultados e se esta influência é aceitável.

Experimentos com reprodutibilidade ruim podem inviabilizar um estudo. Conhecer

quais fontes de variação do sistema de medição estão gerando o problema de reprodutibilidade possibilita realizar ações de melhoria no sistema para torná-lo confiável. Outra possível abordagem quanto aos fatores mais significativos na reprodutibilidade é fixar estas fontes de variação em níveis que tornam a repetição da medição mais estável (menor variação entre medidas para o mesmo mensurando).

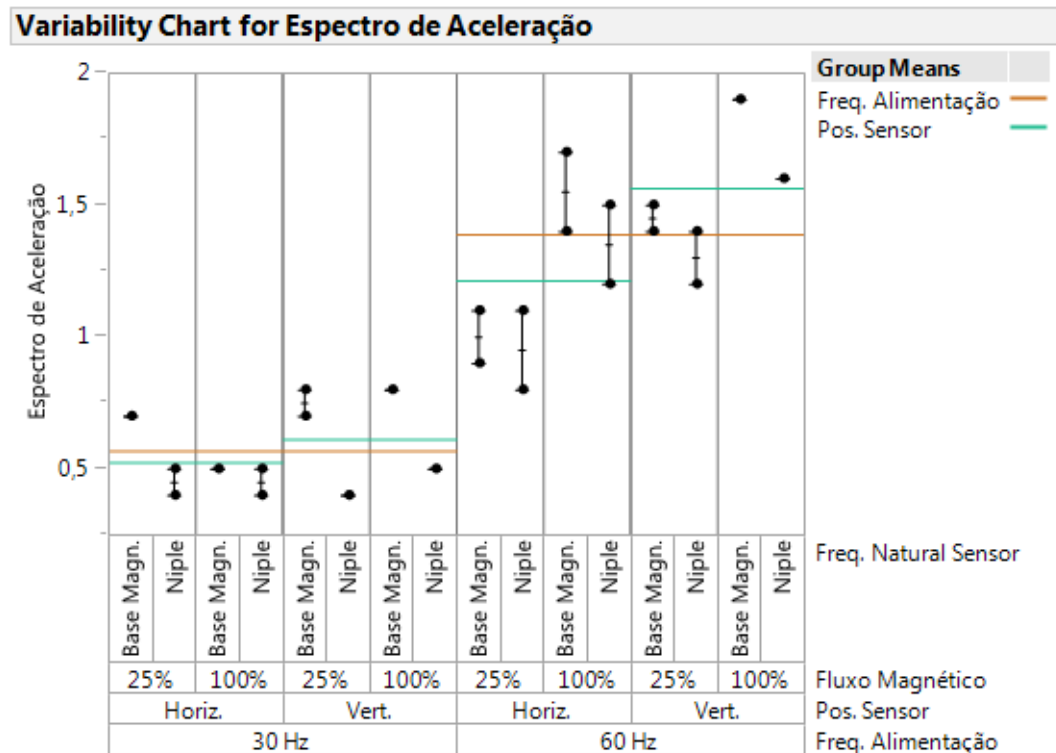
O *Variability Chart* auxilia na análise da reprodutibilidade, facilitando a visualização das medições realizadas. Os gráficos gerados por essa ferramenta facilitam a análise ao mostrar os valores coletados dispostos de acordo com o plano de amostragem e seus subgrupos. Outra ferramenta que auxilia na análise da reprodutibilidade é a avaliação dos componentes de variação, o qual possibilita uma análise quantitativa.

Na sequência desta seção serão apresentados os resultados separadamente para cada processo de medição.

#### 4.2.4.1 Reprodutibilidade do Espectro de Aceleração

A Figura 44 apresenta os resultados das medições no *Variability Chart* do espectro de aceleração, com as amplitudes de aceleração em g Pico. Cada ponto representa uma medição e as linhas verticais ligam dois pontos de medições repetidas, ou seja, representam a variação entre duas medições para a mesma configuração do experimento.

Figura 44 – *Variability Chart* para avaliação de reprodutibilidade - espectro de aceleração.



Fonte: Autor



A legenda localizada na parte superior direita desta figura identifica a média dos valores de um determinado grupo de medições. Por exemplo, as linhas em amarelo representam a média dos valores obtidos para diferentes frequências, evidenciando que o aumento da frequência corresponde a um aumento da média de amplitude de vibração.

É possível observar que a rotação, representada como frequência de alimentação, e o fluxo magnético influenciam diretamente nas amplitudes observadas. Em rotações mais baixas a amplitude de ruído é inferior aos valores medidos em 60 Hz. No entanto, ambas são características do produto e não do sistema de medição. Elas são adicionadas ao experimento para que a intensidade do ruído seja alterada, ou seja, elas não influenciam diretamente no sistema de medição.

A posição do sensor não apresentou variação nos resultados quando o motor opera em baixas rotações. Em altas rotações (maior amplitude de ruído) é possível observar que a medição no sentido vertical, sentido da zona de carga do rolamento, apresenta valores superiores às medições no sentido horizontal.

Já a frequência natural do sensor não permite afirmar se algum dos dois tipos de montagem do sensor influenciam nos resultados das medições. Em algumas configurações a fixação magnética apresentou maior variação de amplitude, mas em outras a fixação por niple apresenta elevada variação.

Uma análise similar pode ser realizada a partir dos componentes de variação do experimento. A Figura 45 contém os componentes de variação assim como apresentado na Figura 42, mas contendo apenas os valores superiores a zero e em ordem decrescente do % of Total, o qual apresenta a parcela de variação do fator em relação a variação total do experimento.

Figura 45 – Principais componentes de variação - espectro de aceleração.

| Variance Components                                |               |            |             |                |
|--|---------------|------------|-------------|----------------|
| Component  | Var Component | % of Total | 20 40 60 80 | Sqrt(Var Comp) |
| Total  | 0,41188734    | 100,0      |             | 0,64178        |
| Freq. Alimentação                                  | 0,30523438    | 74,1       |             | 0,55248        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.                      | 0,04208059    | 10,2       |             | 0,20514        |
| Freq. Natural Sensor                               | 0,01861842    | 4,5        |             | 0,13645        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação                      | 0,01468750    | 3,6        |             | 0,12119        |
| Pos. Sensor  | 0,01361842    | 3,3        |             | 0,11670        |
| Medida   | 0,01070724    | 2,6        |             | 0,10348        |
| Freq. Natural Sensor*Pos. Sensor                   | 0,00338816    | 0,8226     |             | 0,05821        |
| Pos. Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn.          | 0,00240132    | 0,583      |             | 0,04900        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação*Fluxo Magn. | 0,00115132    | 0,2795     |             | 0,03393        |

Fonte: Autor

Os componentes de variação presentes na Figura 45 confirmam o que é apresentado no *Variability Chart*. Nele consta como os fatores mais significativos para o experimento

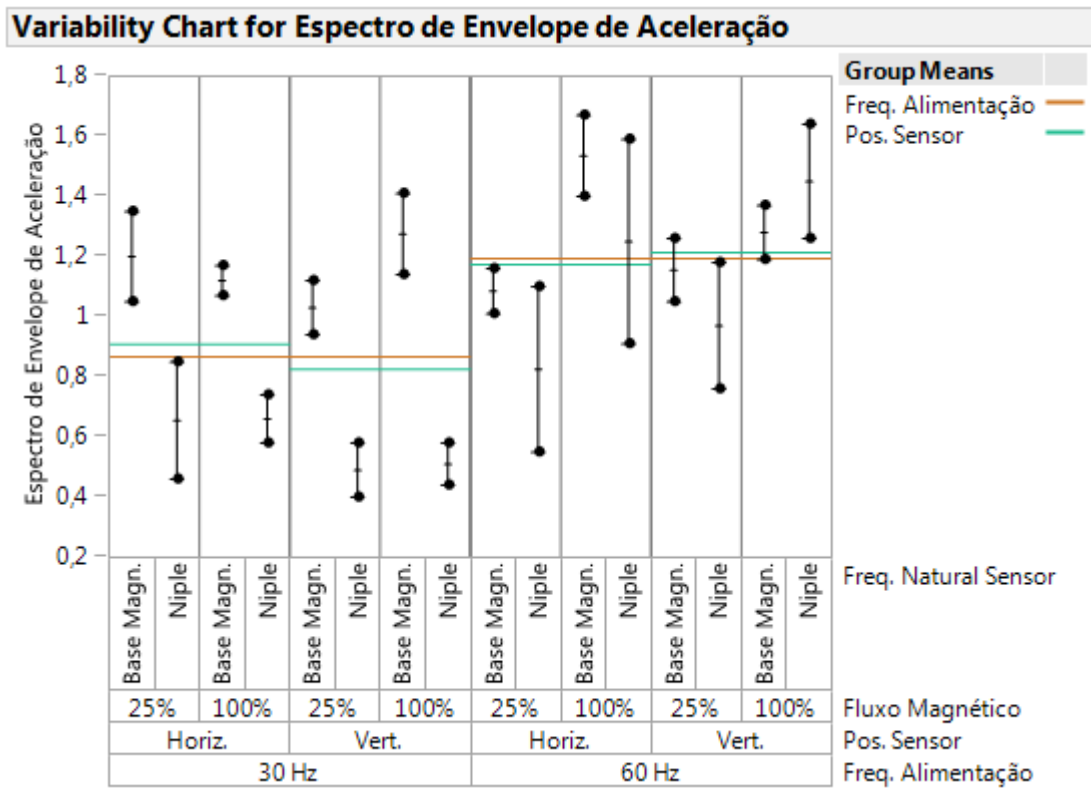
a frequência de alimentação e a interação entre frequência de rotação e fluxo magnético, gerando mais de 84 % da variação total do experimento.

Os fatores que representam o sistema de medição (frequência natural do sensor e posição do sensor) não apresentam componente de variação elevada no experimento, sendo a frequência natural do sensor o fator com maior representatividade, mas com apenas 4,5 % da variação total do experimento. Assim, é possível afirmar que o espectro de aceleração possui reprodutibilidade aprovada na medição do *squeal noise*.

#### 4.2.4.2 Reprodutibilidade do Espectro de Envelope de Aceleração

O *Variability Chart* das medições do espectro de envelope de aceleração está apresentado na Figura 46, contendo a amplitude de cada medição do experimento, em g Pico a Pico, através dos pontos plotados. Assim como na Figura 44, as linhas verticais ligam duas medidas com a mesma combinação de fontes de variação e as linhas horizontais contêm a média dos grupos, as quais possuem sua legenda no canto direito superior da imagem.

Figura 46 – *Variability Chart* para avaliação de reprodutibilidade - espectro de envelope de aceleração.



Fonte: Autor

Em uma avaliação geral da Figura 46 não é possível observar fatores que influenciam diretamente na presença de amplitudes mais elevadas. Considerando a variação das



características do produto (frequência de alimentação e fluxo magnético) não encontra-se forte relação entre elas e a alteração das amplitudes de medição no experimento, diferente do apresentado na avaliação do espectro de aceleração.

Os resultados obtidos para diferentes posições do sensor não mostram grande influência deste fator nas amplitudes medidas. Isso fica claro ao comparar as médias dos resultados no sentido vertical e horizontal, mas com mesma frequência de alimentação no motor. Em 30 Hz as linhas horizontais que representam estas médias possuem valores muito próximos, assim como observado para as médias em 60 Hz.

Entre os fatores que foram variados durante o experimento, a frequência natural do sensor apresenta a maior variação entre resultados. É possível observar uma grande variação na amplitude medida quando apenas a frequência natural do sensor é modificada.

Em rotações mais altas (condição em que espera-se um maior ruído) as medições com a base magnética apresentam maior variação entre medidas, comparado com os valores obtidos ao fixar o sensor em um niple roscado. As medições com niple roscado conseguem apresentar valores mais próximos ao repetir medições, o que é benéfico para o processo de medição.

Analisar os componentes de variação do experimento possibilita avaliar quantitativamente o que é visualizado graficamente no *Variability Chart*. A Figura 47 contém os componentes de variação do experimento apresentados em ordem decrescente de *% of Total*. Esta figura contém os mesmos resultados da Figura 43, mas não possui os fatores e interações que não contribuem para a variação do experimento.

Figura 47 – Principais componentes de variação - espectro de envelope de aceleração.

| Variance Components                    |            |            |                 |  |  |  |                |
|--|------------|------------|-----------------|--|--|--|----------------|
| Component                              | Var        |            | 20 40 60 80     |  |  |  | Sqrt(Var Comp) |
|  | Component  | % of Total |                 |  |  |  |                |
| Total                                  | 0,17410937 | 100,0      | [Barra cheia]   |  |  |  | 0,41726        |
| Medida                                 | 0,04277019 | 24,6       | [Barra parcial] |  |  |  | 0,20681        |
| Freq. Natural Sensor*Freq. Alimentação | 0,04250529 | 24,4       | [Barra parcial] |  |  |  | 0,20617        |
| Freq. Natural Sensor                   | 0,04042500 | 23,2       | [Barra parcial] |  |  |  | 0,20106        |
| Freq. Alimentação*Fluxo Magn.          | 0,02065529 | 11,9       | [Barra parcial] |  |  |  | 0,14372        |
| Freq. Alimentação                      | 0,01896611 | 10,9       | [Barra parcial] |  |  |  | 0,13772        |
| Fluxo Magn.                            | 0,00878750 | 5,0        | [Barra parcial] |  |  |  | 0,09374        |

Fonte: Autor

Diferentemente do que foi apresentado na análise do espectro de aceleração, os componentes de variação mostrados na Figura 47 contém valores significativos para características do processo de medição. Isso fica evidente ao avaliar o componente de variação para a frequência natural do sensor, a qual representa 23,2 %.

Além disso, o componente de variação da interação da frequência natural do sensor com a frequência de alimentação do motor também mostra ser significativa para o

experimento. Esta interação corresponde a aproximadamente um quarto da variação total do experimento (24,4 %).

Outro aspecto importante na avaliação dos componentes de variação do experimento está nos fatores relacionados ao produto, os quais foram variados para alterar a amplitude do ruído, apresentarem valores menos significativos em comparação com os valores obtidos no experimentos com espectro de aceleração. Os valores dos componentes de variação da frequência de alimentação, do fluxo magnético e da interação entre ambos representam 27,8 % da variação total do experimento.

A partir da avaliação gráfica, através do *Variability Chart*, e da avaliação quantitativa, através dos componentes de variação, é possível afirmar que ambas convergem quanto a avaliação da reprodutibilidade do experimento, evidenciado que a mesma é comprometida ao utilizar o sensor de vibração fixo por base magnética. Com isso, a repetibilidade do espectro de envelope de aceleração é considerada reprovada.

#### 4.2.5 Percepção do ruído

Uma forma empírica para avaliação dos dois processos de medição é a utilização de atributos para quantificar o mensurando. Esta avaliação é subjetiva, mas consegue trazer resultados comparativos significativos para o trabalho.

Durante os testes executados com a medição de espectro de aceleração e do espectro de envelope de aceleração, um segundo operador avalia a presença do ruído e coleta dados de acordo com sua percepção. Esta coleta considera a variável resposta ordinal, a qual é baseada em uma escala previamente definida. A escolha por um segundo operador é realizada com o objetivo de que ele não seja influenciado pelo valor coletado do analisador de vibração, ou seja, o operador não possui os valores medidos de vibração enquanto avalia a intensidade do ruído.

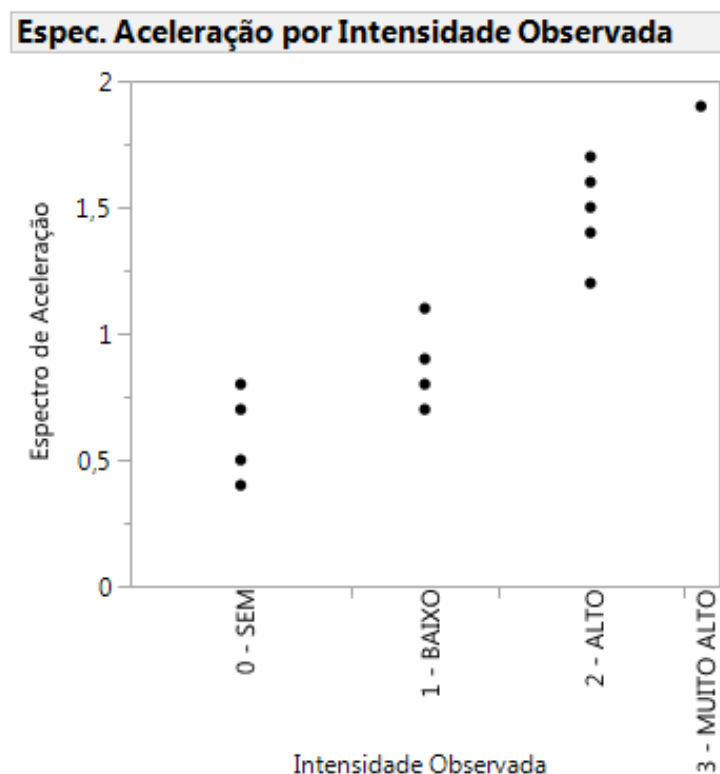
A escala escolhida possui 4 níveis, os quais apresentam desde a ausência do ruído de interesse até uma intensidade extremamente elevada. Há uma dificuldade em encontrar padrões de ruídos para comparar com valor observado e isso é uma ressalva que deve ser considerada nas análises. O Quadro 3 demonstra os 4 níveis de ruído utilizados na análise.

Quadro 3 – Escala com respostas ordinais para medição do *squeal noise*.

| Ruído?   | Níveis (escala) | Observado  |
|----------|-----------------|--|
| AUSENTE  | 0 - SEM         | Ausência total de <i>Squeal Noise</i>                    |
| PRESENTE | 1 - BAIXO       | Ruído baixo e de difícil percepção                       |
|          | 2 - ALTO        | Ruído alto e de fácil percepção                          |
|          | 3 - MUITO ALTO  | Ruído muito alto a ponto de gerar incômodo a quem escuta |

Possuindo os dados medidos empiricamente é possível compará-los com as amplitudes coletadas para os dois processos de medição de vibração. A Figura 48 apresenta o gráfico que relaciona os valores de percepção de ruído coletados com as amplitudes do espectro de aceleração. Este gráfico possui a escala da intensidade observada do ruído no eixo das abcissas e a amplitude de vibração no eixo das ordenadas.

Figura 48 – Relação entre os valores obtidos do espectro de aceleração e a percepção do operador.



Fonte: Autor

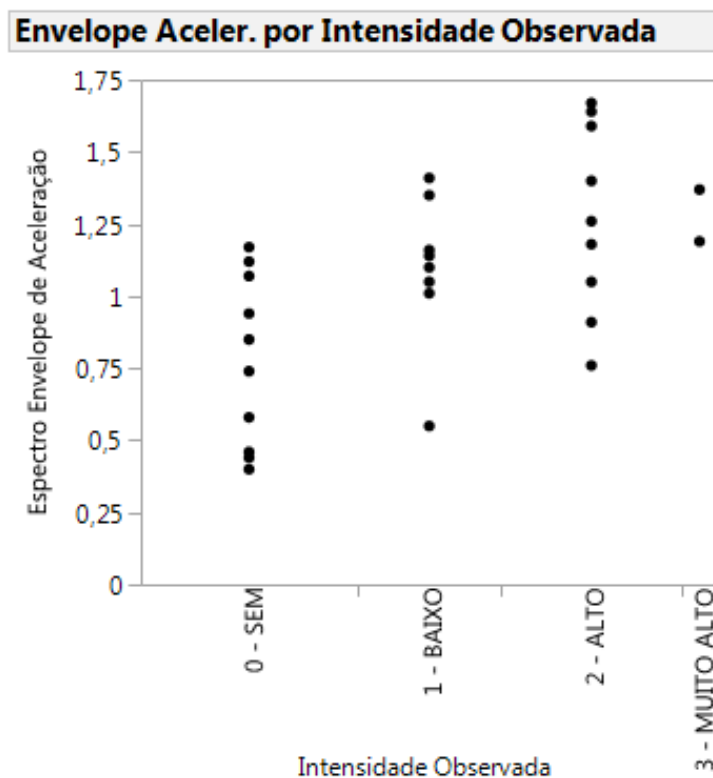
O gráfico que apresenta a medição do espectro de aceleração torna evidente uma forte relação da intensidade do ruído percebida pelo operador com a amplitude de vibração. Há uma tendência clara de aumento dos níveis de aceleração conforme o ruído torna-se mais intenso, mostrando que o *squeal noise* é bem representado ao utilizar o espectro de aceleração.

Ainda assim, alguns pontos deste gráfico geram dúvidas da presença ou não do ruído, principalmente nas transições entre níveis de intensidade de medição, as quais contêm pontos com intensidade de vibração muito similar, mas com diferentes percepções do ruído. Isto se justifica principalmente pela dificuldade em realizar as medições subjetivas através da percepção sonora. Embora a medição subjetiva ajude na avaliação do ruído, sua baixa discriminação dificulta a utilização em estudos futuros.

Outra comparação é apresentada na Figura 49, a qual relaciona a intensidade de ruído observada pelo operador e a amplitude medida com o espectro de envelope de

aceleração. Assim como na figura anterior, o eixo das abcissas contém a intensidade de ruído percebida pelo operador e o eixo das ordenadas contém as amplitudes de vibração.

Figura 49 – Relação entre os valores obtidos do espectro de envelope de aceleração e a percepção do operador.



Fonte: Autor

Neste gráfico também é possível observar um aumento dos níveis de vibração com o aumento da intensidade de ruído percebida pelo operador, mas de forma menos evidente. Muitos pontos que apresentam similar amplitude do espectro de envelope de aceleração estão dispostos em mais de dois níveis de percepção do ruído.

Diferentes medições com amplitudes de vibração próximas de 1,2 g Pico a Pico, por exemplo, apresentaram as quatro intensidades de ruído possíveis de serem observadas pelo operador. Esta dificuldade em relacionar a intensidade do ruído através das medições do espectro de envelope de aceleração impossibilita identificar a presença ou não do ruído de interesse, assim como identificar sua magnitude de forma adequada.

### 4.3 Comparativo dos Resultados

Com os resultados dos experimentos propostos, cada processo de medição é avaliado separadamente na seção 4.2, por meio dos conceitos da ferramenta MSA. A atual seção deste trabalho apresenta um comparativo destas análises.

A Tabela 8 resume os experimentos realizados, contendo os resultados das análises efetuadas em cada característica do processo de medição. Nota-se que a utilização do espectro de aceleração é aprovada em todos os requisitos avaliados. Já o espectro de envelope de aceleração não se mostra aprovado na avaliação de repetibilidade e reprodutibilidade.

Tabela 8 – Comparação dos resultados obtidos no MSA.

| Característica avaliada | Resultado das análises |                      |
|-------------------------|------------------------|----------------------|
|                         | Espectro de Aceleração | Espectro de Envelope |
| Estabilidade de Medição | Aprovado               | Aprovado             |
| Discriminação           | Aprovado               | Aprovado             |
| Repetibilidade          | Aprovado               | Reprovado            |
| Reprodutibilidade       | Aprovado com ressalvas | Reprovado            |

Fonte: Autor

O espectro de aceleração, embora aprovado, necessita de cuidados para apresentar uma boa reprodutibilidade. O experimento mostra que ao medir a aceleração em sentidos diferentes (horizontal e vertical), os valores observados não são os mesmos. Assim, é necessário fixar o sentido de medição para que não sejam comparados níveis de vibração diferentes. As medições no sentido vertical (sentido da zona de carga sobre o rolamento) geralmente apresentam níveis de vibração superiores aos valores observados nas medições realizadas no sentido horizontal (sentido perpendicular a zona de carga do rolamento). Recomenda-se realizar as medições no sentido da zona de carga para obter amplitudes mais elevadas, podendo ter uma melhor discriminação entre medições.

Já o espectro de envelope de aceleração mostra que a variação entre medidas representa 24,6 % da variação total do experimento. Como este valor é muito superior ao limite considerado aceitável para um sistema de medição, o qual é 10 %, é possível afirmar que este processo de medição não está aprovado quanto a sua repetibilidade.

Além disso, o espectro de envelope de aceleração apresenta variação significativa dos resultados ao alterar a frequência natural do sensor (alteração do sistema de fixação do acelerômetro). Ao utilizar a base magnética como forma de fixação, encontra-se uma variação elevada das amplitudes medidas para as mesmas condições de ensaio. Com este resultado é possível afirmar que o espectro de envelope de aceleração não está aprovado quanto a sua reprodutibilidade.

A partir destas análises é possível afirmar que o *squeal noise* é melhor descrito ao utilizar o espectro de aceleração. Com base no que é apresentado ao longo da análise dos diferentes processos de medição, uma configuração ideal é obtida para mensurar este ruído. A Tabela 9 apresenta esta configuração, mostrando a melhor maneira de quantificar o ruído de interesse com os equipamentos disponíveis, a partir dos aprendizados deste trabalho.

Tabela 9 – Resumo das características de medição para quantificar o *squeal noise* através do espectro de aceleração.

| <b>Recomendações para medição de <i>squeal noise</i></b> |  |
|--|--|
| <b>Fator</b>   | <b>Valor recomendado</b>                 |
| Processo de medição                                      | Espectro de aceleração                   |
| Número de linhas   | 3 200 linhas                             |
| Frequência mínima  | 12 Hz                                    |
| Frequência máxima  | 10 kHz                                   |
| Unidade  | g Pico                                   |
| Frequência natural do sensor                             | <i>Niple</i> roscado                     |
| Posição do sensor  | No sentido da zona de carga do rolamento |

Fonte: Autor

Na próxima seção deste trabalho são apresentadas as conclusões levantadas a partir dos resultados dos experimentos. Nela também estão contidas sugestões de trabalhos futuros relacionado com o *squeal noise*.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do objetivo geral deste trabalho, o qual consiste em avaliar experimentalmente diferentes sistemas de medição para mensurar o *squeal noise*, experimentos controlados foram realizados. Os resultados destes experimentos emanam uma evolução do conhecimento metrológico destes sistemas, possibilitando uma avaliação detalhada de cada processo de medição.

Este capítulo visa apresentar as conclusões obtidas quanto aos processos de medição avaliados, na seção 5.1. Já a seção 5.2 apresenta sugestões para trabalhos futuros relacionados com o ruído de interesse.

### 5.1 Conclusão

Durante a execução do trabalho, três processos de medição foram avaliados através da revisão bibliográfica e de experimentos, sendo eles: medição de pressão sonora, medição de vibração em aceleração e medição de vibração através da técnica do envelope. As conclusões referentes a cada processo de medição são abordadas no decorrer desta seção.

Os resultados preliminares descartam a utilização de pressão sonora para medir o *squeal noise*, tendo em vista o tempo de aquisição de dados dos equipamentos à disposição. Como o ruído de interesse se apresenta de forma intermitente, é desejável que o tempo de aquisição de dados seja baixo. Com isso, os equipamentos utilizados para medição de pressão sonora com as configurações escolhidas para este trabalho não conseguem apresentar as variações de ruído durante a operação.

Já os processos de medição relacionados com a medição de vibração conseguem apresentar a variação dos valores em um menor tempo, o que facilita a visualização da variação do ruído. Os experimentos controlados, realizados neste trabalho, foram utilizados para avaliar quatro características dos sistemas de medição através da metodologia seis sigma: estabilidade de medição, discriminação, repetibilidade e reprodutibilidade.

Os resultados obtidos nos experimentos medindo o espectro de aceleração e o espectro de envelope de aceleração não apresentam causas especiais ou tendências, o que aprova os processos de medição quanto à sua estabilidade de medição. Isso torna os dados do experimento confiáveis para realizar as demais análises. Experimentos que não possuam estabilidade de medição aprovada podem gerar conclusões erradas sobre as características avaliadas.

A discriminação do espectro de aceleração foi aprovada a partir do experimento

realizado. Este processo de medição possui uma razão entre a menor e a maior variação entre medidas igual a 15 e também possui o número mínimo de categorias apresentadas na carta R para o tamanho de subgrupo utilizado no experimento.

Para as medições com o espectro de envelope de aceleração, observa-se uma razão entre a menor e a maior variação entre medidas igual a 127. Este processo de medição possui o número de categorias superior ao mínimo de categorias necessárias na carta R do experimento para o tamanho de subgrupo utilizado. Isso comprova que o processo de medição está aprovado quanto à discriminação.

Já a repetibilidade e a reprodutibilidade não foram aprovadas para a medição de espectro de envelope de aceleração. É possível observar que as variações entre medidas dentro de um mesmo subgrupo é superior à variação entre subgrupos, o que inviabiliza a utilização deste processo de medição para realizar a medição do *squeal noise* de forma adequada. Outra característica que pode levar a variações dos resultados é o tipo de fixação do sensor, devido à proximidade de sua frequência natural com as frequências de interesse. Esta conclusão é evidente utilizando tanto a análise gráfica, através do *Variability Chart*, quanto na análise numérica, pelos componentes de variação.

Com base nas análises de repetibilidade e reprodutibilidade é possível afirmar que a utilização do espectro de envelope de aceleração não é recomendada para a análise do *squeal noise*. Isso é muito evidente ao comparar as amplitudes de vibração medidas com este processo de medição e a percepção audível por um operador. Nesta análise, não há uma correlação definida entre a intensidade observada do ruído e as amplitudes de vibração medidas.

A medição através do espectro de aceleração possui a repetibilidade de medição aprovada no experimento. Isto se justifica pela baixa influência da repetição de medição na variação total do experimento. A repetição de medições resulta em apenas 2,6 % da variação total do experimento, estando abaixo do critério para aprovação da repetibilidade, o qual apresenta como valor máximo de 10 % da variação total do experimento.

A avaliação da reprodutibilidade do espectro de aceleração mostrou-se aprovada, mas é necessário levar em consideração possíveis variações dos resultados devido à posição do sensor. A posição do sensor influencia na amplitude de medição, dependendo da rotação do motor. Observa-se em altas rotações (maior amplitude de ruído) que a medição no sentido vertical, sentido da zona de carga do rolamento, apresenta valores superiores às medições no sentido horizontal.

Portanto, a medição do *squeal noise* é melhor representada pelo espectro de aceleração, sendo o processo de medição aprovado nas quatro características avaliadas. A comparação entre os valores de amplitude de vibração utilizando este processo de medição e os níveis de ruído observados pelo operador ressalta uma forte relação entre ambos.



Observa-se um aumento da percepção do *squeal noise* com o aumento das amplitudes de vibração medidas, o que ratifica que este processo de medição pode ser utilizado para a medição do ruído de interesse.

Embora o espectro de aceleração esteja com seu MSA (análise do sistema de medição) aprovado, alguns pontos devem ser observados ao realizar a medição. É importante que dois fatores sejam fixados durante as medições: a posição do sensor e a frequência natural do mesmo (método de fixação).

A posição do sensor durante as medições deve ser fixa. Recomenda-se realizar a medição no sentido em que a carga é aplicada ao rolamento, pois apresenta maior amplitude de vibração, o que discrimina melhor o resultado. Comparar medições em diferentes sentidos pode levar a um erro de interpretação.

Para minimizar possíveis variações da medição ocasionadas pela frequência natural do sensor, é aconselhável utilizar uma fixação que aumente a frequência natural do sistema, afastando-a das frequências de interesse. Nos experimentos realizados, a fixação do sensor por niple roscado apresentou um melhor comportamento, comparado com a utilização da base magnética, a qual prolonga em demasia o comprimento do conjunto.

## 5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A medição confiável do mensurando é a base para realização de qualquer trabalho de avaliação do mesmo. A revisão bibliográfica mostra que para realização de trabalhos de melhoria é necessário que o mensurando possua um sistema de medição confiável. O presente trabalho apresenta uma análise quanto a três diferentes processos de medição, mostrando o espectro de aceleração como o processo mais apropriado para avaliação do *squeal noise*.

Com o MSA aprovado é possível seguir o estudo para avaliação do que causa o *squeal noise* em rolamentos rígidos de esferas operando em motores elétricos. Assim, sugere-se a sequência do estudo das causas deste ruído utilizando a metodologia seis sigma, realizando a medição através do espectro de aceleração e levando em consideração as observações levantadas na seção anterior (seção 5.1).

O estudo proposto visa ampliar o conhecimento sobre o fenômeno, visualizando os principais fatores que contribuem para sua ocorrência. Com estes fatores evidenciados é possível propor alterações no produto ou processo de fabricação para minimizar a ocorrência e os efeitos do *squeal noise*.

Outra sugestão de trabalho futuro é realizar a avaliação de qual a menor amplitude do espectro de aceleração em que o ruído é perceptível ao ser humano, com o objetivo de criar um critério de aprovação quanto ao *squeal noise* para motores elétricos. O presente

trabalho realiza as medições em um único motor, com uma única configuração de mancais, o que impossibilita criar tais critérios.

Para realizar esta avaliação é necessário considerar se os valores variam em diferentes condições de operação. A rotação e o tamanho de rolamento são exemplos de fatores que podem contribuir para criação de tais critérios.

## Referências

- AGUIAR, S. *Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao programa seis sigma*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2002.
- AIAG. *Measurements Systems Analysis - Reference Manual*. 4. ed. Michigan: Automotive Industry Action Group (Chrysler Group LCC, Ford Motors Company e General Motors Corporation), 2010.
- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. 1. ed. Barueri: Editora Barueri, 2008.
- ALMEIDA, F. R. do V. *Análises estatísticas e reconhecimento de padrão aplicados em diagnósticos de defeitos em rolamentos através da análise de vibração*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- AZIZI, B.; SHAHKARAMI, M. R.; DALVAND, F.; DALVAND, S.; KHORSANDI, A. Development of current noise cancellation method using sample delaying for bearing fault diagnosis in induction motors. *5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, p. 445–453, 2018.
- BACKER HUGHES. *Catálogo técnico: VB7 Product Datasheet*. [S.l.], 2016.
- BERTELS, T.; PATTERSON, G. Selecting six sigma projects that matter. *Lean & Six Sigma Review*, American Society for Quality, v. 3, n. 1, p. 13, 2003.
- BEZERRA, R. d. A. *Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2004.
- BREYFOGLE, F. W. I. *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods*. 2. ed. Austin: John Wiley & Sons, 2003.
- BRÜEL & KJÆR. *Catálogo técnico: ½-inch Prepolarized Free-field Microphone Type 4188*. [S.l.], 2014.
- BRÜEL & KJÆR. *Catálogo técnico: Microphone Preamplifier — Type 2671*. [S.l.], 2016.
- BRÜEL & KJÆR. *Catálogo técnico: PHOTON + Dynamic Signal Analyzer*. [S.l.], 2016.
- BRÜEL & KJÆR. *Catálogo técnico: TEDS Microphones*. [S.l.], 2016.
- BRÜEL & KJÆR. *Accelerometers*. 2019. Acessado em: 1 mai. 2019. Disponível em: <<https://www.bkvibro.com/en/products/vibration-sensors/accelerometers.html>>.
- CARUSO, D. M. d. A.; HELLENO, A. L. Seis sigma: uma abordagem conceitual como metodologia de gestão ou ferramenta para melhoria da qualidade. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção-Salvador*, p. 14, 2009.
- CHERAGHI, M.; KARIMI, M.; BOOIN, M. B. An investigation on acoustic noise emitted by induction motors due to magnetic sources. *9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, p. 104–109, 2018.

- GARCIA, A. G. P. *Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- GERGES, S. N. Y. *Ruido: Fundamentos e controle*. 2. ed. Florianópolis: Editora Florianópolis, 2000.
- GONÇALEZ, F. G. *Estudo do motor de indução trifásico e desenvolvimento de um dispositivo de proteção efetiva de motores operando em condições anormais: rotor bloqueado e falta de fase*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- GONÇALVES, V. S. *Desenvolvimento de uma metodologia numérica para a predição dos três primeiros modos de vibração de um motor elétrico fixo em base rígida*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- GRUPO SKF. *Catálogo técnico: Rolamentos de esferas*. [S.l.], 2015.
- GRUPO SKF. *Componentes e materiais*. 2018. Acessado em: 5 mar. 2018. Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/principles/general-bearing-knowledge/bearing-basics/components-and-materials/index.html>>.
- HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. *Advanced concepts of bearing technology: rolling bearing analysis*. 5. ed. Boca Raton: Editora CRC press, 2006.
- HENDERSON, K. M.; EVANS, J. R. Successful implementation of six sigma: benchmarking general electric company. *Benchmarking: an international journal*, MCB UP Ltd, v. 7, n. 4, p. 260–282, 2000.
- HILD, C.; SANDERS, D.; ROSS, B. The thought map. *Quality Engineering*, Taylor & Francis, v. 12, n. 1, p. 21–27, 1999.
- IIDA, K.; IGARASHI, A. On the behaviour of rollers in a cylindrical roller bearing. *Bulletin of JSME*, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 2, n. 8, p. 538–545, 1959.
- IMI SENSORS. *Catálogo técnico: Acelerômetro IMI 603C01*. [S.l.], 2007.
- INMETRO. *VIM–Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)*. Duque de Caxias: INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2012.
- JANDA, M.; VITEK, O.; SKALKKA, M. Noise diagnostic of induction machine. *The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM*, IEEE, p. 1–4, 2010.
- JUNIOR, P. d. O. C.; MARCHI, M.; MARTINS, C. H. R.; D’ADDONA, D.; AGUIAR, P. R. d.; BIANCHI, E. C. Estimção espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única. *Revista Matéria*, SciELO Brasil, v. 21, n. 4, p. 827–840, 2016.
- KAKISHIMA, H.; NAGATOMO, T.; IKEDA, H.; YOSHIOKA, T.; KORENAGA, A. Measurement of acoustic emission and vibration of rolling bearings with an artificial defect. *Quarterly Report of RTRI*, Railway Technical Research Institute, v. 41, n. 3, p. 127–130, 2000.

- LIMA, L. M. R. *Estudo da degradação térmica oxidativa de graxas lubrificantes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.
- MOMONO, T.; NODA, B. Sound and vibration in rolling bearings. *Motion & Control*, v. 6, n. 5, p. 29–37, 1999.
- MOORE, D.; MARTELARO, N.; JU, W.; TENNENT, H. Making noise intentional: A study of servo sound perception. *12th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, IEEE, p. 12–21, 2017.
- NAKAI, M.; YOKOI, M.; INOUE, M.; KAWAKAMI, K. Squealing of cylindrical roller bearing. *JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry*, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 34, n. 1, p. 72–81, 1991.
- NAU, S. L.; MELLO, H. G. G. Acoustic noise in induction motors: causes and solutions. *Record of Conference Papers. Industry Applications Society Forty-Seventh Annual Conference. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (Cat. No. 00CH37112)*, IEEE, p. 253–263, 2000.
- NSK BRASIL. *Catálogo Bearing Doctor: Diagnóstico rápido de ocorrências em rolamentos*. [S.l.], 2001.
- NSK BRASIL. *Catálogo técnico: Rolamentos*. [S.l.], 2013.
- NSK LTDA. *Technical report*. 2013. CAT. No. E728g.
- OHTA, H. Sound and vibration research of rolling bearings in japan. *Journal of System Design and Dynamics*, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 7, n. 2, p. 95–110, 2013.
- OLIVEIRA, C. C. d.; GRANATO, D.; CARUSO, M. S. F.; SAKUMA, A. M. Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio. *Instituto Adolfo Lutz. São Paulo*, 2013.
- OLIVEIRA, P. L. L. d. *Avaliação de processos de medição no contexto da metodologia Seis Sigma em uma empresa industrial*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- PATSKO, L. F. Tutorial: Aplicações, funcionamento e utilização de sensores. *Maxwell Bohr: Instrumentação eletrônica*, 2006.
- PIUCCO, R. O.; SGUISSARDI, M. L.; SCHURT, L. C.; TOMAZETTI, L. *Six Sigma Green Belt - Material didático parte 1*. Jaraguá do Sul, 2019.
- RAISINGHANI, M. S.; ETTE, H.; PIERCE, R.; CANNON, G.; DARIPALY, P. Six sigma: concepts, tools, and applications. *Industrial management & Data systems*, Emerald Group Publishing Limited, p. 491–505, 2005.
- RAMALHO, G. L. B.; PEREIRA, A. H.; FILHO, P. P. R.; MEDEIROS, C. d. S. Detecção de falhas em motores elétricos através da classificação de padrões de vibração utilizando uma rede neural elm. *Holos*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, v. 4, p. 185–194, 2014.

- RIFFEL, G. et al. *Desenvolvimento de um sistema para medição e avaliação da atenuação dos protetores auditivos: estudo de caso comparativo em laboratório e em campo*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- RODRIGUES, J. R.; CAMPOS, A. N.; MATEUS, C. F.; SUTÉRIO, R. Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual. *VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial*, Rio de Janeiro, p. 1–7, 2010.
- SANDRI, A.; BASTOS, A. L. A.; PIUCCO, R. O. Avaliação dos fatores que influenciam no dimensional da chapa laminada baseado nos princípios lean seis sigma. *Congresso Nacional de Excelencia em Gestão*, p. 1–13, 2015.
- SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2004.
- SENAPATI, N. R. Six sigma: myths and realities. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Emerald Group Publishing Limited, v. 21, n. 6, p. 683–690, 2004.
- SILVA, H. P. *Diagnóstico de problemas em motores elétricos através da medição e da análise de vibração mecânica - Material didático*. Jaraguá do Sul, 2021.
- SILVA, J. L.; CARDOSO, A. M. Diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos. *Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering*, 2005.
- SILVEIRA, F. F. da; SOUZA, K. L. de; MENDES, J. U. de L. et al. Previsão de falhas em mancais de rolamento por envelope de aceleração. *CIBEM 10 - X Congr. Ibero-Americano em Eng. Mecânica*, v. 10, n. 4, p. 583–586, 2011.
- SOBRINHO, A. P. *Critérios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- USEVICIUS, L. A. *Implantação da metodologia seis sigma e aplicação da técnica estatística projeto de experimentos na resolução de problemas e otimização de processos de fabricação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- VIEIRA, I. L. M.; JUNIOR, A. C. P.; TERRA, L. A. A. Desafios do lean seis sigma na indústria de bebidas. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, Florianópolis, v. 10, n. 19, p. 35–55, 2018.
- WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS SA. *Catálogo técnico: Motor Elétrico Trifásico W22*. [S.l.], 2018.
- WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS SA. *Catálogo técnico: Motor Elétrico Trifásico W50*. [S.l.], 2019.
- WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS SA. *Guia de Especificação Motores Elétricos*. 2021. Rev.: 24.
- WERKEMA, M. C. C. *Criando a cultura seis sigma*. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2002.

ZUO-WEI, P.; HONG-WEN, A.; SHUANG-YIN, L.; YI-BING, L. Amplitude envelope analysis for feature extraction of power plant blower bearing failure. *The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, p. 2821–2824, 2014.

# APÊNDICE A – Dados do experimento

| Fontes de Variação        |                   |                      |                 | Variáveis resposta                       |   |                                |
|---------------------------|-------------------|----------------------|-----------------|--|---|--------------------------------|
| Frequência Natural Sensor | Posição do Sensor | Freq. de Alimentação | Fluxo Magnético | Y1 - Espectro de Aceleração <sup>1</sup> | Y2 - Espectro de Envelope de Acel. <sup>2</sup> | Intensidade de ruído observada |
| Magnética                 | Horizontal        | 60 Hz                | 100%            | 1,5                                      | 1,59  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Horizontal        | 60 Hz                | 100%            | 1,2                                      | 0,91  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Horizontal        | 60 Hz                | 25%             | 1,1                                      | 1,10  | 1 - BAIXO                      |
| Magnética                 | Horizontal        | 60 Hz                | 25%             | 0,8                                      | 0,55  | 1 - BAIXO                      |
| Magnética                 | Horizontal        | 30 Hz                | 100%            | 0,5                                      | 0,74  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Horizontal        | 30 Hz                | 100%            | 0,4                                      | 0,58  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Horizontal        | 30 Hz                | 25%             | 0,5                                      | 0,85  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Horizontal        | 30 Hz                | 25%             | 0,4                                      | 0,46  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Vertical          | 60 Hz                | 100%            | 1,6                                      | 1,64  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Vertical          | 60 Hz                | 100%            | 1,6                                      | 1,26  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Vertical          | 60 Hz                | 25%             | 1,2                                      | 1,18  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Vertical          | 60 Hz                | 25%             | 1,4                                      | 0,76  | 2 - ALTO                       |
| Magnética                 | Vertical          | 30 Hz                | 100%            | 0,5                                      | 0,44  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Vertical          | 30 Hz                | 100%            | 0,5                                      | 0,58  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Vertical          | 30 Hz                | 25%             | 0,4                                      | 0,40  | 0 - SEM                        |
| Magnética                 | Vertical          | 30 Hz                | 25%             | 0,4                                      | 0,58  | 0 - SEM                        |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 60 Hz                | 100%            | 1,7                                      | 1,67  | 2 - ALTO                       |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 60 Hz                | 100%            | 1,4                                      | 1,40  | 2 - ALTO                       |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 60 Hz                | 25%             | 1,1                                      | 1,01  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 60 Hz                | 25%             | 0,9                                      | 1,16  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 30 Hz                | 100%            | 0,5                                      | 1,07  | 0 - SEM                        |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 30 Hz                | 100%            | 0,5                                      | 1,17  | 0 - SEM                        |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 30 Hz                | 25%             | 0,7                                      | 1,05  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Horizontal        | 30 Hz                | 25%             | 0,7                                      | 1,35  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Vertical          | 60 Hz                | 100%            | 1,9                                      | 1,19  | 3 - MUITO ALTO                 |
| Niple Roscado             | Vertical          | 60 Hz                | 100%            | 1,9                                      | 1,37  | 3 - MUITO ALTO                 |
| Niple Roscado             | Vertical          | 60 Hz                | 25%             | 1,4                                      | 1,05  | 2 - ALTO                       |
| Niple Roscado             | Vertical          | 60 Hz                | 25%             | 1,5                                      | 1,26  | 2 - ALTO                       |
| Niple Roscado             | Vertical          | 30 Hz                | 100%            | 0,8                                      | 1,14  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Vertical          | 30 Hz                | 100%            | 0,8                                      | 1,41  | 1 - BAIXO                      |
| Niple Roscado             | Vertical          | 30 Hz                | 25%             | 0,7                                      | 0,94  | 0 - SEM                        |
| Niple Roscado             | Vertical          | 30 Hz                | 25%             | 0,8                                      | 1,12  | 0 - SEM                        |

<sup>1</sup> Medições em g Pico

<sup>2</sup> Medições em g Pico a Pico