

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**LUCAS STACIAKI DA SILVA**

**UMA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE MANCAL DE BOMBA HIDRÁULICA  
CENTRÍFUGA BASEADA NA NORMA ISO 10816**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2020**

**LUCAS STACIAKI DA SILVA**

**UMA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE MANCAL DE BOMBA HIDRÁULICA  
CENTRÍFUGA BASEADA NA NORMA ISO 10816**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Mecânica, da Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Ramalho

Coorientador: Prof. Dr. Sergio Dalmas

**GUARAPUAVA**

**2020**



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE BOMBA HIDRÁULICA BASEADA NA NORMA ISO 10816.

LUCAS STACIAKI DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 08 de Dezembro de 2020, de maneira remota, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

DENISE ALVES RAMALHO

**Prof. Orientador**

---

CARLA DANTAS DA SILVA

**Membro Da Banca**

---

SÉRGIO DALMÁS

**Membro Da Banca**

---

ALDO PRZYBYSZ

**Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

---

LUCAS STACIAKI DA SILVA

**Estudante do Curso**

## RESUMO

SILVA, Lucas Staciaki da Silva. **Uma análise de vibração de mancal de bomba hidráulica centrífuga baseado na norma ISO 10816**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

A análise de vibração de componentes mecânicos é de extrema importância para o acompanhamento da manutenção preditiva devido a prever falhas antes que aconteçam. No cenário atual da engenharia existem muitos equipamentos que podem realizar medições através de diversos métodos. Porém, nem todos os métodos seguem uma padronização ou são utilizados de maneira correta. Com isso, alguns resultados podem não traduzir a realidade e gerar informações úteis para a tomada de decisão. A norma ISO 10816 mostra as diretrizes para realizar as medições, critérios de vibração, posições de medidores e outros parâmetros relevantes. Este trabalho vai se basear em um componente específico que sofre com vibração em diferentes tipos de máquinas, o mancal de uma bomba hidráulica centrífuga. Os resultados do estudo de análise de vibração desses componentes contribuem para conclusões lógicas em relação aos diferentes fatores de serviço da bomba hidráulica analisada.

**Palavras-chave:** Manutenção preditiva. Vibrações. Análise de vibrações. Norma ISO 10816.

## ABSTRACT

SILVA, Lucas Staciaki da Silva. **A vibration analysis of centrifugal hydraulic pump bearing based on ISO 10816**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

The vibration analysis of mechanical components is extremely important to monitor predictive maintenance as it can predict failures before they happen. In the state of the art of engineering scenario are many equipment that can perform measurements through different measuring methods. However, not all methods follow a standard norm or are used correctly. Thereby, some results may not reflect reality or generate useful information for decision making in regard of maintenance. The ISO 10816 standard shows guidelines for measurement, vibration criteria, meter placement and other relevant parameters. Thus, the study will be based on a specific component that suffers from vibration in different types of machines, the bearing support of a centrifugal hydraulic pump. The results of the vibration analysis study on these components contribute for logical conclusions in regard of the different service factors of the analyzed hydraulic pump.

**Keywords:** Predictive Maintenance. Vibrations. Vibration analysis. ISO 10816 standard. Maintenance indicators.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso e nem pessoas fracassadas. O que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”. (Augusto Cury)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me dar a oportunidade de fazer esse curso, por me dar perseverança, paciência e dedicação. Agradeço aos meus pais Marcos e Maristela que sempre me apoiaram não importando qual era a dificuldade, ao meu irmão Samuel mais novo ao qual tem um futuro brilhante pela frente e que muitas das minhas decisões foram tomadas para que um dia ele se espelhasse em mim. Aos meus avós queridos que me fazem muito orgulhoso de poder ter eles por perto, e dar a eles a alegria de ver o seu neto formado engenheiro será uma grande satisfação.

A minha namorada Millena Nalevaiko que é a pessoa que mais me apoia, que está comigo nos melhores e nos piores momentos, que é a pessoa que vai ver todo esse esforço que eu tive durante vários anos se tornar realidade. A amo muito e dedico todo meu empenho para ela.

Aos meus melhores amigos que sempre estiveram junto a mim Charles Michalak, Guilherme Vicentini e Rafael Serbay, junto a eles desenvolvi grandes habilidades, ajudei e fui ajudado, sempre estiveram comigo e sei que posso contar com eles sempre que precisar.

Queria agradecer a minha orientadora Denise que é uma pessoa muito especial dentro da universidade e que sempre tenha essa relação com os alunos, esse carisma radiante, e a competência de uma profissional gabaritada que é.

Por último queria agradecer a cada pessoa que passou pelo meu caminho direta ou indiretamente tiveram contribuições para a minha formação, sejam professores, colegas, amigos, conhecidos, entre outros muito obrigado.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro Sismógrafo inventado na China. Fonte: Rao e Singiresu (2008)...	13
Figura 2 - Ponte de Tacoma durante vibração induzida pelo vento. Fonte: Rao e Singiresu (2008).....	14
Figura 3 - Turbina a gás. Fonte: Siemens (2020) .....	17
Figura 4 - Motor elétrico 50 KW. Fonte: Weg (2020) .....	17
Figura 5 - Sistema massa mola. ....	19
Figura 6 – Sistema vibracional com mais de um grau de liberdade. Fonte: Rao e Singiresu (2008).....	20
Figura 7 - Sistema massa mola da figura acima. Fonte: Rao e Singiresu (2008).....	21
Figura 8 - Sistema com molas em paralelo e em série. Fonte: Rao e Singiresu (2008).....	21
Figura 9 - Aplicação de uma força externa. Fonte: Rao, Singiresu, Vibrações Mecânicas (2008) .....	22
Figura 10 - Falhas que podem ser ocasionadas através da vibração Fonte: Fluke (2020). .....	26
Figura 11 - Operador obtendo uma análise espectral. Fonte: Fluke (2020).....	26
Figura 12 - Exemplo de mancal. Fonte: Barilli (2013).....	31
Figura 13 - mancal NSK Fonte: NSK (2020) .....	31
Figura 14 - Mancal de deslizamento. Fonte: Omicrom (2020).....	33
Figura 15 - Vista explodida de rolamentos de esferas rolos e agulha. Fonte: Barilli (2013).....	34
Figura 16 - Pontos de medição para mancal de rolamento. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	37
Figura 17 - Pontos de medição para rolamentos tipo carcaça. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	38
Figura 18 - Pontos de medição para pequenas máquinas elétricas. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	38
Figura 19 - Pontos de medição para motores alternativos. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	39
Figura 20 - Pontos de medição para conjuntos de máquinas verticais. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	39
Figura 21 - Alarmes acionados com irregularidades. Fonte: Almeida (2008) .....	42
Figura 22 - Bomba de bancada Fonte: Autoria Própria.....	43
Figura 23 - Primeira posição de medição Fonte: Autoria Própria.....	44
Figura 24 - Segunda posição de medição Fonte: Autoria Própria.....	45



Figura	25	-	Sensor	triaxial
Fonte: Fluke (2020).....				45
Figura	26	-	Itens	Fluke
Fonte: Fluke (2020).....				46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Forma geral dos critérios de aceitação da velocidade de vibração. Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).....	40
Gráfico 2 - Local 3 faixa alta no eixo axial .....	49
Gráfico 3 - Local 3 faixa baixa no eixo axial.....	49
Gráfico 4 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial.....	50
Gráfico 5 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial.....	51
Gráfico 6 - Local 3 faixa alta no eixo radial .....	51
Gráfico 7 - Local 3 faixa baixa no eixo radial .....	52
Gráfico 8 - Local 3 faixa alta no eixo axial .....	54
Gráfico 9 - Local 3 faixa baixa no eixo axial.....	54
Gráfico 10 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial.....	55
Gráfico 11 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial.....	55
Gráfico 12 - Local 3 faixa alta no eixo radial .....	56
Gráfico 13 - Local 3 faixa baixa no eixo radial .....	56
Gráfico 14 - Local 3 faixa alta no eixo axial .....	58
Gráfico 15 - Local 3 faixa baixa no eixo axial.....	58
Gráfico 16 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial.....	59
Gráfico 17 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial.....	60
Gráfico 18 - Local 3 faixa alta no eixo radial .....	60
Gráfico 19 - Local 3 faixa baixa no eixo radial .....	61
Gráfico 20 - Local 3 faixa alta no eixo axial .....	63
Gráfico 21 - Local 3 faixa baixa no eixo axial.....	63
Gráfico 22 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial.....	64
Gráfico 23 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial.....	65
Gráfico 24 - Local 3 faixa alta no eixo radial .....	65
Gráfico 25 - Local 3 faixa baixa no eixo radial .....	66
Gráfico 26 - Local 4 faixa alta no eixo axial .....	68
Gráfico 27 - Local 4 faixa baixa no eixo axial.....	68
Gráfico 28 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial.....	69
Gráfico 29 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial.....	69
Gráfico 30 - Local 4 faixa alta no eixo radial .....	70
Gráfico 31 - Local 4 faixa baixa no eixo radial .....	70
Gráfico 32 - Local 4 faixa alta no eixo axial .....	72
Gráfico 33 - Local 4 faixa baixa no eixo axial.....	72
Gráfico 34 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial.....	73
Gráfico 35 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial.....	73
Gráfico 36 - Local 4 faixa alta no eixo radial .....	74
Gráfico 37 - Local 4 faixa baixa no eixo radial .....	74
Gráfico 38 - Local 4 faixa alta no eixo axial .....	76
Gráfico 39 - Local 4 faixa baixa no eixo axial.....	76
Gráfico 40 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial.....	77
Gráfico 41 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial.....	77

Gráfico 42 - Local 4 faixa alta no eixo radial .....	78
Gráfico 43 - Local 4 faixa baixa no eixo radial .....	78
Gráfico 44 - Local 4 faixa alta no eixo axial .....	80
Gráfico 45 - Local 4 faixa baixa no eixo axial.....	80
Gráfico 46 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial.....	81
Gráfico 47 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial.....	81
Gráfico 48 - Local 4 faixa alta no eixo radial .....	82
Gráfico 49 - Local 4 faixa baixa no eixo radial .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Aplicação de recursos (h/h) por tipo de manutenção Brasil de 1995 a 2011. .....	16
Tabela 2 - Nível de vibração ISO 2372. ....	25
Tabela 3 - Limites utilizados para definir um Alarme. ....	41
Tabela 4 - Descrição das medidas realizadas ..... 44	44
Tabela 5 - Parâmetros de medição para 30 Hz ..... 48	48
Tabela 6 - Parâmetros de medição para 40 Hz ..... 53	53
Tabela 7 - Parâmetros de medição para 50 Hz ..... 57	57
Tabela 8 - Parâmetros de medição para 60 Hz ..... 62	62
Tabela 9 - Parâmetros de medição para 30 Hz ..... 67	67
Tabela 10 - Parâmetros de medição para 40 Hz ..... 71	71
Tabela 11 - Parâmetros de medição para 50 Hz ..... 75	75
Tabela 12 - Parâmetros de medição para 60 Hz ..... 79	79
Tabela 13 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo axial ..... 83	83
Tabela 14 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo tangencial ..... 84	84
Tabela 15 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo radial..... 85	85
Tabela 16 - Alarmes.....	87

## SUMÁRIO

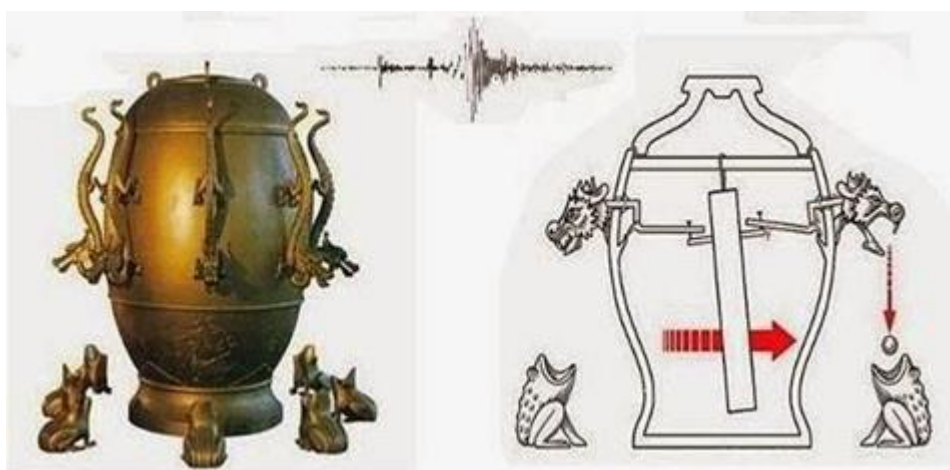
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
<b>2. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
2.1 VIBRAÇÕES.....	19
2.2 VIBRAÇÃO EXCITADA HARMONICAMENTE.....	22
2.3 ANÁLISE ESPECTRAL.....	24
2.4 INDICADORES DE MANUTENÇÃO.....	28
2.5 MANCAIS.....	30
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>47</b>
4.1 LOCAL 3.....	47
4.2 LOCAL 4.....	66
4.3 Discussão dos resultados.....	86
<b>5. CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o interesse pelo estudo da vibração começou primeiramente pelos instrumentos musicais, como apitos e tambores, quando se iniciou a investigação e análise sobre a causa do som. Como a música foi o precursor para os estudos da vibração, a data de origem da vibração é a mesma da música: cerca de 400 a.C. (RAO 2008)

O filósofo Pitágoras foi o primeiro a investigar a música com base científica e, conseqüentemente, foi o primeiro a analisar a vibração. Seus principais experimentos eram realizados em um instrumento chamado de monocórdio. Ele conseguiu identificar através de experimentos com cordas de diferentes tamanhos e mesma tensão, que o comprimento da corda é diretamente proporcional a nota que ela pode alcançar. Apesar desses estudos o filósofo não deixou nada registrado. (RAO, SOTELO JR. 2008, 2006)

Na China, pelo grande número de terremotos, e com alta destruição, começou a se estudar métodos de prever um terremoto e lá foi inventado o primeiro sismógrafo do mundo. Dentro da sua estrutura existia um pêndulo muito pesado ao qual só era afetado por abalos profundos. Era feito de bronze e tinha oito cabeças de dragões e abaixo dessas cabeças 8 sapos com a boca aberta. Quando acontecia um abalo sísmico um dos dragões soltava uma bola e a bola caía na boca do sapo.



**Figura 1 - Primeiro Sismógrafo inventado na China.  
Fonte: Rao e Singiresu (2008)**

Assim eles poderiam identificar qual região foi afetada e também poderiam tomar alguma atitude emergencial. Foi a primeira aplicação usando vibração que teve êxito. (RAO, BALACHANDRAN 2008, 2011)

Os estudos voltados para engenharia são focados em projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistema de controle, dentre outros. Um exemplo típico de vibração que ocorre na indústria é a vibração em um motor que ocorre normalmente pelo seu desbalanceamento e pode acarretar em influências no seu desempenho. Uma das possíveis causas na influência no desempenho de motores é a manutenção inadequada que pode levar o motor a falhas ou panes. Além disso, a vibração promove, geralmente, o desgaste do material, causando ruídos. A identificação precoce de irregularidades na vibração previne danos ao equipamento. Em estruturas que servem para apoiar máquinas e equipamentos rotativos, dos quais sofrem vibração também. Essas estruturas podem sofrer colapso por fadiga devido a variação da vibração cíclica que ocorre na estrutura.

Uma das coisas que pode ocorrer com o corpo é a vibração exercida nele coincidir com a sua frequência natural. Quando isso acontece o corpo sofre várias deflexões e excessivas falhas. Um exemplo clássico deste efeito é a Ponte de Tacoma como podemos ver na Figura 2 que entrou em colapso quando o vento exerceu uma vibração que coincidiu com a sua frequência natural. Este fenômeno é chamado também de ressonância (RAO 2008).



**Figura 2 - Ponte de Tacoma durante vibração induzida pelo vento.  
Fonte: Rao e Singiresu (2008)**

A vibração é um movimento que se repete em um intervalo de tempo. O estudo da vibração trata da análise de movimentos oscilatórios de corpos e forças associadas a eles. O sistema básico para realizar uma análise vibracional é um meio para armazenar energia potencial representado pela elasticidade de uma mola, um meio para armazenar energia cinética representado pela inércia de uma massa e um meio para dissipar energia representado pelo amortecimento de um amortecedor. Basicamente, ocorre a transferência entre energia potencial e energia cinética, alternadamente. Se o sistema possui um amortecedor, ele vai dissipando essa energia em cada ciclo. Esse sistema é conhecido como sistema massa-mola-amortecedor.

Os graus de liberdade de um sistema representam o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para se determinar posições dentre todas as partes do sistema.

Vibrações podem ser classificadas em 4 grandes vertentes: Vibração livre e forçada; Vibração não amortecida e amortecida; Vibração linear e não linear; Vibração determinística e aleatória. Determinar qual é o tipo de vibração é um fator chave para que se obtenha resultados quantitativos reais de um projeto. (BALACHANDRAN 2011)

Se na concepção do projeto não for incluso a vibração que as máquinas ou componentes podem sofrer, pode ocorrer perdas e danos. Existem vibrações que atingem máquinas e equipamentos de pequeno, médio e grande porte, quanto maior a máquina ou maior a potência da máquina atingida por vibração maior será o prejuízo.

Conseguir medir, quantificar, e tomar uma decisão baseado em dados sobre a vibração é uma técnica dentro da manutenção chamada de técnica preditiva. A análise de vibração é uma técnica da manutenção preditiva, que tem por objetivo fazer o monitoramento de máquinas e equipamentos através de instrumentos específicos. Esta prática ainda é pouco utilizada no Brasil correspondendo a apenas 18% dos recursos aplicados como mostra a Tabela 1.



**Tabela 1 - Aplicação de recursos (h/h) por tipo de manutenção Brasil de 1995 a 2011.**

Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2011	27,40	37,17	18,51	16,92
2009	29,85	38,73	13,74	17,68
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,80	35,00	18,64	13,56

Hh (serviços de manutenção) / Hh (total de trabalho)

**Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011)**

A manutenção preditiva é um método muito eficiente, mas que demanda mão de obra qualificada, pois é baseada em acompanhamento ou monitoramento do equipamento com aparelhos específicos que medem vibrações.

Na indústria, em geral, pode-se ter vários equipamentos que sofrem com vibrações e isso pode ser reduzido de maneira significativa se forem realizados balanceamentos e estudos com foco em análises de vibrações. Os elementos mais comuns que sofrem vibração em uma indústria são: motores, bombas, redutores, ventiladores, e principalmente máquinas rotativas. (KARDEC 2005, GARCIA 2012)

Normas técnicas são utilizadas como diretrizes para avaliação, medição e acompanhamento, dentre outras coisas. Para vibração de grande porte existe a norma ISO 10816. Ela orienta como realizar as medições e avaliar as vibrações mecânicas em máquinas e equipamentos, e ajuda também no dimensionamento de um sistema de vibração. A principal vantagem de se utilizar uma norma é a que os critérios adotados por ela, já foram testadas e aprovadas por diversas instituições.

Para máquinas de grande porte, que tem uma rotação e potência alta, deve-se ter um cuidado redobrado com a vibração. A classificação de acordo com norma ISO 10816 sobre máquinas de grande porte é: Grandes geradores e turbinas a vapor, máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 r/min e 15000 r/min, conjuntos acionados por turbina a gás, conjuntos de máquinas em geração e bombeamento hidráulica para geração de energia e máquinas alternativas com potência superior a 100 kW.



**Figura 3 - Turbina a gás.  
Fonte: Siemens (2020)**



**Figura 4 - Motor elétrico 50 KW.  
Fonte: Weg (2020)**

A norma fornece diretrizes para aplicação de critérios de avaliação de vibração das máquinas e equipamentos citados anteriormente. Dividida em 6 partes, ela auxilia e instrui sobre como obter valores confiáveis de vibração e em qual equipamento ela pode ser utilizada. Com isso, evita-se danos a equipamentos como os das figuras 3 e 4, e evita-se grandes prejuízos para a indústria. (ISO 10816, 2000)

As normas são importantes, e seguir suas orientações faz o erro ocasionado por vibrações diminuir drasticamente. Então, os engenheiros buscam utilizar as normas cada caso e máquina específica, seguindo sua classificação. Então, os projetos podem ser padronizados de acordo com a categoria da máquina, esse padrão é muito importante para que se possa aplicar em projetos futuros.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Utilizar um padrão de técnicas e procedimentos para a medição de vibração, baseado em norma ISO, buscando assim a padronização e eficácia na medição e análise de vibração de componentes mecânicos. Realizar a medição em um equipamento até as suas especificações máximas e medir os resultados das vibrações mecânicas, assim podendo analisar cada situação de maneira distinta.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar uma revisão bibliográfica geral sobre vibrações, análise de vibrações, parâmetros e critérios. Utilizar a norma ISO para definir posições de medição, aparelhos e faixa de medição, critérios de vibração, alarmes.

Realizar a medição de um mancal que é acoplado a uma bomba hidráulica centrífuga, com medições em diferentes faixas de Hz, comparando a vibração em estado normal com a vibração da bomba hidráulica centrífuga cavitando.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O mancal é um componente mecânico utilizado em diversas máquinas e equipamentos, que frequentemente não é analisado através da norma ISO 10816. É importante se realizar a medição e analisar a vibração em amplas faixas de trabalho do mancal realizando o procedimento adequado segundo a norma, e provar com dados que essa análise é importante.

Como muitas empresas brasileiras ainda utilizam apenas da manutenção corretiva, textos e artigos como esse são importantes para mostrar o quão importante é a utilização correta de práticas de manutenção e obediência das normas, se evitando o alto custo de manutenção, e o custo com paradas não programadas. Como a manutenção muitas vezes é vista como custo e não como um investimento, as presentes informações mostrarão a grande importância operacional dela no setor industrial.

## 2.REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 VIBRAÇÕES

Em um sistema em que ocorrem vibrações, existem vários fatores dependentes de condições iniciais. É muito difícil determinar todas as variáveis que existem no sistema a ser analisado. Considera-se então as variáveis relevantes e negligencia-se as irrelevantes para ser viável a modelagem matemática que tem como objetivo obter as equações que governam o comportamento do sistema a fim de se realizar uma análise. A obtenção das equações governantes do movimento é possível pela utilização dos princípios da dinâmica. Normalmente, o modelo matemático resultante consiste de um sistema de equações diferenciais ordinárias para um sistema discreto e de equações diferenciais parciais para um sistema contínuo (BALACHANDRAN, 2011).

Depois de encontradas as equações governantes, busca-se a solução das mesmas. É possível a utilização métodos de resolução como os métodos padronizados para resolver equações diferenciais, os métodos que utilizam transformada de Laplace, os métodos matriciais e os métodos numéricos. A solução dessas equações nos fornece valores de deslocamentos, velocidades e acelerações das várias massas do sistema. Com esses resultados pode-se tomar iniciativas para obter resultados que suavizem a vibração. (BALACHANDRAN, 2011).

O sistema pode ser simplificado no conhecido sistema massa mola como é mostrado na figura 5:

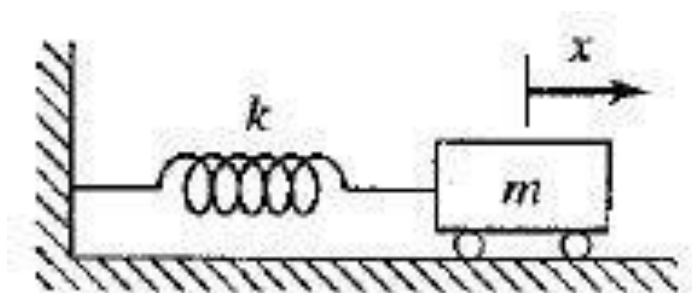


Figura 5 - Sistema massa mola.

Fonte: Rao e Singiresu (2008)

Conhecendo o sistema, algumas equações são definidas:

$$F = kx \quad (1)$$

F é a força exercida pela mola, k é a constante elástica e x é o deslocamento sofrido. Já o trabalho realizado U durante a deformação é por:

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \quad (2)$$

Vigas também podem se comportar como molas, com:

$$\delta = \frac{wl^3}{3EI} \quad (3)$$

O símbolo  $\delta$  é a deflexão elástica da viga, W é o peso, l é o comprimento, E o módulo de Young e I é o momento de inercia da seção transversal da viga. Com isso podemos considerar que a constante elástica é:

$$k = \frac{w}{\delta} = \frac{3EI}{l^3} \quad (4)$$

O sistema pode ter um ou mais graus de liberdade. Um exemplo típico é dado nas figuras 6 e 7:

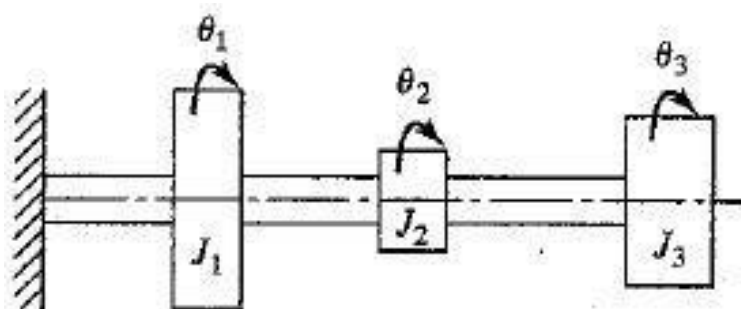


Figura 6 – Sistema vibracional com mais de um grau de liberdade.  
Fonte: Rao e Singiresu (2008).

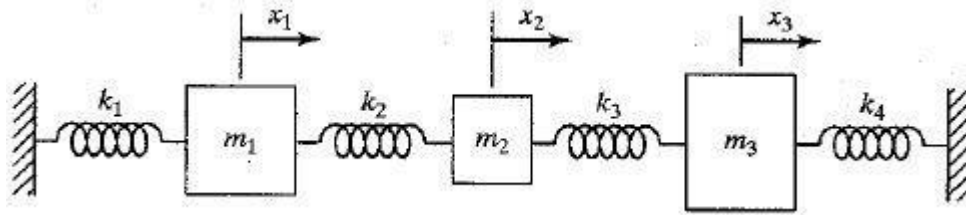


Figura 7 - Sistema massa mola da figura acima.  
Fonte: Rao e Singiresu (2008).

Quando há mais de uma mola no sistema, elas podem estar arranjadas em série ou em paralelo como mostra a Figura 8. A analogia realizada para esse sistema é a mesma de capacitores equivalentes utilizada na eletricidade. Com isso, temos:

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n \quad (5)$$

Na a associação de molas em paralelo temos:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (6)$$

Na a associação de molas em série temos:

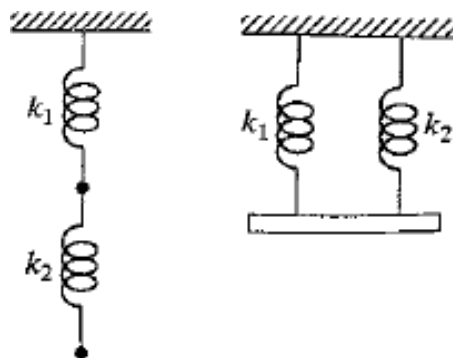
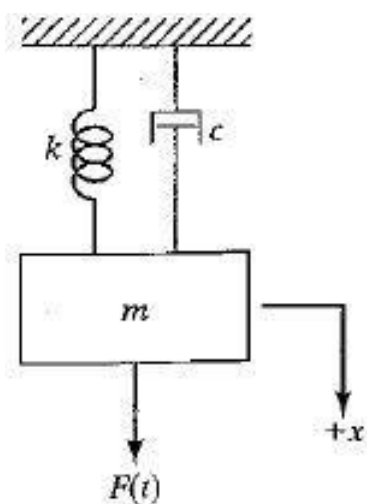


Figura 8 - Sistema com molas em paralelo e em série.  
Fonte: Rao e Singiresu (2008).

## 2.2 VIBRAÇÃO EXCITADA HARMONICAMENTE

Quando a vibração é causada por uma ou mais forças externas, ela é denominada “forçada”, e pode ter forma harmônica ou não, periódica ou aleatória.

A Figura 9 nos mostra a ação de uma força externa em um sistema de pouca complexidade:



**Figura 9 - Aplicação de uma força externa.**  
Fonte: Rao, Singiresu, *Vibrações Mecânicas* (2008)

Utilizando equações do movimento, pode-se demonstrar que a oscilação forçada tem:

$$x(t) = X_0 e^{-\tau \omega_n t} \cos(\omega dt - \phi_0) + X \cos(\omega t - \phi) \quad (7)$$

Tendo em vista que  $\omega_d$  é a frequência natural de um sistema amortecido e  $\omega$  é a frequência de incidência da força externa que provoca vibração. A amplitude de vibração é dada por:

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

A simbologia  $F_0$  é a amplitude da força de excitação,  $k$  é a rigidez do elemento de mola do sistema e  $m$  é a massa e  $c$  a constante de amortecimento. (SOTELO JR, 2006).

Seu ângulo de fase pode ser encontrado através de:

$$\Phi = \text{tg}^{-1} \left( \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (9)$$

A vibração mais comum que ocorre em elementos de máquina é a vibração excitada harmonicamente por isso a importância de seu estudo. Máquinas rotativas são o exemplo mais comum para esse tipo de vibração.



## 2.3 ANALISE ESPECTRAL

Em uma máquina existem diversos componentes, e muitos com partes móveis. Cada parte móvel possui o seu próprio nível de vibração aceitável, e pode ser isolada e estudada. Já o conjunto de todos esses elementos vibrará com a combinação das respectivas frequências.

Conseguindo isolar cada o espectro de vibração de cada elemento, deve-se realizar o monitoramento da vibração, se ocorrer alguma alteração na assinatura espectral quer dizer que algum componente interno desse conjunto de componentes pode ter sido afetado. Quando isso ocorre pode se esperar falhas e panes do conjunto de máquinas e equipamentos. (ANTONIOLLI, 1999)

Os parâmetros de vibração são medidos de acordo com normas internacionais como a DIN 7090, ISO 2372 e atualmente a ISO 10816. Elas definem os parâmetros de vibrações que devem ser medidos em unidades métricas como mostra abaixo:

- Velocidade: mm/s
- Deslocamento  $\mu\text{m}$
- Aceleração  $\text{m/s}^2$

A tabela 2 mostra os níveis de vibração que podem ser obtidos pela norma ISO 2372.

**Tabela 2 - Nível de vibração ISO 2372.**

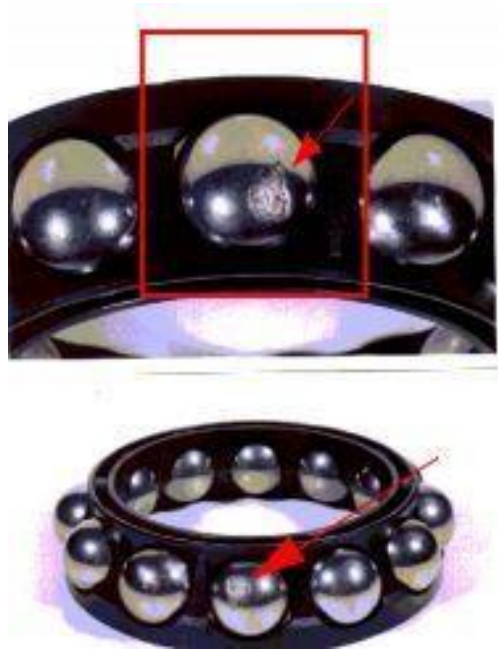
Nível	Classe I – até 15 Kw (20 CV)	Classe II – até 15 a 75 Kw (20-100 CV)	Classe III – acima de 75 KW base Rígida	Classe IV – acima de 75 KW base Flexível
A – Bom	Até 0,71	Até 1,12	Até 1,8	Até 2,8
B – Satisfatório	0,71 a 1,8	1,12 a 2,8	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1
C – Insatisfatório	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1	4,5 a 11,2	7,1 a 18,0
D – Inaceitável	Acima de 4,5	Acima de 7,1	Acima de 11,2	Acima de 18,0

**Fonte: International Organization of Standardition (1974).**

Na Tabela 2 podemos ver a divisão dos equipamentos em 4 classes baseado em sua potência ou por sua base ser rígida ou flexível. Esses parâmetros podem ser medidos da seguinte maneira:

- Pico a pico: Indica valores de percurso máximo da onda, mostrando o deslocamento vibratório da parte da máquina que esta crítica.
- Pico: Leva apenas em consideração a ocorrência do pico, não levando em consideração outros fatores importantes como o histórico do tempo da onda.
- Médio Retificado: Diferente do Pico, leva o histórico do tempo da onda, mas normalmente não é um dado físico considerável.
- RMS: Relata a capacidade destrutiva da vibração o que é muito mais importante do que o que outros métodos de medição relatam.

Realizando esse tipo de análise de vibração pode-se evitar defeitos como mostra a Figura 10:



**Figura 10 - Falhas que podem ser ocasionadas através da vibração**  
Fonte: Fluke (2020).

Essa falha acarretaria em uma possível pane, acarretando em uma possível parada, e com isso se perderia tempo de produção. (GARCIA, 2005)

Na figura abaixo podemos ver o mantenedor operando o dispositivo de análise e vibração:



**Figura 11 - Operador obtendo uma análise espectral.**  
Fonte: Fluke (2020).

Deve-se ressaltar os pontos positivos da manutenção preditiva e análise de vibração, apontadas abaixo:

- Eliminação de desperdícios de peças
- Diminuição de estoques associados
- Aumento da eficiência nos reparos
- Aumento na confiabilidade da planta
- Diminuição da gravidade dos problemas
- Maior disponibilidade das máquinas
- Diminuição dos custos globais
- Aumento da confiabilidade
- Aumento da produtividade
- Melhoria na qualidade

Com isso em mente tem-se que a manutenção preditiva realizada para análise de vibração é um fator muito importante na indústria. Ela traz muitos benefícios e ainda é pouco utilizada e disseminada no Brasil. Talvez um dos principais motivos para a mesma não ser utilizada é alto custo do equipamento e também a falta de mão de obra qualificada.

É necessário que as indústrias melhorem o nível técnico para que cada vez mais se traga soluções para dentro da indústria, unindo o conhecimento teórico ao prático. E buscando resolver novos desafios dentro do contexto da indústria brasileira.

## 2.4 INDICADORES DE MANUTENÇÃO

A manutenção está cada vez mais evoluída. Hoje o desenvolvimento de novas técnicas e novos sistemas requerem cada vez mais cuidados com a manutenção. Existem indicadores de manutenção que podem mostrar informações muito mais relevantes extraídas do dia a dia da empresa. Ainda existe um certo preconceito sobre a manutenção, pois em muitas empresas ela é vista como um gasto e não como um investimento.

Com a entrada de novas técnicas e sistemas para a gestão da manutenção, e com empresas de grande porte obtendo resultados confiáveis com essas técnicas, esse conteúdo tem se difundido gradativamente.

Os indicadores de manutenção são relacionados com gerência, técnicas aplicadas, operação, sistemas, equipamentos, aparelhagem, e quantificam a qualidade da manutenção efetuada pela empresa. (ALMEIDA, 2008)

As principais medidas de desempenho da manutenção são:

Tempo Médio para Falha (MTTF – Mean Time to Fail): é um valor esperado ou uma média do tempo para que ocorra uma falha aleatória qualquer. Esse indicador mensura a média do tempo que um equipamento pode operar com sua capacidade total sem qualquer interrupção no período considerado, e é comum expressar a probabilidade da falha em um gráfico exponencial, onde a abscissa é o tempo e a ordenada a probabilidade de ocorrer a falha. (ALMEIDA, 2008, pg 40)

Tempo Médio para Reparo (MTTR - Mean Time to Repair): é a medida de distribuição do tempo de reparo do equipamento ou sistema. (ALMEIDA, 2008, pg 40)

Tempo Médio entre Falhas (MTBF – Mean Time Between Fail): é um índice de medida utilizado para estiar as intervenções em função do histórico do equipamento. (ALMEIDA, 2008, pg 40)

Disponibilidade (A - Availability): é definida como a capacidade de um equipamento ou instalação realizar sua função em condições específicas em um determinado período de tempo, levando em conta fatores externos a que está provido. (ALMEIDA, 2008, pg 40)

Confiabilidade (R – Reliability): é um dos principais atributos que determina a eficácia de um equipamento ou sistema. É definida como a probabilidade de um equipamento ou sistema desempenhar satisfatoriamente sua função a qual foi projetado ou é requerido, sobre condições de operações

especificadas, durante um período pré-estabelecido de tempo. (ALMEIDA, 2008, pg 41)

Esses indicadores podem ser afetados diretamente perante o tipo de manutenção realizada. O tempo de falha do equipamento será menor quanto pior for o estilo e qualidade da manutenção realizada, e os indicadores mostram isso. Para cada estilo de manutenção o índice muda, conhecendo os tipos: corretiva, preventiva e preditiva.

Analisando a manutenção corretiva, sabe-se que suas falhas são catastróficas e os danos geralmente são irreversíveis e de grande magnitude. Após a manutenção corretiva realizada no equipamento, os futuros valores da MTTF podem ser iguais ou inferiores ao valor da MTTF anterior a falha, sendo o valor maior ou menor uma variável dependente da severidade da quebra e qualidade no reparo dos danos. A MTTR seria muito elevada devido a gravidade das falhas, fazendo com o lucro cessante fosse elevado, além do risco de perda do equipamento pelos graves danos ou de voltar a condição de operação com qualidade de funcionamento inferior. A disponibilidade também seria baixa, visto que este índice é função das horas paradas do equipamento. A confiabilidade seria drasticamente afetada pela insegurança do valor da MTBF devido a grande probabilidade da não normalização das condições iniciais do equipamento. (ALMEIDA, 2008, pg 41)

Por outro lado, a manutenção preventiva é mais eficiente que a citada anteriormente, pois as MTTF e MTBF são normatizadas pelos fabricantes fazendo com que os valores destes dois índices sejam regulares ao longo das manutenções. A qualidade da manutenção pode ser garantida pela escolha de peças adequadas e pela mão de obra qualificada para execução da mesma. A disponibilidade do equipamento pode ser afetada pela somatória das paradas para a realização da manutenção preventiva. A confiabilidade do equipamento passa a ser nula se MTBF for igual ao prazo de manutenção estipulado pelo fabricante. A vantagem desta manutenção é a certeza da disponibilidade do equipamento podendo-se assim, planejar a produção aliada a manutenção. (ALMEIDA, 2008, pg 42)

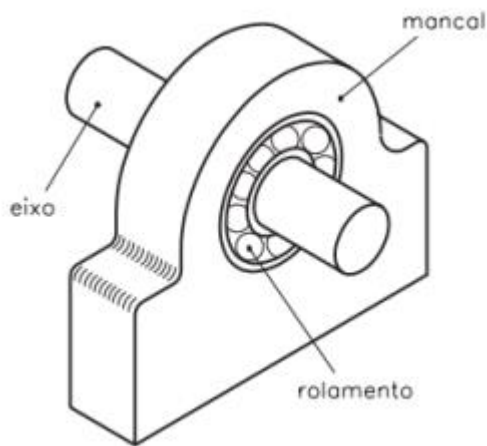
Visto a análise das duas metodologias aplicadas à manutenção, a metodologia da manutenção preditiva visa somente a parada necessária do equipamento, fazendo acompanhamentos e análise de parâmetros definidos para cada tipo de equipamento. Para esta metodologia não ocorrerão falhas nos componentes do equipamento, visto que, o acompanhamento de um parâmetro qualquer é feito ao longo do tempo. O que ocorrerá é a parada antes da falha do componente. Desta maneira a MTTF (taxa média entre

falhas) e MTBF (taxa média entre reparos) serão altas e confiáveis, já que, o equipamento só parará depois de esgotada a vida útil de um determinado componente. A MTTR será pequena e pré-estabelecida, isto é, uma organização tanto na gestão da manutenção, gestão da cadeia produtiva onde o equipamento faz parte e também de peças sobressalentes, terão sua máxima otimização com a utilização desta metodologia. A disponibilidade do equipamento aumenta devido as diminuições do tempo de manutenção, ou seja, diminuição das MTTR, e quantidades de paradas necessárias para as atividades mantenedoras da funcionalidade do equipamento, acarretando na diminuição dos lucros cessantes devido a parada do equipamento e logo, da cadeia produtiva ao qual ele faz parte. A confiabilidade aumenta, visto que, as peças só serão trocadas após a comprovação de uma falha eminente, isto é, após a utilização da vida útil real que é diferente da estimada pelo fabricante. Desta forma a MTBF será maior e a confiabilidade do equipamento será diretamente proporcional ao crescimento da MTBF. (ALMEIDA, 2008, pg 42)

## 2.5 MANCAIS

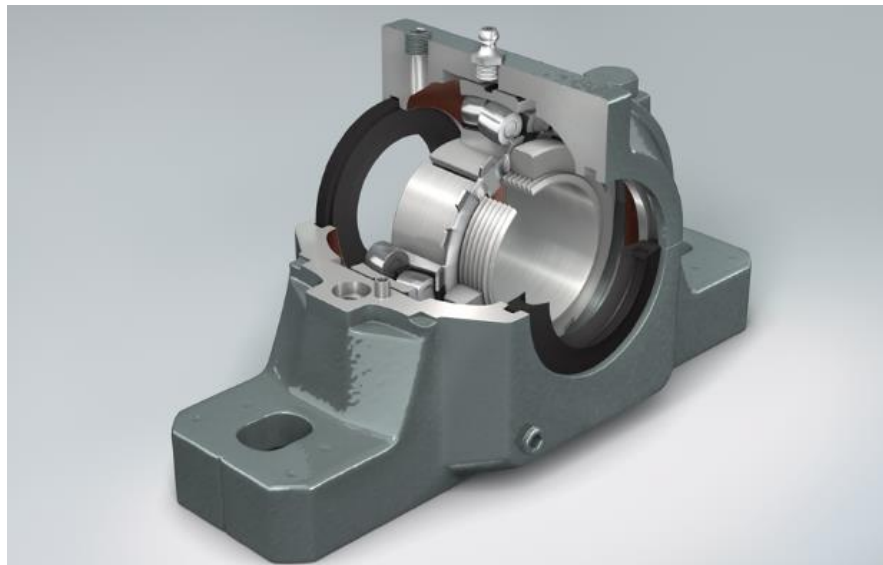
Mancais são peças auxiliares a conjuntos de máquinas, que tem como principal função sustentar um eixo em rotação, mantendo assim o eixo em sua posição original sem deslocamentos tangencial e axial. Sua estrutura é dividida em parte fixa onde a base geralmente é feita de material mais rígido, ferro fundido ou aço geralmente. E nessa base temos um furo por onde passa o eixo, geralmente nesse furo existe outro elemento conhecido o rolamento ou bucha. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

A principal função do mancal é justamente amortecer as vibrações que o conjunto de equipamentos sofre, o funcionamento correto depende do contato suave entre os dispositivos existentes: mancal, eixo, rolamento. Na figura 1 conseguimos analisar um modelo de mancal: (Barilli, Rodrigo Jorge, 2013)



**Figura 12 - Exemplo de mancal.**  
**Fonte: Barilli (2013).**

Para o projeto de um mancal deve-se dimensionar várias características desde tipo de aplicação, tipos de cargas podendo ser cargas cíclicas, tensões, material, manutenção, dentre outras. Existem muitos tipos e fabricantes de mancais no mundo hoje, e já se chegou a modelagens muito complexas e dimensionadas como podemos ver abaixo um modelo de mancal da marca NSK: (ACOPLAST 2020, NSK 2020)



**Figura 13 - mancal NSK**  
**Fonte: NSK (2020)**

O mancal em questão já tem como aplicação transportadores (manuseio de materiais) e ventiladores, sopradores ou exaustores. Tendo como características:



- Equipado com 2 furos de lubrificação e 1 furo de drenagem
- Cantos sólidos na base com locais para fixar pinos guias
- Forma quadrada e marcas de centro
- Fundição de alta qualidade – permite 5 arranjos de vedação diferente

### 2.5.1 TIPOS DE MANCAIS

Existem dois tipos de mancais os de deslizamento (ou de bucha) e os rotativos (ou de rolamento). No mancal de rolamento ele suporta o eixo, fazendo parte da estrutura e assim encaixando o eixo em seu furo. Tendo em sua estrutura dois anéis interpostos por elementos rolantes, existem vários tipos de elementos rolantes dentre os rolamentos comerciais. Já no de deslizamento é a bucha que faz o papel de direcionar o eixo, mas elas normalmente são separadas do eixo por: fluidos lubrificantes, óleos, graxa, grafite dentre outros lubrificantes. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

### 2.5.2 MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Mancais de deslizamentos geralmente são utilizados para máquinas pesadas ou equipamentos de baixa rotação, esse componente sofre um alto índice de atrito sendo assim a velocidade mais baixa não faz com que o elemento sofra tanto. Abaixo podemos ver um exemplo de mancal de deslizamento: (ACOPLAST 2020, NSK 2020)



**Figura 14 - Mancal de deslizamento.**  
**Fonte: Omicrom (2020).**

Os principais tipos de mancais de deslizamento são:

- Mancais Hidrodinâmicos
- Mancais Hidrostáticos
- Mancais Aerostáticos
- Mancais Magnéticos

Os mancais Hidrodinâmicos são fabricados de metal ou cerâmica de alta resistência, e com aplicação em altas cargas axiais, amplamente utilizados na indústria de óleo e gás. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Os mancais Hidrostáticos são fabricados para obterem um alto índice de precisão, sendo assim utilizados para máquinas que precisem de alta precisão. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

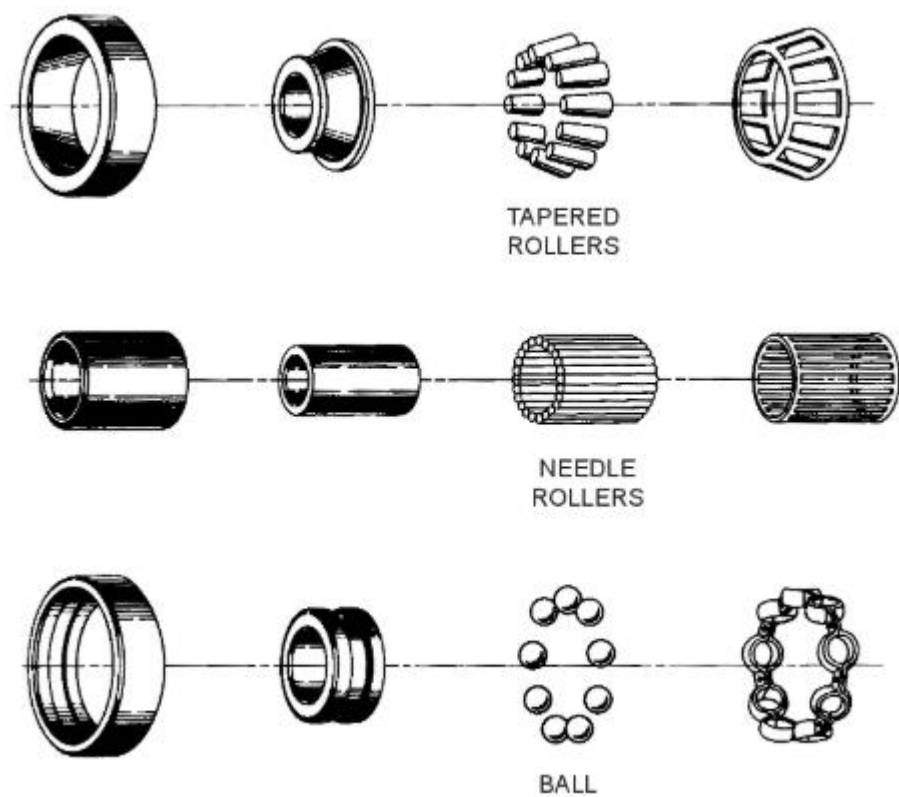
Os Mancais aerostáticos tem esse nome por utilizar ar comprimido como fluido lubrificante, como os Hidrostáticos são usados em equipamentos de alta precisão criando um filme de ar entre 5 a 30 micrômetros. Tendo como característica alto índice de amortecimento a vibrações. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Mancais magnéticos mantem o eixo em suspensão através da força magnética, logo se diferenciando dos demais por não usar nenhum fluido lubrificante. Utiliza de eletroímãs, ímãs permanentes, supercondutores, indução magnética dentre outras. A aplicação desse tipo de mancal ainda é baixa, mas por não ter fluido lubrificante se

considera uma vantagem em relação aos demais, sendo considerado uma tecnologia que será muito utilizada no futuro. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

### 2.5.3 MANCAIS ROTATIVOS OU DE ROLAMENTO

Os mancais rotativos ou de rolamento tem como elementos construtivos: anel interno, anel externo, elementos rolantes, gaiola que posiciona e estabiliza os elementos rolantes. Como vemos na figura 15: (ACOPLAST 2020, NSK 2020)



**Figura 15 - Vista explodida de rolamentos de esferas rolos e agulha.**  
Fonte: Barilli (2013)

Os tipos de mancais rotativos são definidos pelos elementos rolantes que existem:

- Rígido de esferas
- Esferas de contato angular

- Rolos Cilíndricos
- Rolos Cônicos
- Axial de Esferas
- Agulhas
- Autocompensador

Os mancais com rolamento rígido de esferas se caracterizam por ser mais robusto e de baixo atrito. Podem suportar cargas radiais e axiais, sendo utilizado em várias aplicações na engenharia. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Os mancais com rolamentos de esferas de contato angular devido a sua forma construtiva com uma pista ou trilho que se encaixam com os elementos rolantes, fazendo com que as forças axiais e radiais se tornem uma única força em uma direção intermediária. Normalmente são utilizados para aplicações com altas rotações e baixo nível de ruído. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Nos mancais de rolamentos de rolos cilíndrico devido a sua característica dos elementos rolantes ele suporta altas cargas de impacto da direção radial. É utilizado em aplicações com altas velocidades de rotação, o que contempla uma gama muito grande na engenharia também sendo amplamente utilizado. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Para os mancais de rolamento de rolos cônicos também como os de rolos cilíndricos suportam altas cargas de impacto, porém devido ao seu formato cônico ele suporta cargas axiais e radiais. Mesma aplicação dos mancais de rolamentos de rolos cilíndricos. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Os mancais de rolamento axial de esferas têm sua forma construtiva uma gaiola que acomoda as esferas, sendo assim comprimindo os elementos rolantes. Isso gera maior robustez e capacidade de suportar altas cargas. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Nos mancais com rolamentos de agulha são utilizados para cargas muito elevadas e rotações baixas, como por exemplo máquinas utilizadas em construção civil ou caminhões de carga guindastes entre outros. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

Já os mancais com rolamentos autocompensadores têm como vantagem esse compensamento devido ao anel externo ter uma curvatura, assim ajudando no alinhamento do eixo. Tendo essa vantagem por conta de erros de montagem serem corrigidos pelo próprio rolamento. (ACOPLAST 2020, NSK 2020)

## 2.6 NORMA ISO 10816

Segundo a norma ISO 10816 é um documento básico que estabelece diretrizes gerais para a medição e avaliação de vibrações mecânicas de máquinas, conforme medidas nas partes não rotativas (e, quando aplicável, não-recíprocas) de máquinas completas, como caixas de rolamentos por exemplo. Recomendações para medições e critérios de avaliação referentes a tipos específicos de máquinas são fornecidas em Partes adicionais da ISO 10816.

A ISO 10816 consiste nas seguintes partes, sob o título geral Vibração mecânica - Avaliação da vibração da máquina por medições em peças não rotativas:

- Parte 1: Diretrizes gerais
- Parte 2: Grandes grupos geradores de turbinas a vapor terrestres com mais de 50 MW
- Parte 3: Máquinas industriais com potência nominal superior a 15 kW e velocidades nominais entre 120 r / min e 15000 r / min quando medidas
- Parte 4: Conjuntos acionados por turbinas a gás, excluindo derivados de aeronaves
- Parte 5: Conjuntos de máquinas em usinas hidráulicas de geração e bombeamento

As medições de vibração podem ser usadas para vários propósitos, incluindo monitoramento operacional de rotina, testes de aceitação e investigações diagnósticas e analíticas. Esta parte da ISO 10816 foi projetada

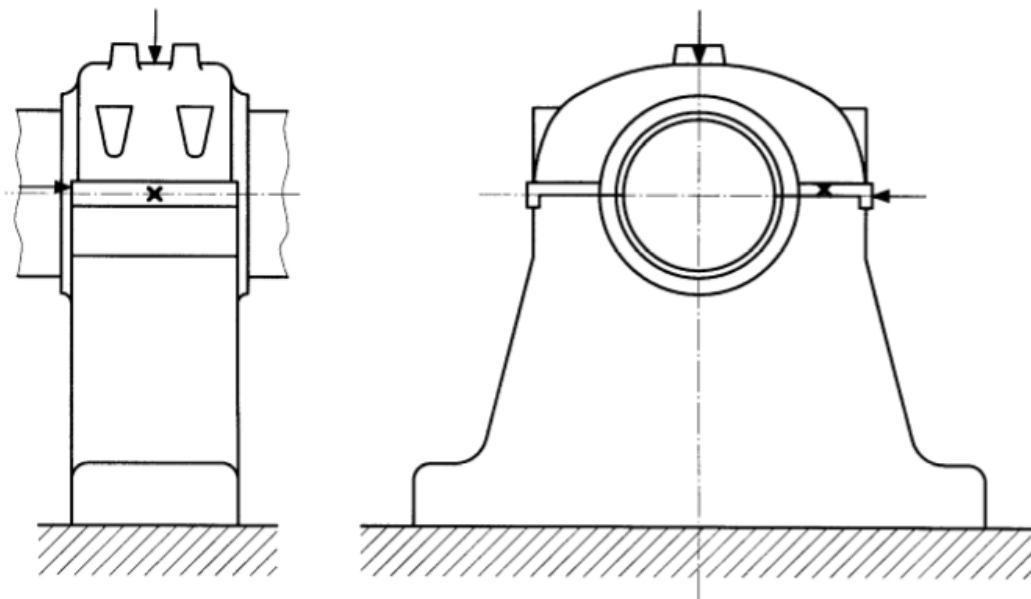
para fornecer diretrizes apenas para testes operacionais de monitoramento e aceitação.

Três parâmetros principais de medição (deslocamento, velocidade e aceleração) são definidos e suas limitações são dadas. A adesão às diretrizes apresentadas deve, na maioria dos casos, garantir um desempenho de serviço satisfatório.

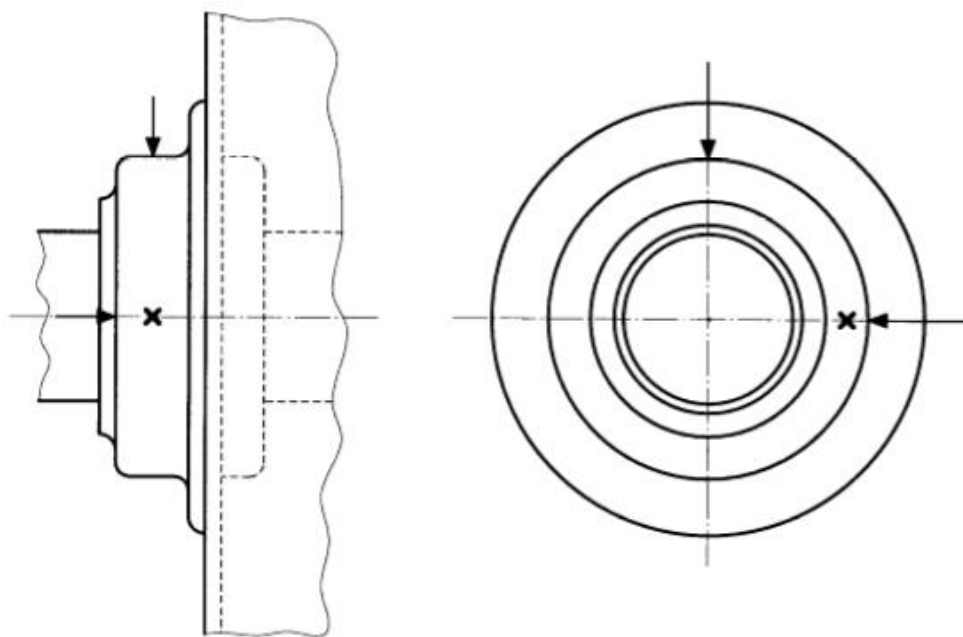
A parte 1 dessa norma tem como característica principal demonstrar os seguintes pontos:

- Posição de medição
- Sistema de medição
- Critérios de análise
- Alarmes

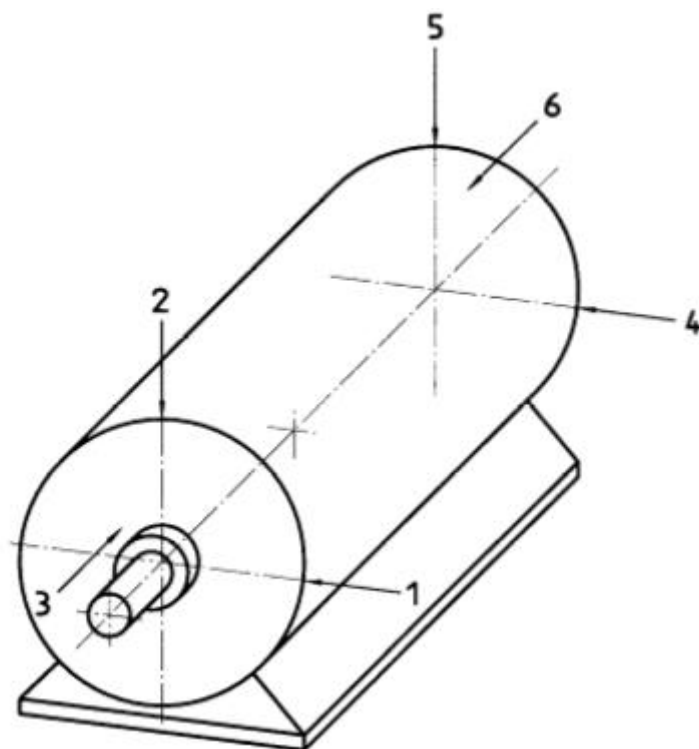
Com relação ao posicionamento deve-se utilizar uma padronização de posicionamentos, realizando testes de aceitação em máquinas e equipamentos realizando medições tanto na posição radial como na axial. Segundo a norma deve-se utilizar essa padronização para máquinas similares. Nas figuras 16 a 20 vemos os posicionamentos adequados para realizar as medições de vibrações:



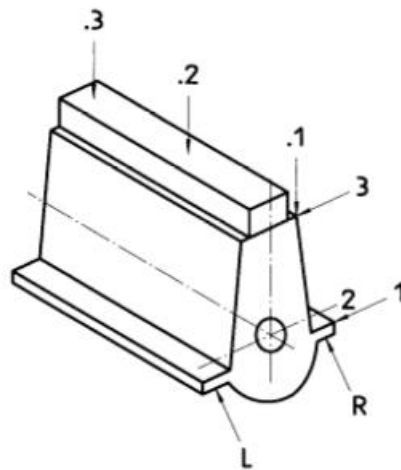
**Figura 16 - Pontos de medição para mancal de rolamento.**  
**Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).**



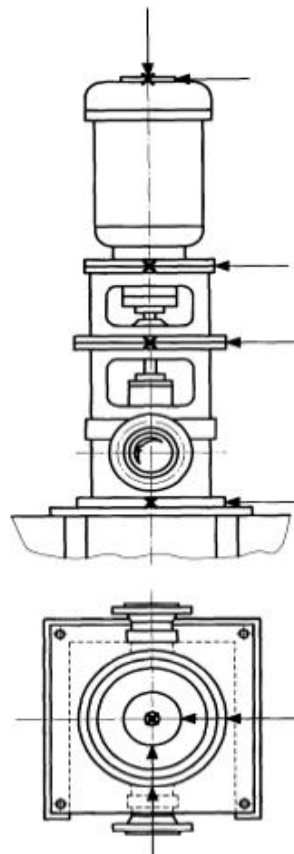
**Figura 17 - Pontos de medição para rolamentos tipo carcaça.**  
Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).



**Figura 18 - Pontos de medição para pequenas máquinas elétricas.**  
Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).



**Figura 19 - Pontos de medição para motores alternativos.**  
**Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).**



**Figura 20 - Pontos de medição para conjuntos de máquinas verticais.**  
**Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).**

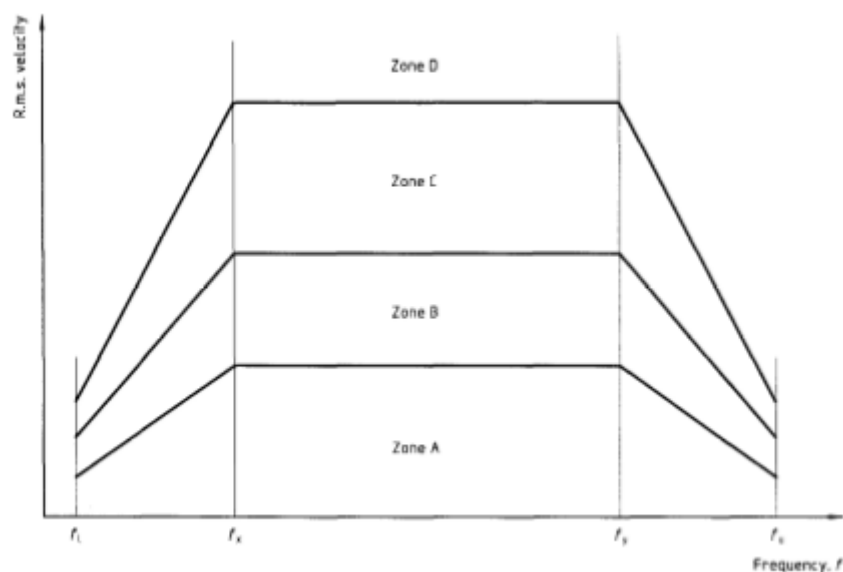
Os posicionamentos são importantes pois através dessa padronização de máquinas e equipamentos a análise de vibração pode se tornar mais prática e menos



complexa. Padronizando assim os equipamentos pode-se utilizar valores conhecidos e estimar possíveis falhas que podem ocorrer.

Já para o sistema de medição, ele deve poder medir a vibração dentro da resolução adequada para cada equipamento. Normalmente é padronizado em  $\mu\text{m}$ , e aparelhos comumente utilizados são: transdutores indutivos, acelerômetros, triggers, analisadores de vibração. Esses equipamentos devem seguir o seguinte critério: deslocamento da vibração (medido em  $\mu\text{m}$ ); velocidade de vibração (medido em  $\text{mm/s}$ ); aceleração da vibração (medida em  $\text{m/s}^2$ ).

Os critérios de análise de vibração se distinguem em 2 critérios, critério 1: magnitude da vibração e critério 2: alteração da magnitude da vibração. O primeiro critério diz respeito a definições de limites para a magnitude absoluta da vibração com cargas dinâmicas aceitáveis nos mancais e transmissão de vibração, com isso é realizado testes nesse equipamento para que esses valores de magnitudes sejam definidos.



**Gráfico 1 - Forma geral dos critérios de aceitação da velocidade de vibração.**  
**Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).**

A figura mostra 4 zonas onde a zona A mostra magnitudes de equipamentos que acabaram de ser instalados, e em ótimas condições. Na zona B já é equipamentos com um tempo de vida, onde o equipamento funciona, mas não de maneira contínua. Nas zonas C e D, que são as de mais risco onde o equipamento na zona C deve se ligar um alerta pois ele está começando a apresentar um defeito

e na zona D o equipamento está em grande risco. Baseado nesse gráfico são definidas as magnitudes aceitáveis do equipamento de acordo com o critério 1.

O critério 2 já tem como objetivo modificar o valor da magnitude da vibração pois ele normalmente trata de equipamentos com cargas cíclicas, e assim podendo modificar o comportamento das magnitudes. Com isso mesmo o equipamento mesmo na zona B e C já deve acionar um Alarme pois o equipamento pode entrar em colapso mais rapidamente.

A tabela abaixo define o valor utilizado de alarmes para classes distintas de equipamentos e também associadas as zonas apresentadas no gráfico 1.

**Tabela 3 - Limites utilizados para definir um Alarme.**

**Table B.1 — Typical zone boundary limits**

R.m.s. vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	B	B
4,5				
7,1	D	D	C	C
11,2				
18			D	
28				
45				

**Fonte: ISO 10816 Parte 1 (1995).**

As classes representam as seguintes características:

- Classe 1: Partes individuais de motores e máquinas, conectadas de maneira integrada à máquina completa em sua condição de operação normal. (Os motores elétricos de produção de até 15 KW são exemplos típicos de máquinas nesta categoria.)

- Classe 2: Máquinas de tamanho médio (normalmente motores elétricos com saída de 15 kW a 75 kW) sem fundações especiais, motores ou máquinas de montagem rígida (até 300 kW) em fundações especiais.
- Classe 3: Motores principais de grande porte e outras grandes máquinas com massas rotativas montadas em fundações rígidas e pesadas, que são relativamente rígidas na direção das medições de vibração.
- Classe 4: Motores principais de grande porte e outras grandes máquinas com massas rotativas montadas em fundações relativamente suaves na direção das medições de vibração (por exemplo, conjuntos de turbogeradores e turbinas a gás com saídas superiores a 10 MW).

Por fim a norma define a partir desse critério os Alarmes, critério através de testes que fornecem a magnitude máxima que o equipamento suporta antes de apresentar uma falha. Com isso são programados os alarmes para que quando isso ocorra o operador do equipamento já veja e possa tomar iniciativas. Na figura 21 vemos um alarme da Hidroelétrica Salto Jauru:

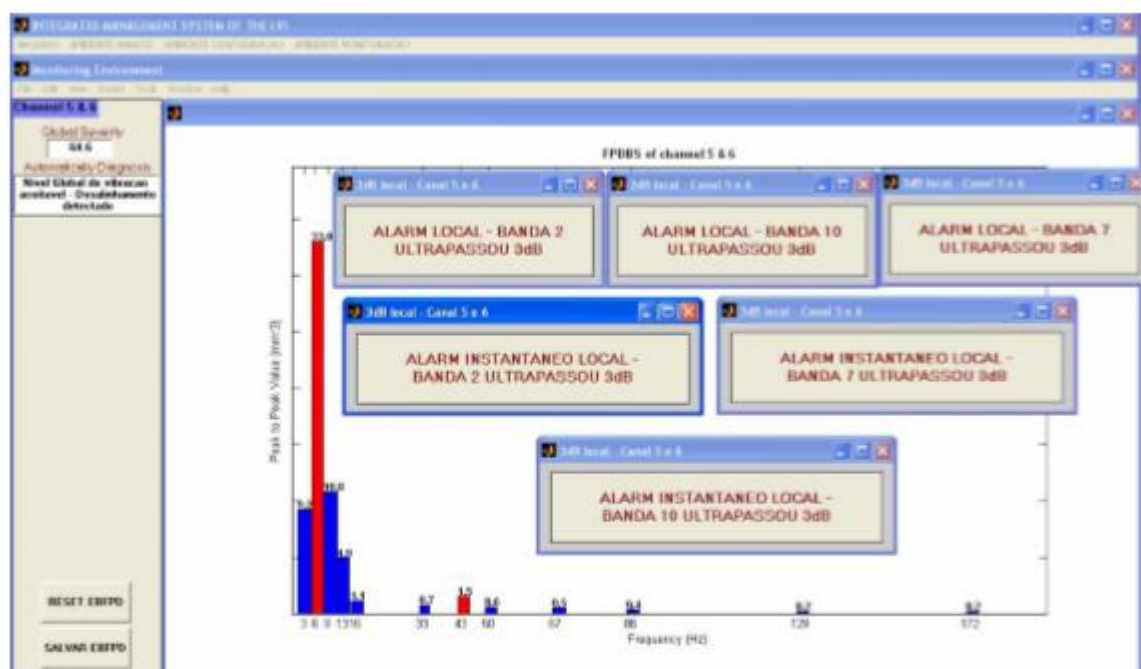


Figura 21 - Alarmes acionados com irregularidades.  
Fonte: Almeida (2008)

### 3. METODOLOGIA

O aparelho de medição Fluke 810, será utilizado para realizar 4 medições com diferenças de frequências em dois pontos do mancal.

A bomba utilizada analisada era do tipo centrífuga com rolamentos de esfera e vazão de 5 m<sup>3</sup>/h, com motor acoplado Weg de 75 CV de potência. É uma bomba de bancada didática utilizada em aulas do curso de engenharia mecânica.



**Figura 22 - Bomba de bancada**  
**Fonte: Aatoria Própria**

Essas medições simulam a máquina em diferentes comportamentos, onde no início ele se encontra com uma carga bem pequena e logo depois essa carga aumenta de forma gradativa que são as demais medidas.

**Tabela 4 - Descrição das medidas realizadas**

<b>Descrição</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>RPM</b>
Medição 1	30	1764
Medição 2	40	2340
Medição 3	50	2904
Medição 4	60	3456

**Fonte: Autoria Própria**

Com o tacômetro foi realizado a aferição da rotação. Essa metodologia se repetiu para os dois pontos onde fica localizado o mancal.

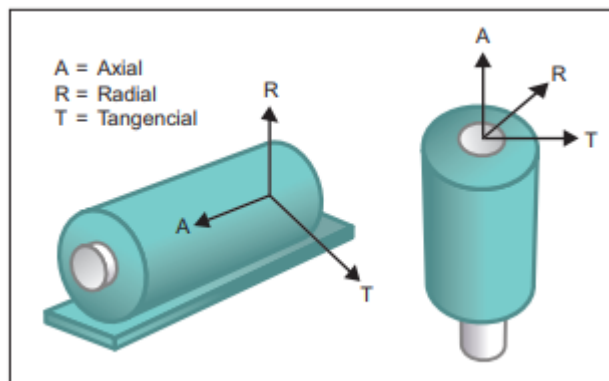


**Figura 23 - Primeira posição de medição**  
**Fonte: Autoria Própria**

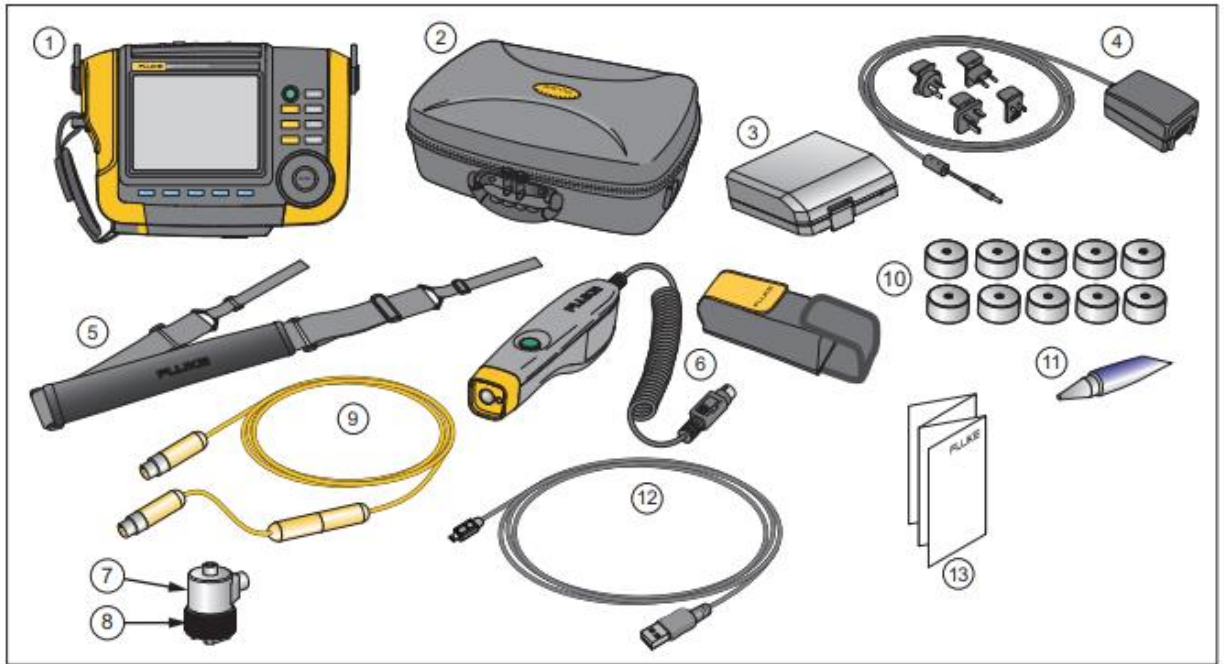


**Figura 24 - Segunda posição de medição**  
**Fonte: Autoria Própria**

O aparelho realizou as medições que serão discutidas nos próximos tópicos. Segundo a norma citada anteriormente deve se realizar as medições tanto radialmente como axialmente. Levando isso em consideração a medição realizada pelo sensor do aparelho Fluke 810 é triaxial:



**Figura 25 - Sensor triaxial**  
**Fonte: Fluke (2020)**



**Figura 26 - Itens Fluke 810**  
**Fonte: Fluke (2020)**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a medição com o equipamento foram gerados gráficos e resultados através do medidor Fluke 810. Dentro da configuração do aparelho foi configurado o LOCAL 3 como o primeiro o mancal, e Local 4 como o segundo mancal respectivamente como mostra as imagens 23 e 24. Os gráficos foram gerados em faixa alta e faixa baixa, e nos eixos axial, radial e tangencial.

Foi realizada a medição em duas faixas de frequência, alta e baixa. Uma pega globalmente a alta e outra mais localmente. Os resultados apresentam as duas faixas e no eixo x temos Hz, e no eixo y temos mm/s.

### 4.1 LOCAL 3

Para cada um dos locais foi realizado 4 medições modificando a frequência e RPM da bomba. E como para cada medição é gerado 3 gráficos para os eixos axial, radial e tangencial, o total de gráficos por mancal é 24.

Para a frequência de 30 Hz se configurou o equipamento de acordo com a tabela 5:



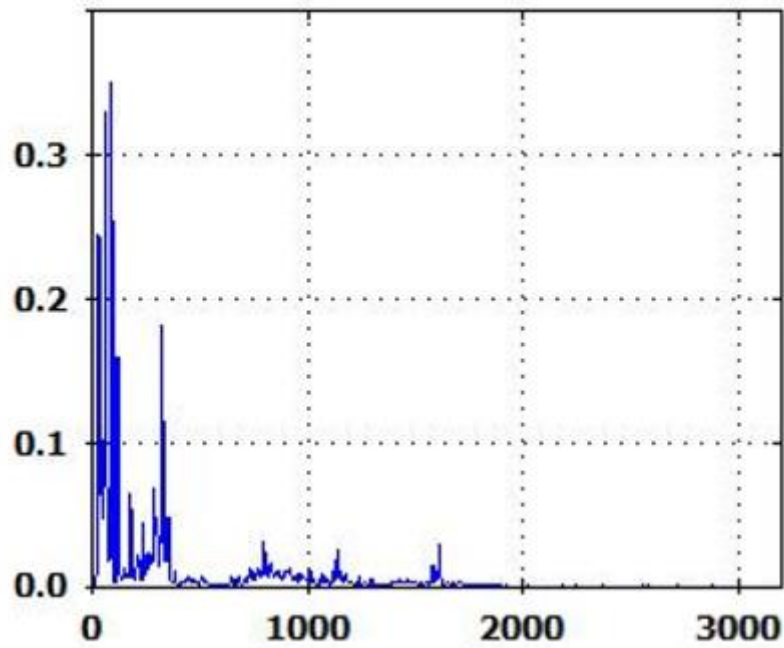
**Tabela 5 - Parâmetros de medição para 30 Hz**

Detalhes da configuração da máquina

Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	1764.25
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

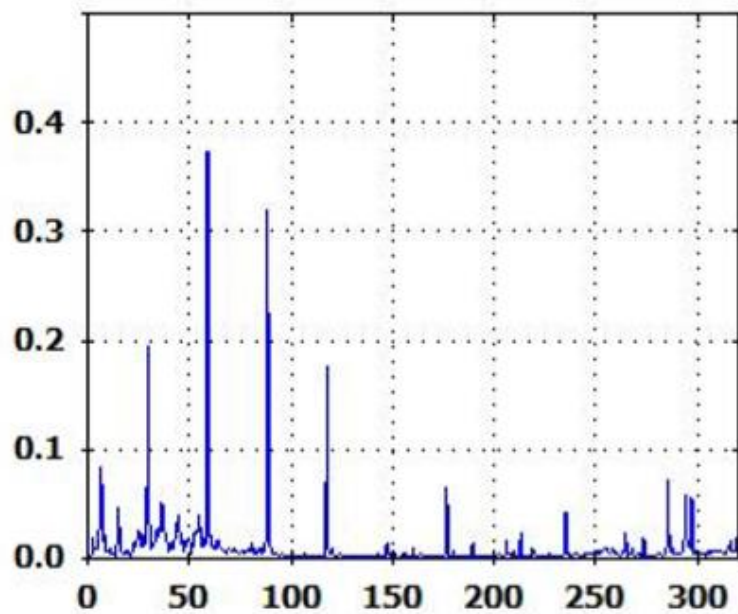
**Fonte: Autoria Própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,35 e 0,33 e o restante dos picos ficou entre 0,1 e 0,01 como mostra o gráfico 2.



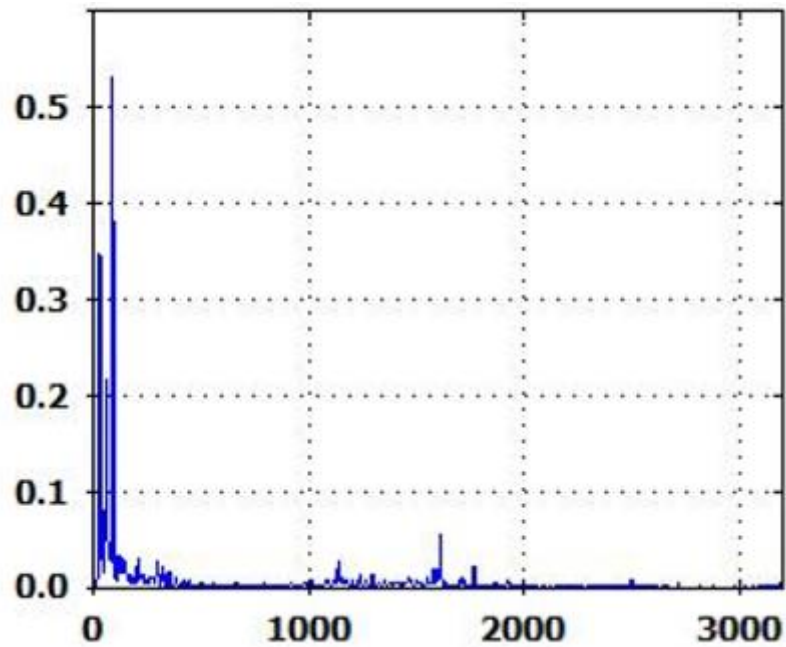
**Gráfico 2 - Local 3 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,35 mm/s e 0,33 mm/s e o restante dos picos ficou entre 0,1 mm/s e 0,05 mm/s como mostra o gráfico 3.



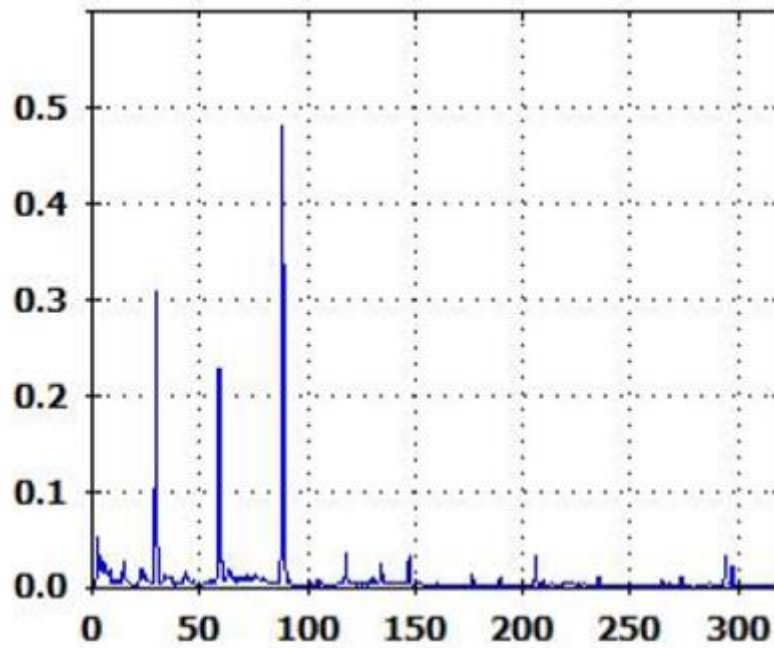
**Gráfico 3 - Local 3 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,5 mm/s e 0,35 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 4.



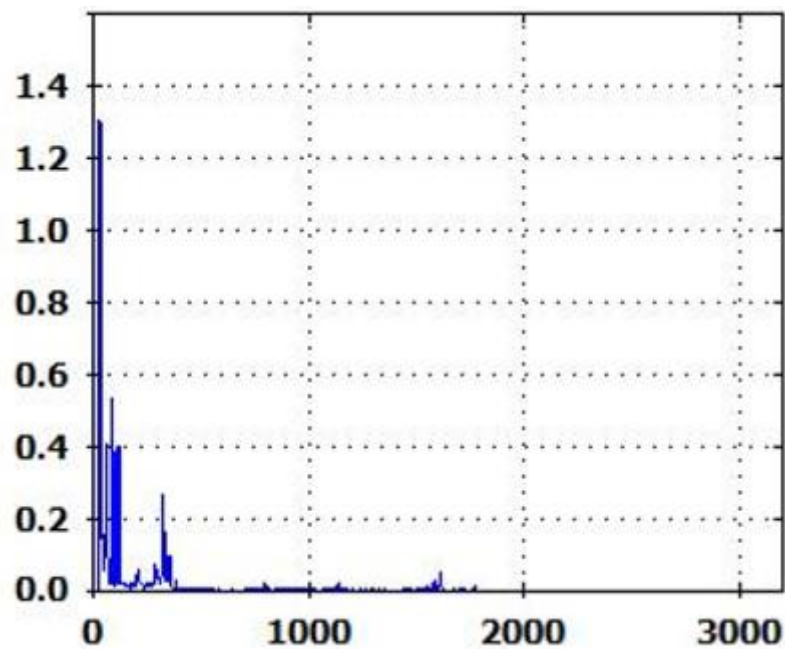
**Gráfico 4 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,48 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 5.



**Gráfico 5 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,3 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 6.



**Gráfico 6 - Local 3 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,20 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 7.

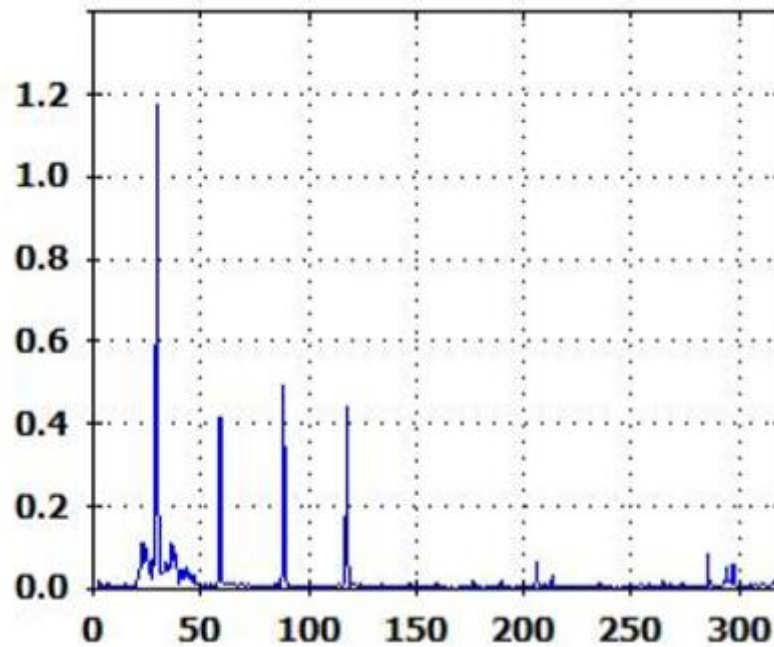


Gráfico 7 - Local 3 faixa baixa no eixo radial

Para a frequência de 40 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 6:

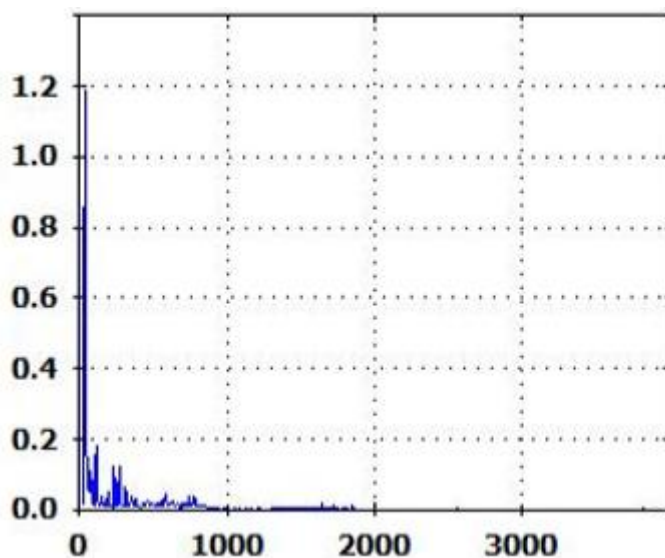
**Tabela 6 - Parâmetros de medição para 40 Hz**

Detalhes da configuração da máquina

Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	2343.67
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

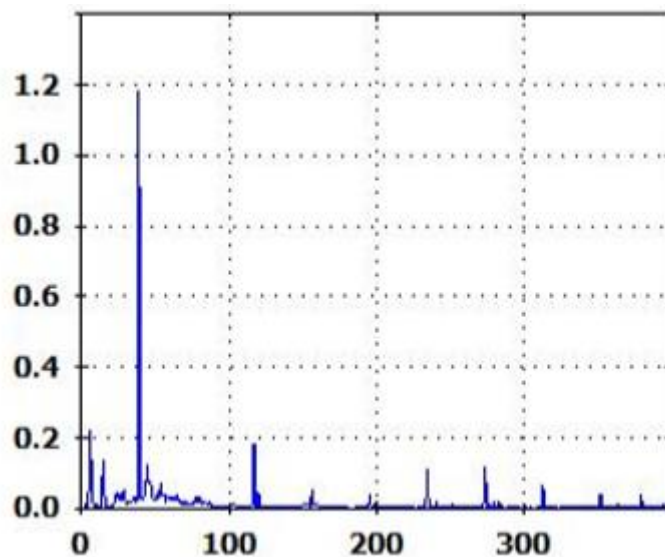
**Fonte: Autoria própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,20 mm/s e 0,80 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo 0,20 mm/s como mostra o gráfico 8.



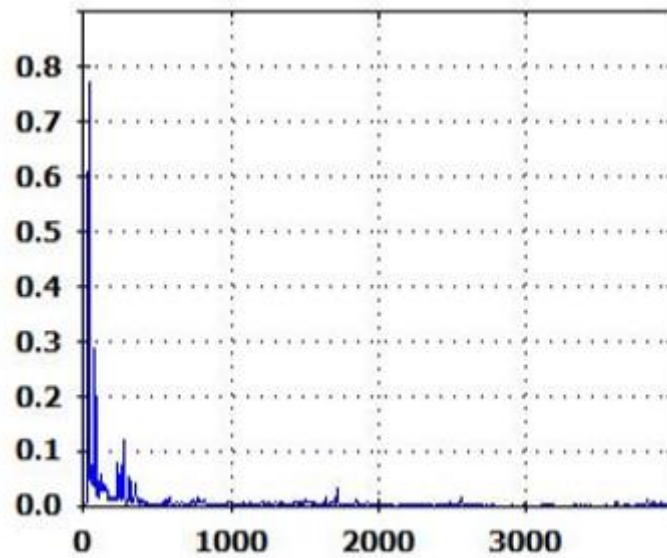
**Gráfico 8 - Local 3 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,20 mm/s e 0,90 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,20 mm/s como mostra o gráfico 9.



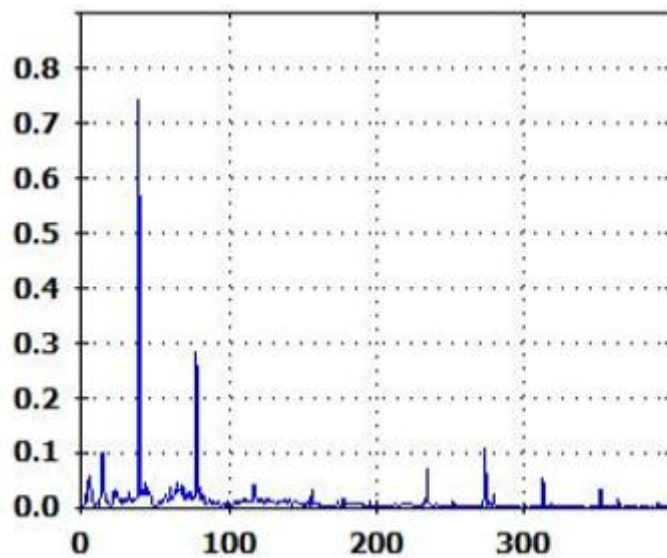
**Gráfico 9 - Local 3 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,75 mm/s e 0,60 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 10.



**Gráfico 10 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial**

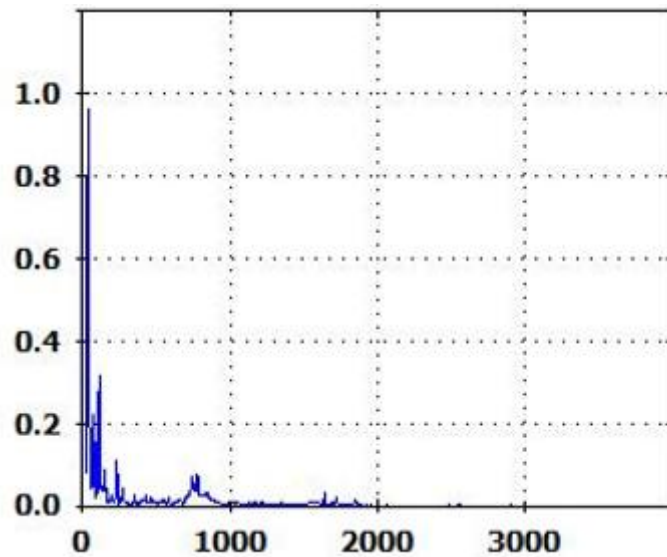
Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,75 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 11.



**Gráfico 11 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial**

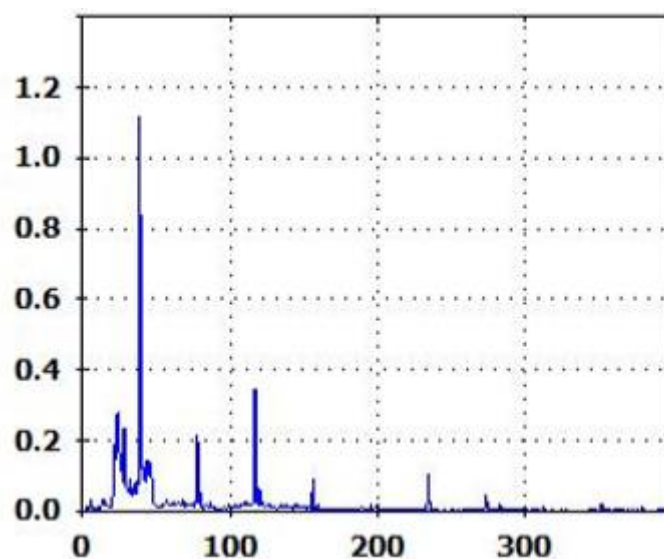


Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,00 mm/s e 0,80 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 12.



**Gráfico 12 - Local 3 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,10 mm/s e 0,40 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 13.



**Gráfico 13 - Local 3 faixa baixa no eixo radial**

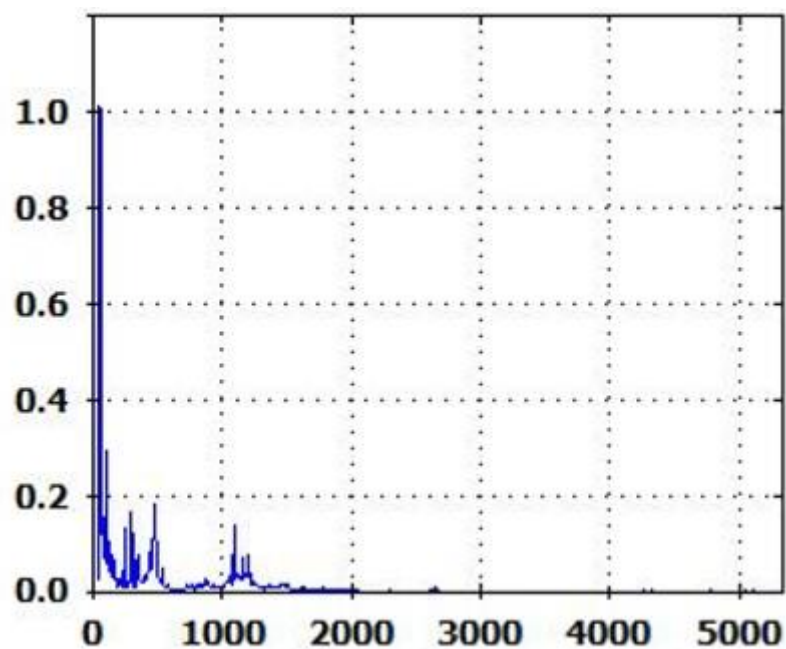
Para a frequência de 50 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 7:

**Tabela 7 - Parâmetros de medição para 50 Hz**

Detalhes da configuração da máquina	
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	2907.33
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrifugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

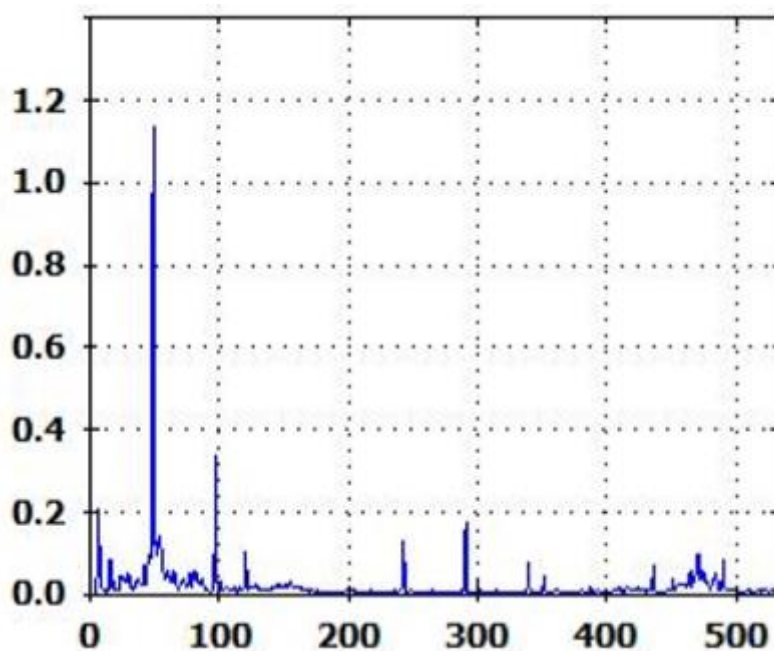
**Fonte: Autoria própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,00 mm/s e 0,20 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo 0,20 mm/s como mostra o gráfico 14.



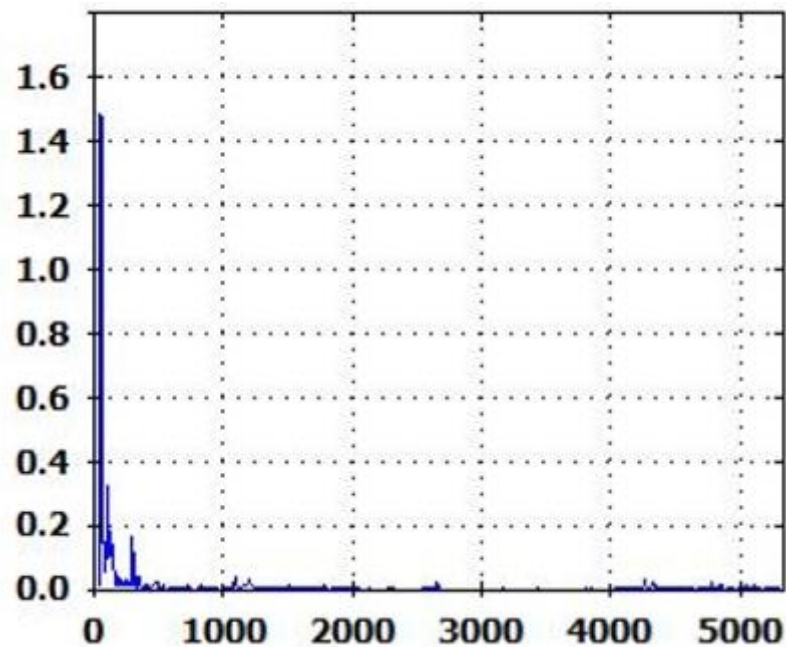
**Gráfico 14 - Local 3 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,10 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,20 mm/s como mostra o gráfico 15.



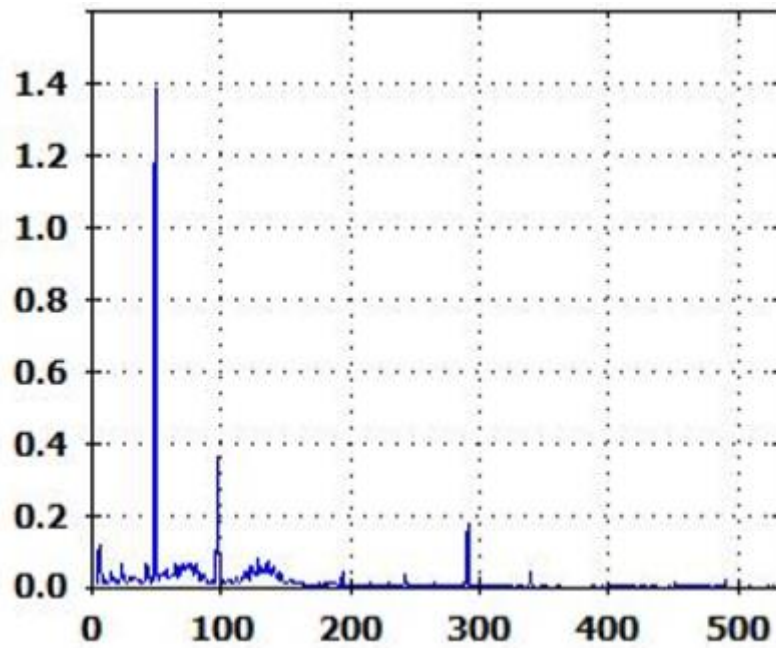
**Gráfico 15 - Local 3 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,50 mm/s e 0,40 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 16.



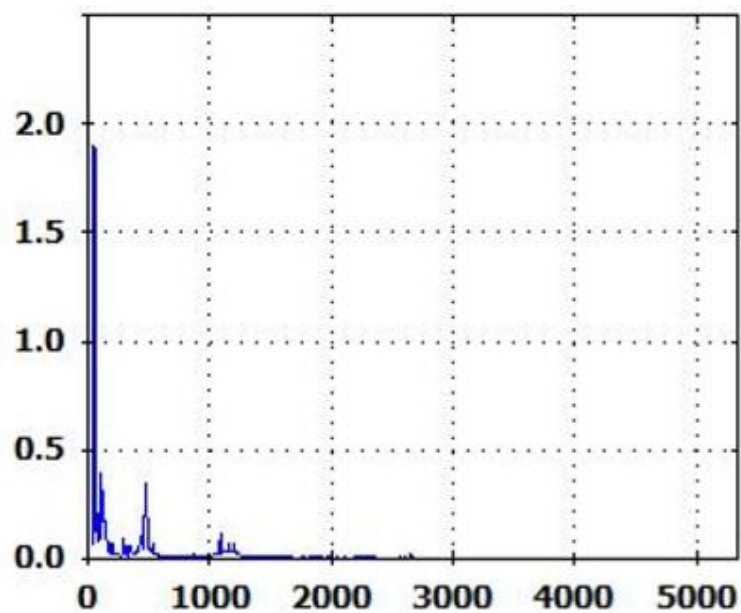
**Gráfico 16 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,40 mm/s e 0,40 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 17.



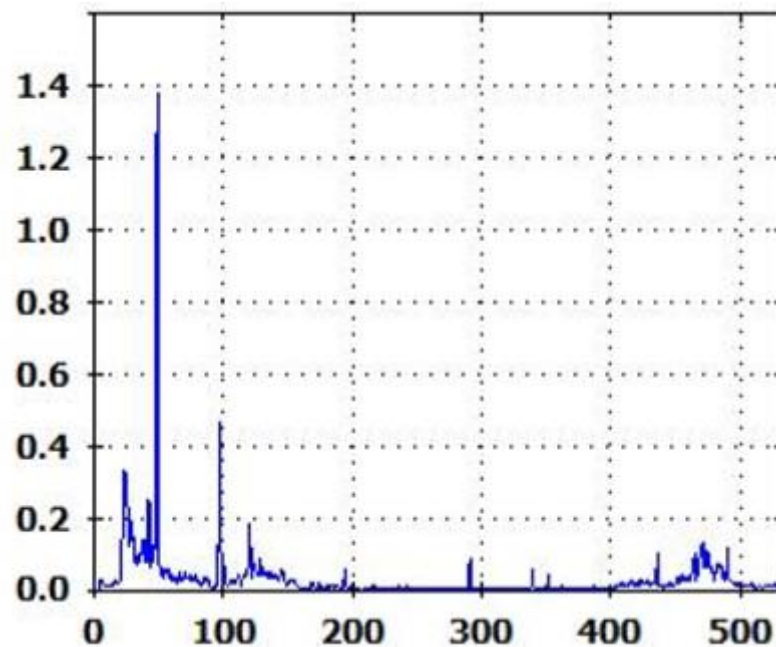
**Gráfico 17 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,90 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 18.



**Gráfico 18 - Local 3 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,40 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,4 mm/s como mostra o gráfico 19.



**Gráfico 19 - Local 3 faixa baixa no eixo radial**

Para a frequência de 60 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 8:

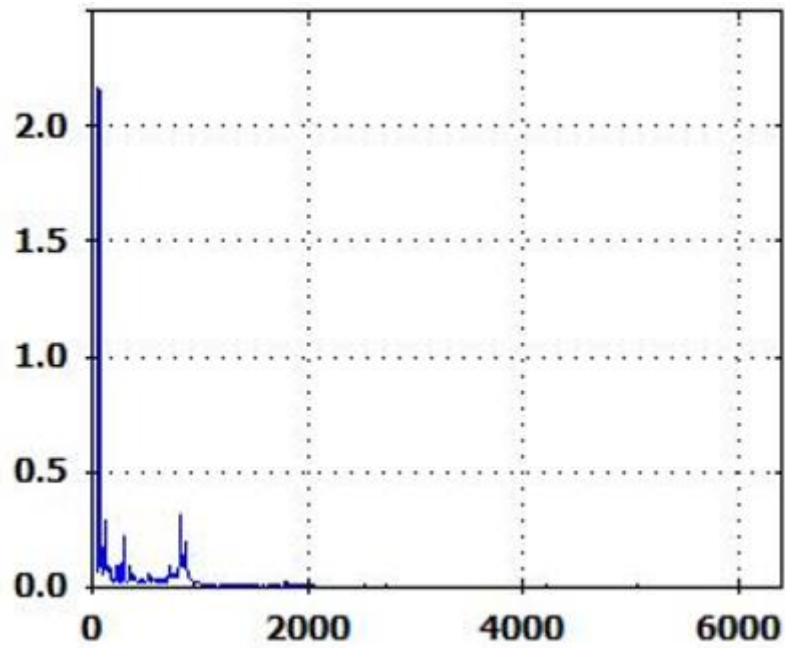
**Tabela 8 - Parâmetros de medição para 60 Hz**

Detalhes da configuração da máquina

Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	3459.5
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

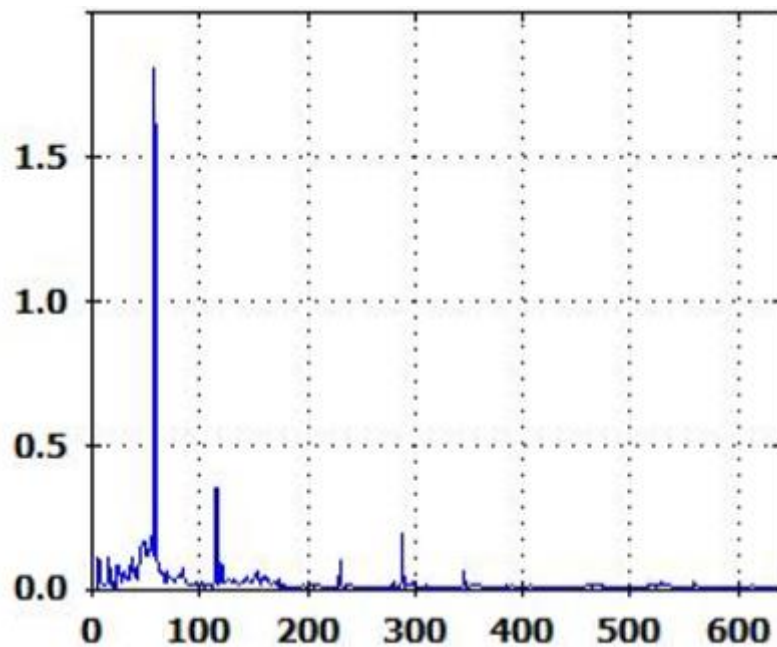
**Fonte: Autoria própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,00 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo 0,50 mm/s como mostra o gráfico 20.



**Gráfico 20 - Local 3 faixa alta no eixo axial**

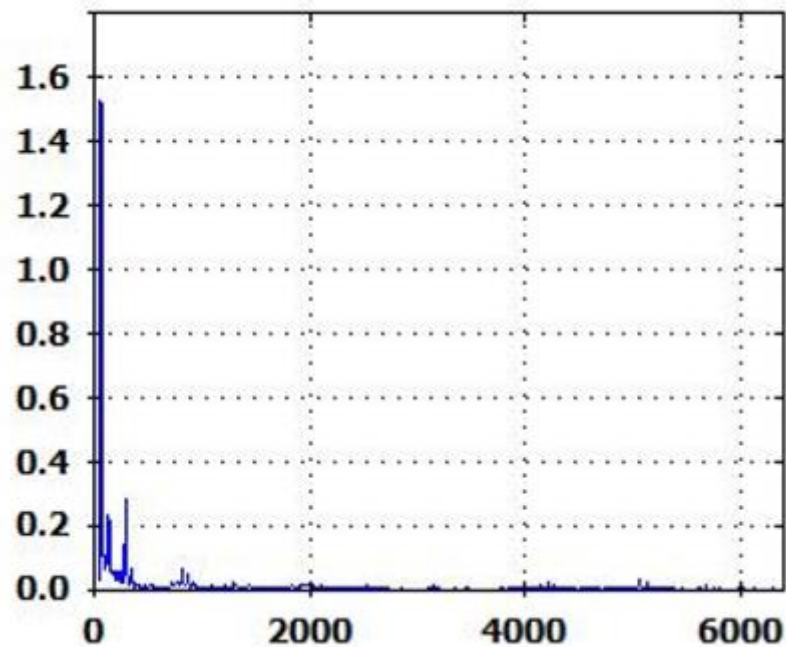
Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,70 mm/s e 0,40 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,50 mm/s como mostra o gráfico 21.



**Gráfico 21 - Local 3 faixa baixa no eixo axial**

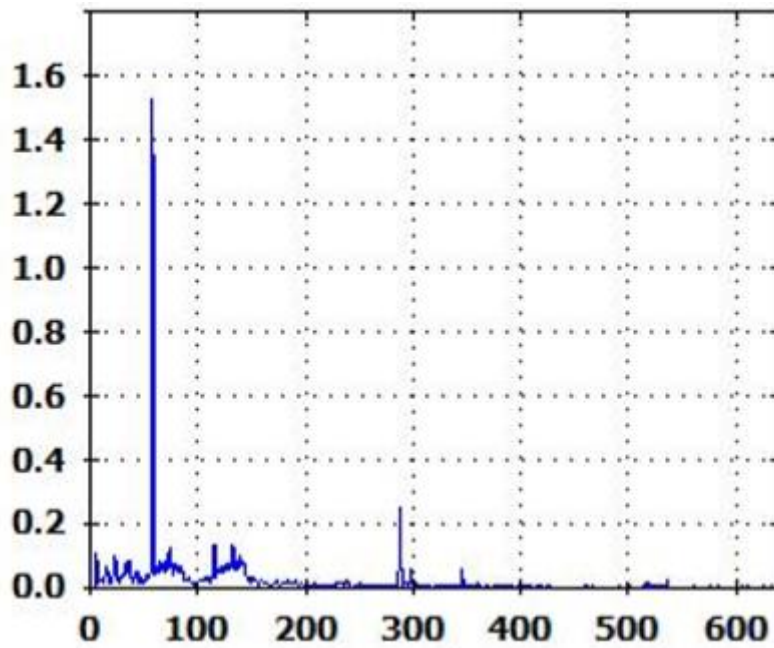


Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,50 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 22.



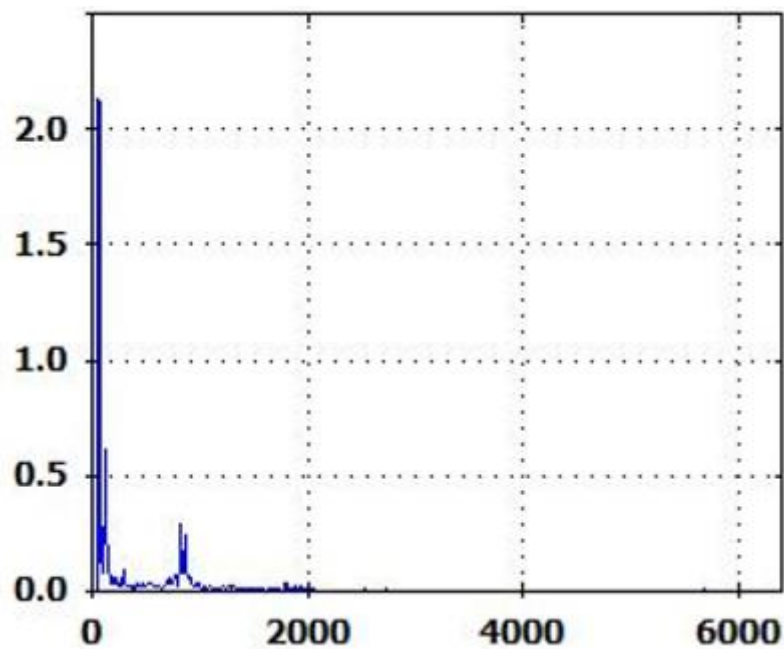
**Gráfico 22 - Local 3 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,50 mm/s e 0,20 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 23.



**Gráfico 23 - Local 3 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,10 mm/s e 0,60 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 24.



**Gráfico 24 - Local 3 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,20 mm/s e 0,60 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 25.

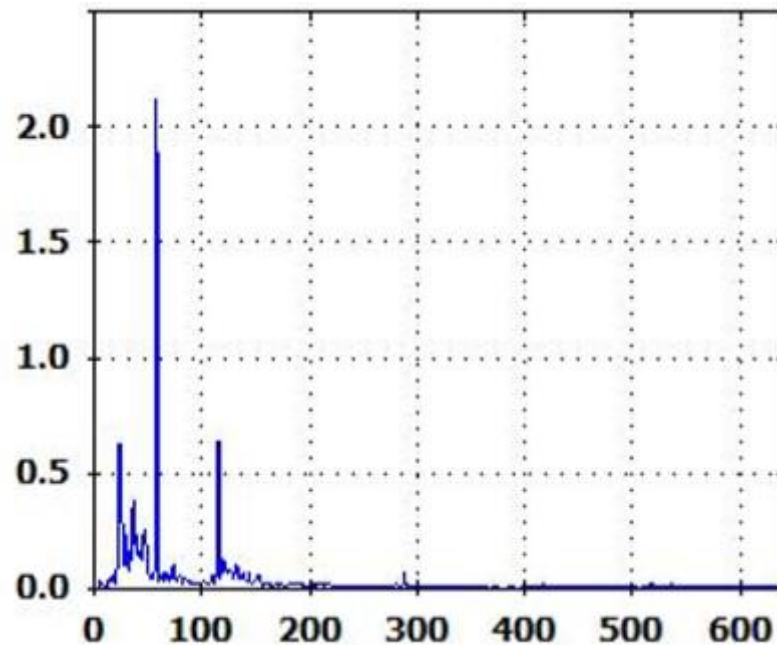


Gráfico 25 - Local 3 faixa baixa no eixo radial

#### 4.2 LOCAL 4

Para cada um dos locais foi realizado 4 medições modificando a frequência e RPM da bomba. E como para cada medição é gerado 3 gráficos para os eixos axial, radial e tangencial, o total de gráficos por mancal é 24.

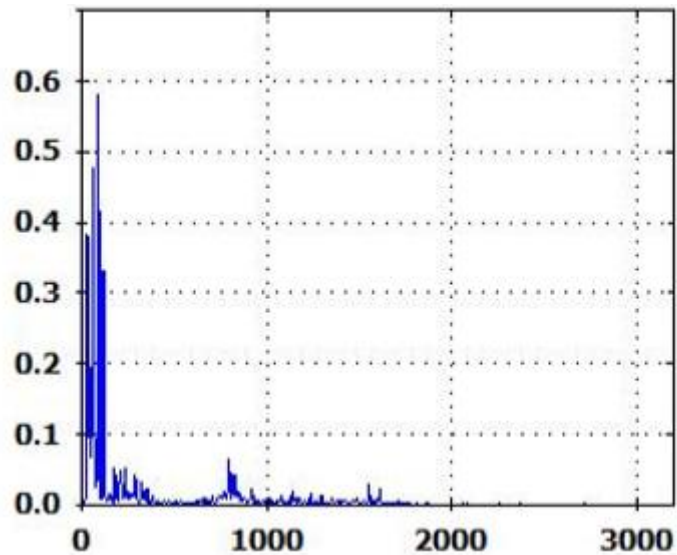
Para a frequência de 30 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 9:

**Tabela 9 - Parâmetros de medição para 30 Hz**

Detalhes da configuração da máquina	
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	1764,25
kW nominal	2,2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

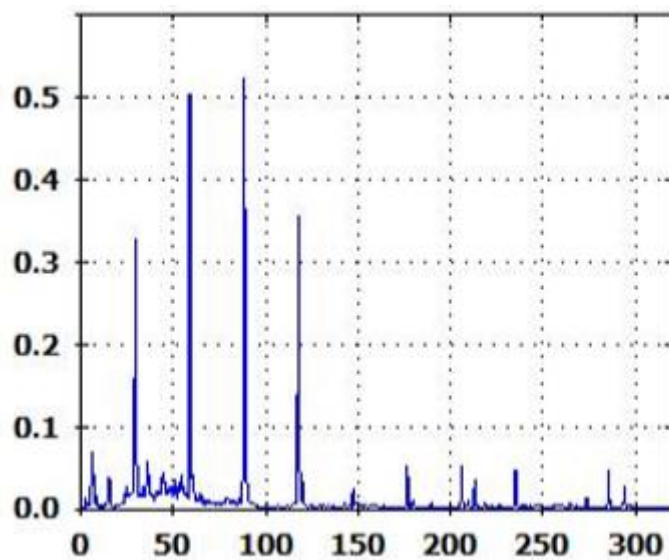
**Fonte: Autoria própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,60 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 26.



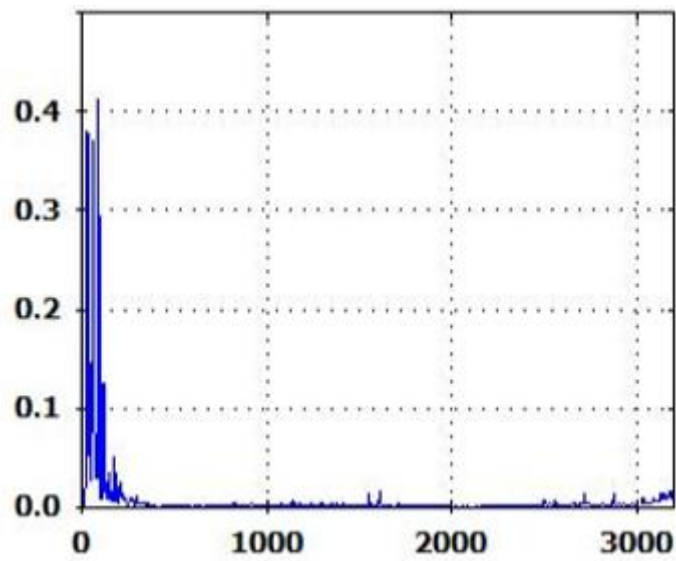
**Gráfico 26 - Local 4 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,50 mm/s e 0,35 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 27.



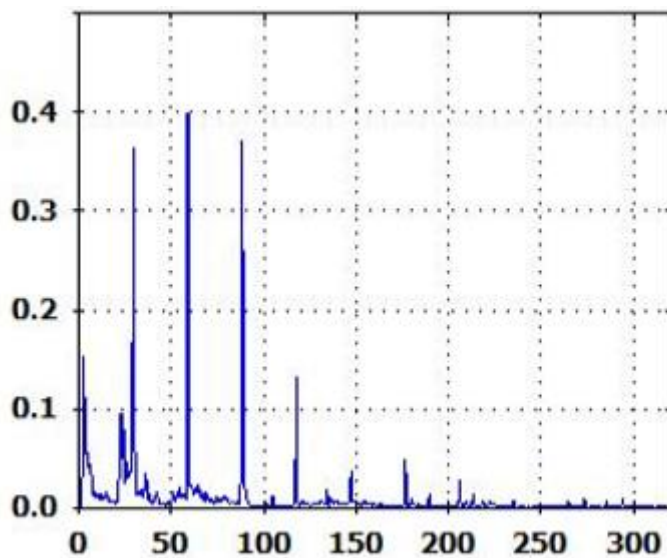
**Gráfico 27 - Local 4 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,40 mm/s e 0,35 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 28.



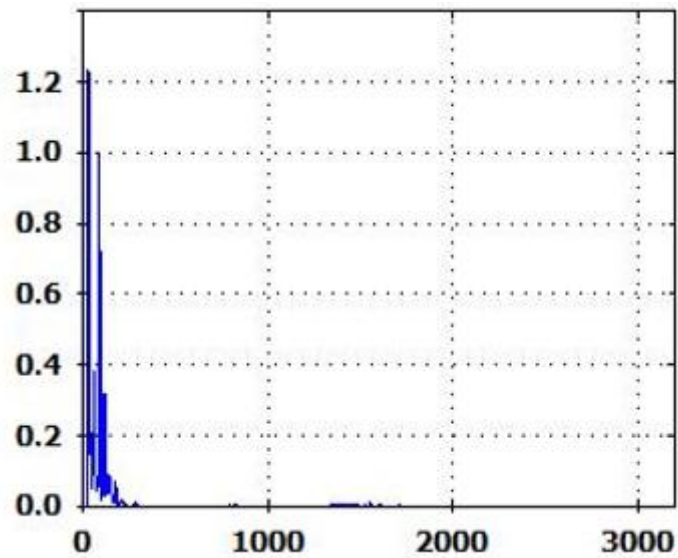
**Gráfico 28 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,40 mm/s e 0,38 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 29.



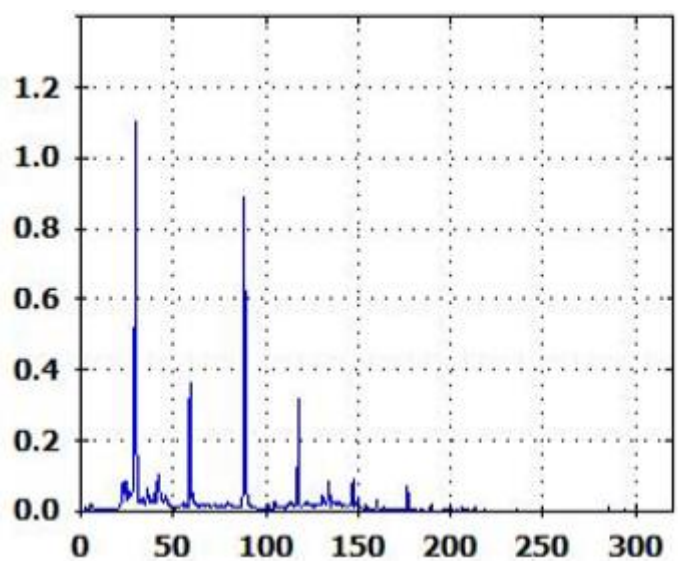
**Gráfico 29 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,20 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 30.



**Gráfico 30 - Local 4 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,10 mm/s e 0,90 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 31.



**Gráfico 31 - Local 4 faixa baixa no eixo radial**

Para a frequência de 40 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 10:

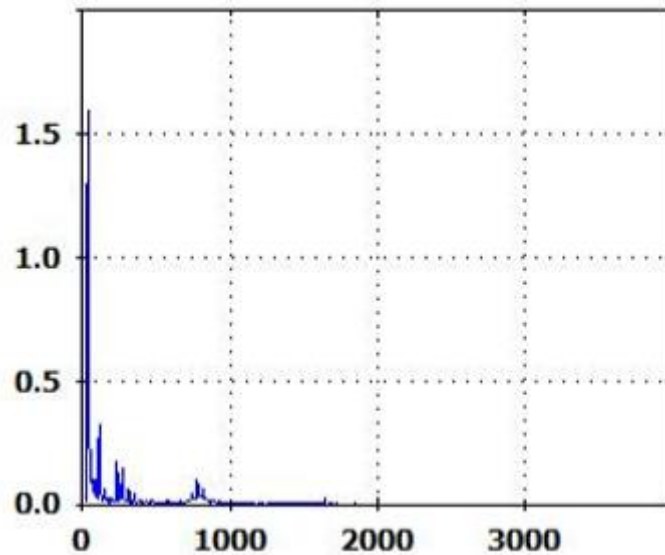
**Tabela 10 - Parâmetros de medição para 40 Hz**

Detalhes da configuração da máquina	
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	2343.67
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

**Fonte: Autoria própria**

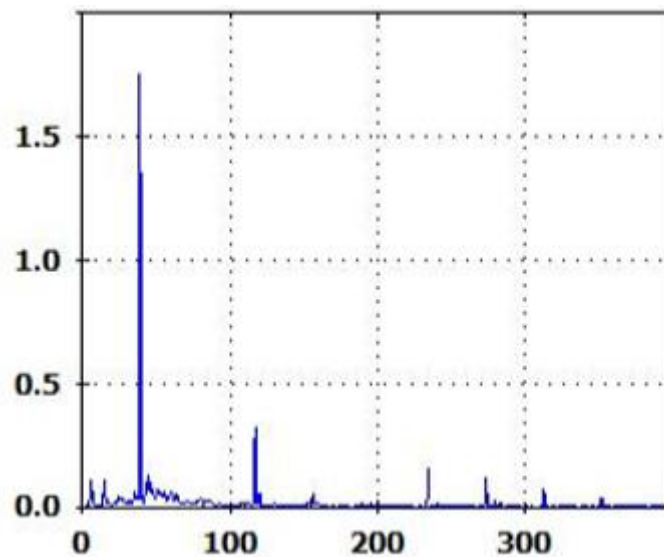
Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,50 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 32.





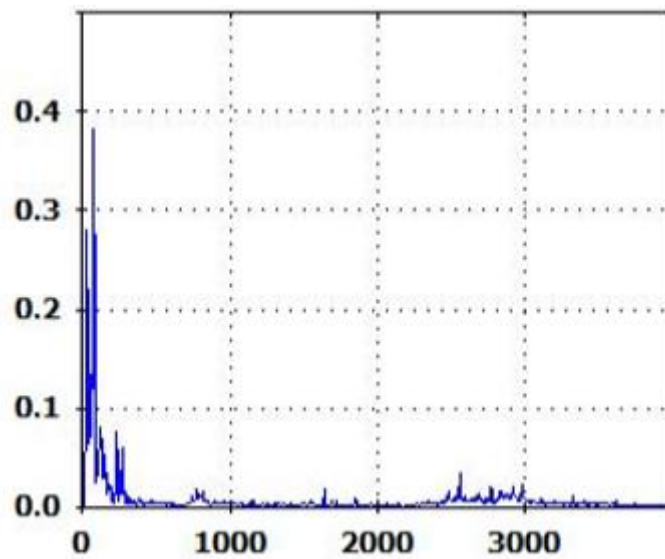
**Gráfico 32 - Local 4 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,70 mm/s e 0,40 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,4 mm/s como mostra o gráfico 33.



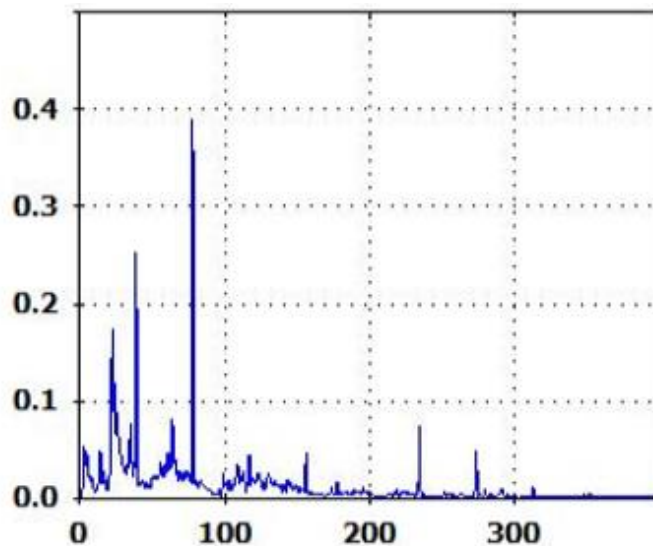
**Gráfico 33 - Local 4 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,40 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 34.



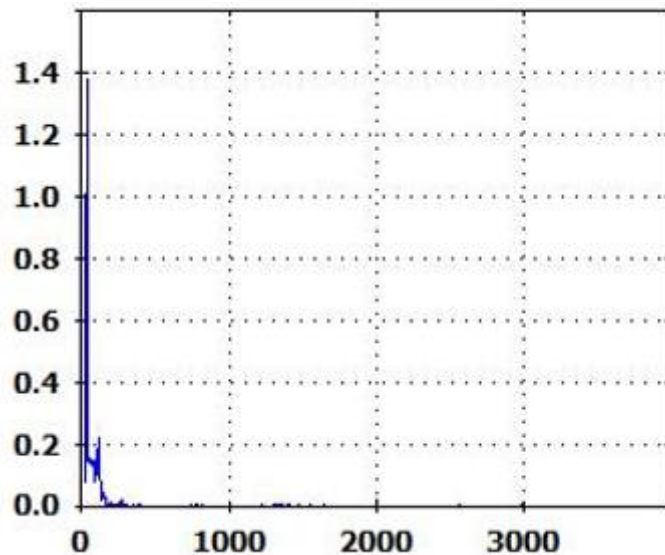
**Gráfico 34 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,40 mm/s e 0,30 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 35.



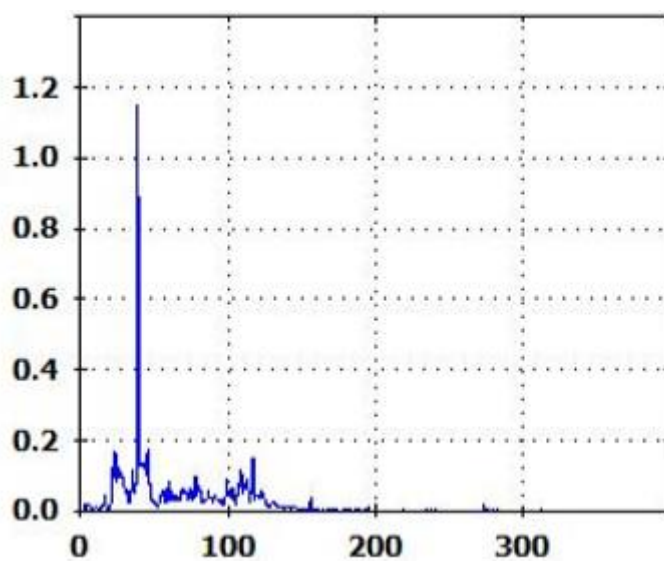
**Gráfico 35 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,40 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 36.



**Gráfico 36 - Local 4 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,20 mm/s e 0,90 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,2 mm/s como mostra o gráfico 37.



**Gráfico 37 - Local 4 faixa baixa no eixo radial**

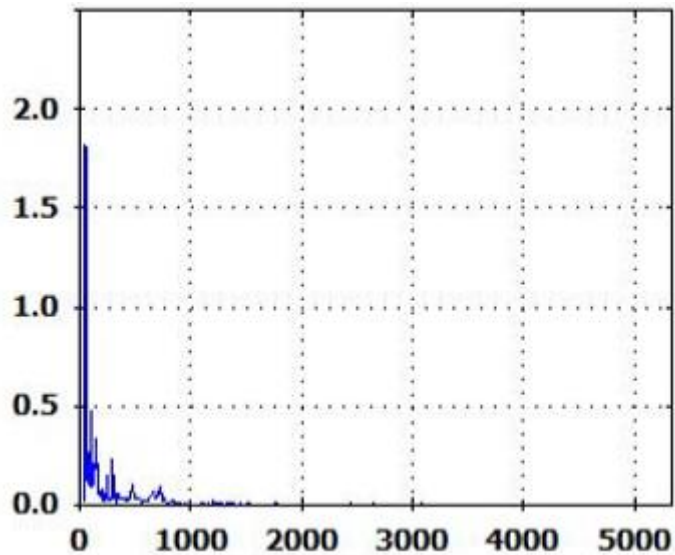
Para a frequência de 50 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 11:

**Tabela 11 - Parâmetros de medição para 50 Hz**

Detalhes da configuração da máquina	
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	2907.33
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

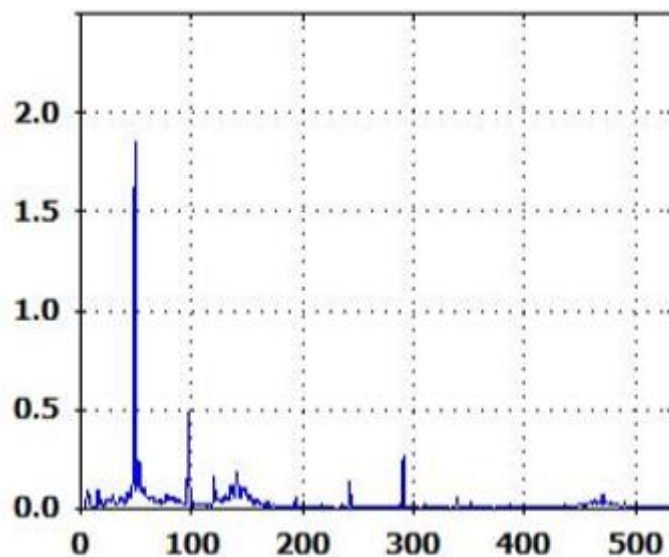
**Fonte: A autoria própria**

Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,80 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 38.



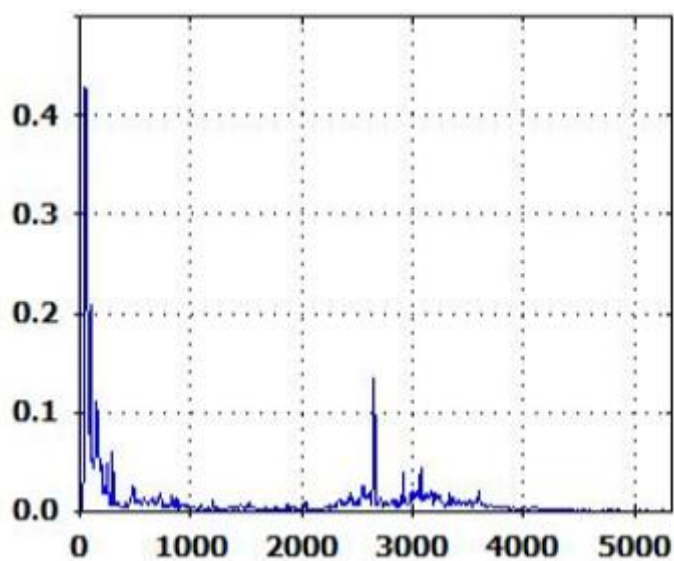
**Gráfico 38 - Local 4 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 1,80 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 39.



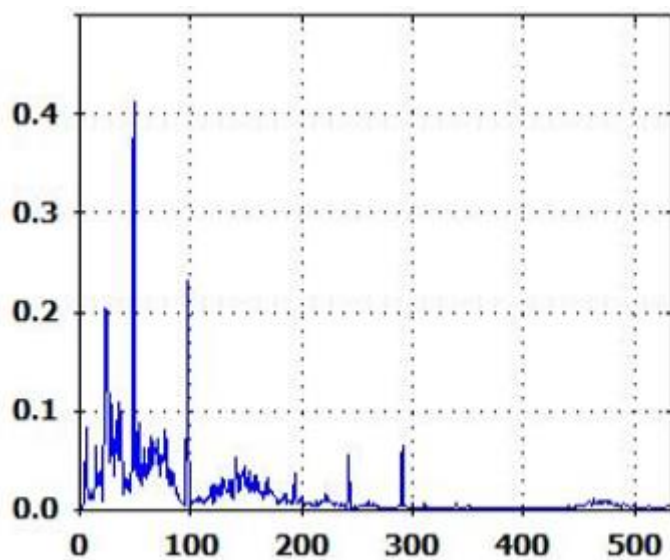
**Gráfico 39 - Local 4 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,42 mm/s e 0,20 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 40.



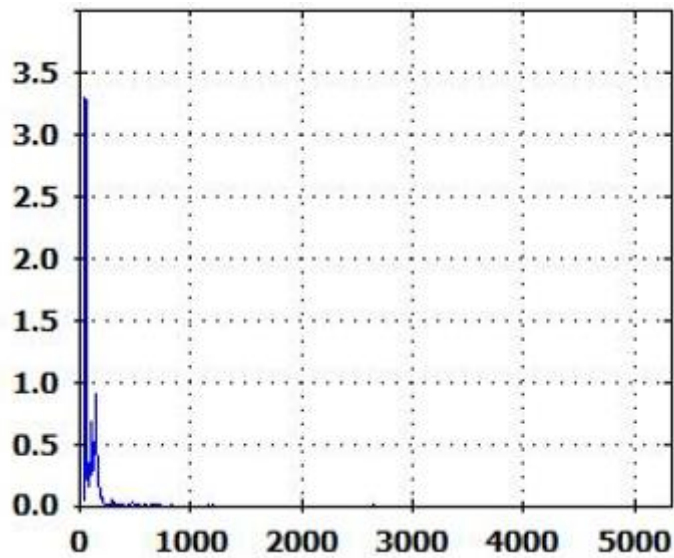
**Gráfico 40 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 0,41 mm/s e 0,22 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,1 mm/s como mostra o gráfico 41.



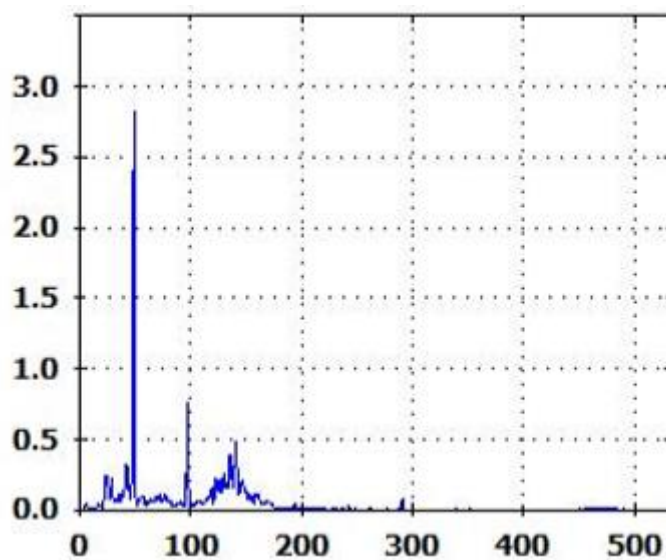
**Gráfico 41 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 3,40 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 42.



**Gráfico 42 - Local 4 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,80 mm/s e 0,90 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 43.



**Gráfico 43 - Local 4 faixa baixa no eixo radial**

Para a frequência de 60 Hz se configurou o equipamento como mostra a tabela 12:

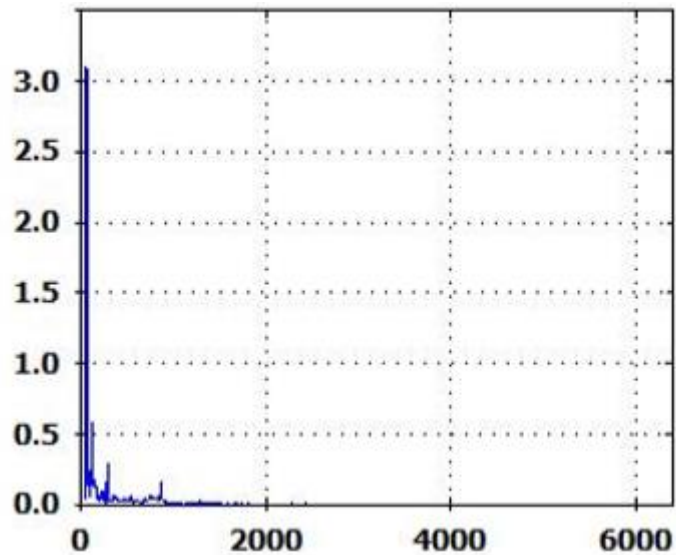
**Tabela 12 - Parâmetros de medição para 60 Hz**

Detalhes da configuração da máquina	
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Sim
Rotação em RPM	3459.5
kW nominal	2.2
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Não
Acoplamento entre o motor e o próximo componente	Sim
Próximo componente	Bomba
Tipo de rolamento do componente acionado	Rolamento de esferas
Tipo de bomba	Centrífugo
Hélice suportada por	2 rolamentos
Nº pás ou lâminas da bomba [opcional]	

**Fonte: Autoria própria**

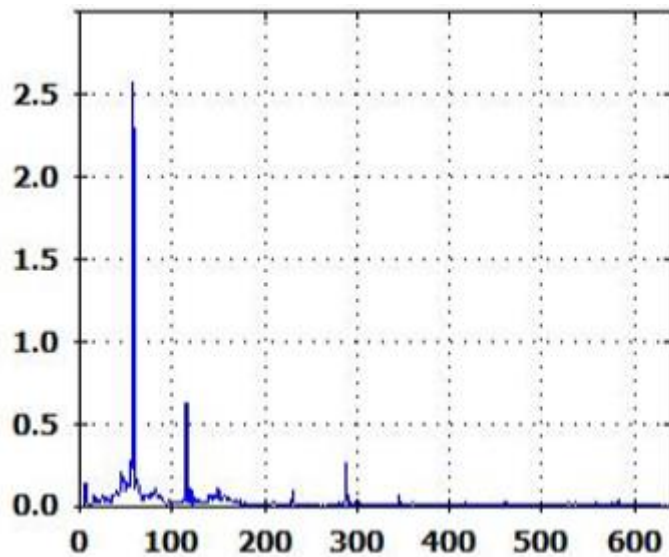
Dentro da faixa alta na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 3,00 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 44.





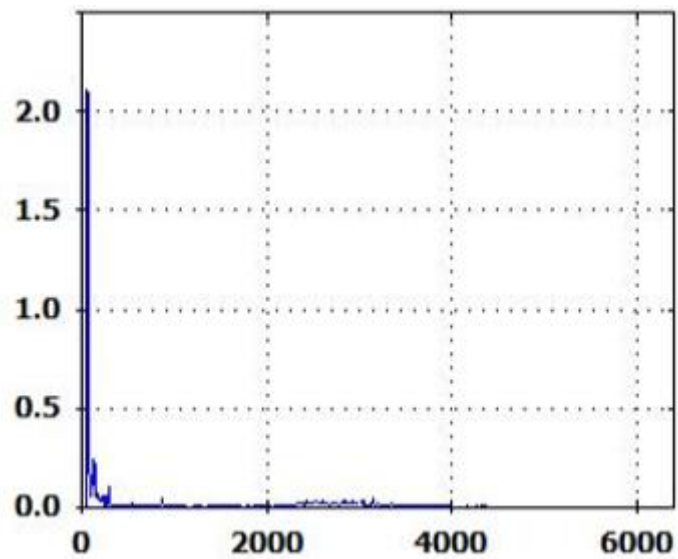
**Gráfico 44 - Local 4 faixa alta no eixo axial**

Dentro da faixa baixa na direção axial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,50 mm/s e 0,70 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 45.



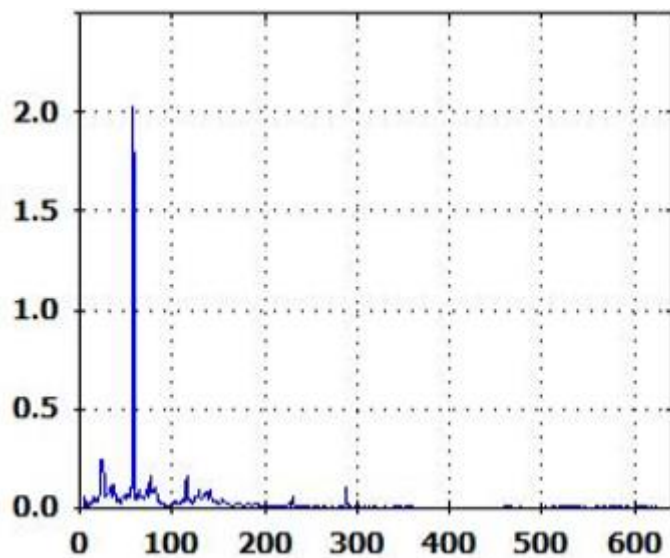
**Gráfico 45 - Local 4 faixa baixa no eixo axial**

Dentro da faixa alta na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,00 mm/s e 0,50 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 46.



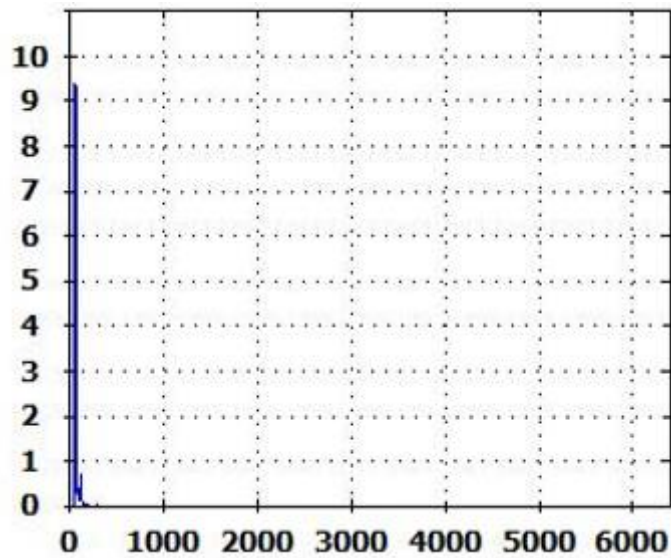
**Gráfico 46 - Local 4 faixa alta no eixo tangencial**

Dentro da faixa baixa na direção tangencial, o resultado dos picos da vibração atingiu 2,00 mm/s e 0,5 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 0,5 mm/s como mostra o gráfico 47.



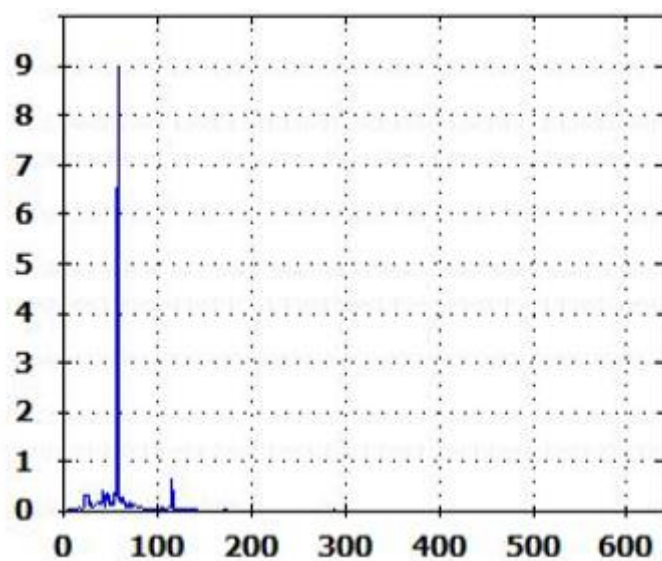
**Gráfico 47 - Local 4 faixa baixa no eixo tangencial**

Dentro da faixa alta na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 9,00 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 1,00 mm/s como mostra o gráfico 48.



**Gráfico 48 - Local 4 faixa alta no eixo radial**

Dentro da faixa baixa na direção radial, o resultado dos picos da vibração atingiu 9,00 mm/s e 1,00 mm/s e o restante dos picos ficou abaixo de 1,00 mm/s como mostra o gráfico 49.



**Gráfico 49 - Local 4 faixa baixa no eixo radial**

As tabelas apresentadas abaixo consideram apenas a faixa alta utilizada pelo aparelho de medição. O resumo dos dados para o eixo axial, é apresentado abaixo:

**Tabela 13 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo axial**

<b>Local</b>	<b>Frequência do equipamento</b>	<b>RPM</b>	<b>Pico máximo (mm/s)</b>
Local 3	30 Hz	1764	0,35
Local 3	40 Hz	2340	1,20
Local 3	50 Hz	2904	1,00
Local 3	60 Hz	3456	2,00
Local 4	30 Hz	1764	0,60
Local 4	40 Hz	2340	1,50
Local 4	50 Hz	2904	1,80
Local 4	60 Hz	3456	3,00

**Fonte: Autoria própria**

O resumo dos dados para o eixo tangencial, é apresentado abaixo:

**Tabela 14 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo tangencial**

<b>Local</b>	<b>Frequência do equipamento</b>	<b>RPM</b>	<b>Pico máximo (mm/s)</b>
Local 3	30 Hz	1764	0,50
Local 3	40 Hz	2340	0,75
Local 3	50 Hz	2904	1,50
Local 3	60 Hz	3456	1,50
Local 4	30 Hz	1764	0,40
Local 4	40 Hz	2340	0,40
Local 4	50 Hz	2904	0,40
Local 4	60 Hz	3456	2,00

**Fonte: Autoria própria**

O resumo dos dados para o eixo radial, é apresentado abaixo:

**Tabela 15 - Resumo dos dados para pico máximo no eixo radial**

<b>Local</b>	<b>Frequência do equipamento</b>	<b>RPM</b>	<b>Pico máximo (mm/s)</b>
Local 3	30 Hz	1764	1,30
Local 3	40 Hz	2340	1,00
Local 3	50 Hz	2904	1,90
Local 3	60 Hz	3456	2,10
Local 4	30 Hz	1764	1,20
Local 4	40 Hz	2340	1,40
Local 4	50 Hz	2904	3,40
Local 4	60 Hz	3456	9,00

**Fonte: Autoria própria**

O maior pico foi localizado no Local 4 a 60 Hz com pico máximo de 9 mm/s, tendo isso em vista que o equipamento está em perfeito estado, o alarme que poderia ser programado para o pico máximo na região tangencial seria acima de 9 mm/s.

### 4.3 Discussão dos resultados

Segundo a norma ISO 10816 segue os seguintes parâmetros para a análise:

- Posição de medição
- Sistema de medição
- Critérios de análise
- Alarmes

Os pontos de medição que se encontram nas figuras 23 corresponde a parte estrutural do mancal e ali naquele ponto apontado pela norma se caracteriza a vibração global do equipamento, o mesmo acontece na figura 24. Os resultados da medição realizada com o aparelho Fluke 810 cumprem com os requisitos da cláusula 4 da norma ISO 10816, sendo que o aparelho tem a faixa de medição adequada e o sistema onde pode realizar medições nos diversos eixos. O sistema de medição utilizado foi baseado no histórico do equipamento, que é pouco utilizado, algumas poucas vezes ao ano. Logo um equipamento portátil como o Fluke é o ideal para realizar as medições, no caso de equipamentos com uso ininterrupto outros equipamentos poderiam ser utilizados. Com isso os itens 4.1 e 4.2 apresentam a medição da vibração enquanto o equipamento se encontrava em ótimo estado.

Tendo em vista que os resultados cumprem com a cláusula 4 da norma ISO 10816, então é chamada de magnitude de vibração em uma posição e direção específica, definida através do eixo axial, radial e tangencial.

O critério utilizado para a análise de vibração da bomba foi o Critério I apresentado na norma, onde conseguimos identificar o equipamento no gráfico 1 estando na Zona B. E de acordo com a tabela verificamos que o equipamento é acoplado a um motor acima de 15 KW classificado na classe 2.

Baseado no critério segue abaixo a definição de alarmes de acordo com o gráfico 1 e classe 2 da tabela 3.

**Tabela 16 - Alarmes**

<b>Local</b>	<b>Frequência</b>	<b>Alarme (mm/s)</b>
Local 3	30 Hz	1,8
Local 3	40 Hz	1,8
Local 3	50 Hz	1,8
Local 3	60 Hz	2,8
Local 4	30 Hz	1,8
Local 4	40 Hz	1,8
Local 4	50 Hz	2,8
Local 4	60 Hz	2,8

**Fonte: Autoria própria**

Com isso valores acima dos permitidos pelos Alarmes devem ser considerados um alerta pois a longo prazo devem levar o equipamento a um desgaste a correspondente manutenção. Quando o equipamento está entre 50 Hz e 60 Hz apresenta faixa maiores do que as permitidas nos eixos radial e axial, sendo assim se o equipamento for utilizado de forma continua logo ele terá problema nessas faixas de medição.



## 5. CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A importância de se seguir normas como a ISO 10816, que definem índices de vibração tabelados e normas específicas, contribuem para uma boa manutenção afetando diretamente a qualidade da manutenção. Este estudo tem como objetivo mostrar que o respeito as normas internacionais, o investimento no setor de manutenção levará um benefício de diminuição de custo muito maior.

Para trabalhos futuros pode-se fazer um estudo diretamente ligado aos indicadores de manutenção, comprovando-se que com as normas seguidas à risca esses indicadores tornaram-se satisfatórios.

Outros trabalhos também podem abordar sistemas vibratórios de outros componentes como: turbinas a vapor, máquinas industriais com grande potência nominal, e conjuntos acionados por turbinas a gás.

Por fim, também seria interessante, um estudo mais aprofundado sobre a implementação de equipamentos utilizados na análise de vibração, distinguindo-os entre os grupos citados acima.

## REFERÊNCIAS

Associação brasileira de normas técnicas. **Documento Nacional de Manutenção: A Situação da manutenção no Brasil**. Curitiba, 2011.

GATEC. **Projeto manutenção preditiva: Análise de vibrações**. 2016.

International Organization of Standardization. **Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s-basis for specifying evaluation standards**. ISO 2372, 1974.

International Organization of Standardization. **Evaluation and measurement of vibration in buildings, Draft Proposal**. ISO DP 4866, 1975.

International Organization of Standardization. **Guide for evaluations of human exposure to whole-body vibration**. ISO 2631, 1974.

RAO, Singiresu, **Vibrações Mecânicas**. 4ª ed. São Paulo, SP. Pearson Prentice Hall, 2008.

SOTELO JR., José; FRANÇA, Luís Novaes Ferreira. **Introdução às vibrações mecânicas**, São Paulo, Edgard Blücher, 2006.

BALACHANDRAN, Balakumar; MARGRAB, Edward B. **Vibrações mecânicas**. São Paulo: CENGAGE Learning, 2011

KARDEC, Alan; NASCIF, Julio. **Manutenção função estratégica**. Rio de Janeiro, 2012.

GARCIA, Maurício Sanches, **análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações**, Rio de Janeiro, 2005.

ANTONIOLLI, Edilar Bento, **Estudo Comparativo De Técnicas De Medição E Análise De Vibrações Para A Manutenção Preditiva Em Mancais De Rolamentos**, Florianópolis, 1999.

ALMEIDA, Fabrício César Lobato de, **Diagnóstico Automático De Falhas Em Turbinas Hidráulicas De Pequenas Centrais Hidroelétricas Utilizando Técnicas Preditivas De Manutenção E Redes Neurais Artificiais**, 2008.

Barilli, Rodrigo Jorge de Castilho, **Análise de falhas em mancais de rolamento utilizando a técnica do envelope**, 2013

International Organization of Standardization. **Vibração mecânica - Balanceamento**. ISO 1925, 2001.

International Organization of Standardization. **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Parts 1**. ISO 10816, 1995.

International Organization of Standardization. **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Parts 5**. ISO 10816, 1995.

Acoplast. **O que é Mancal? O Guia completo para você escolher o modelo ideal**. Disponível em: <https://blog.acoplastbrasil.com.br/mancal-o-que-e>. Acesso em: 15/04/2020

NSK. **Catálogo de equipamentos**. Disponível em <http://www.nsk.com.br/caixas-de-mancais-e-acessorios-serie-snn-2330.htm>. Acesso em: 15/04/2020

Fluke. **Testadores de vibração e analisadores de vibração**. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/manutencao-mecanica/analise-de-vibracoes/fluke-810>. Acesso em: 20/03/2020.

Siemens. **Nova geração: Siemens vende maior turbina a vapor fabricada na planta de Jundiaí**. Disponível em: [https://www.siemens.com.br/nossojornal/\\_edicoes/314/projeto\\_argentina.php](https://www.siemens.com.br/nossojornal/_edicoes/314/projeto_argentina.php). Acesso em: 26/12/2020.

WEG. **Motores de Indução Trifásicos Rotor Bobinado - Linha Master**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Motores-de-An%C3%A9is/Porta-escovas-Motorizado/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos-Rotor-Bobinado---Linha-Master/p/MKT\\_WEN\\_MLINE\\_WRIM](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Motores-de-An%C3%A9is/Porta-escovas-Motorizado/Motores-de-Indu%C3%A7%C3%A3o-Trif%C3%A1sicos-Rotor-Bobinado---Linha-Master/p/MKT_WEN_MLINE_WRIM) . Acesso em: 26/12/2020.