

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS EIJI TORIY BOTELHO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE ROLAMENTOS EM UMA MOTOBOMBA BCA-1 1/2
USANDO SENSOR FLUKE 810**

GUARAPUAVA

2023

MATHEUS EIJI TORIY BOTELHO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE ROLAMENTOS EM UMA MOTOBOMBA BCA-1 1/2
USANDO SENSOR FLUKE 810**

***VIBRATION ANALYSIS IN BEARINGS OF HYDRAULIC MOTOR PUMP BCA-1 1/2
USING FLUKE 810 SENSOR***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof. Dra. Denise Ramalho.

GUARAPUAVA

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

MATHEUS EIJI TORIY BOTELHO

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO DE ROLAMENTOS EM UMA MOTOBOMBA BCA-1 1/2
USANDO SENSOR FLUKE 810**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof. Dra. Denise Ramalho.

Data de aprovação: 07/dezembro/2023

Denise Alves Ramalho

Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Dalmas

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Raquel Da Cunha Ribeiro Da Silva

Doutora

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

*Dedico este trabalho a minha família, pelos
momentos de ausência.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por me dar força nos momentos mais difíceis.

A Professora Dra. Denise Ramalho, pela orientação, apoio e dedicação para elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, Emerson e Lumi, por darem a oportunidade e o “luxo” de estudar, sempre dando apoio.

Ao meu irmão Lucas, pelos momentos de descontração e apoio durante a caminhada.

Aos meus avós, tias e primos que me deram apoio e são fundamentais em todas as minhas conquistas.

A minha namorada, Ana Livia pelo apoio na vida pessoal e acadêmica.

Aos meus amigos que fiz durante essa caminhada que dividiram bons momentos comigo.

A ACTUS Soluções & Consultoria por ter me dado a oportunidade de crescer profissionalmente e conhecer pessoas incríveis.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela oportunidade de realizar o curso.

“Não deixe o barulho da opinião dos outros abafar sua voz interior. E mais importante, tenha a coragem de seguir seu coração e sua intuição. Eles de alguma forma já sabem o que você realmente quer se tornar. Tudo o mais é secundário.”

(Steve Jobs, 2007)

RESUMO

Neste trabalho, mostrou-se a importância da manutenção e monitoramento das condições dos componentes de uma máquina com foco nos rolamentos, assim como seus tipos de falha, modo de detecção e impactos gerados no sistema. Além disso, foram apresentadas as vantagens em utilizar o método de análise de vibração da máquina para detectar falhas dos componentes internos, visando a não invasão do sistema em funcionamento. Baseado nisso, foi realizada a coleta dos níveis de vibração em uma motobomba da caixa d'água com o sensor Fluke 810 e feita a análise dos picos apresentados de RMS nas frequências detectadas pelo equipamento. A partir dessa análise, foi possível encontrar dois tipos de falhas nos componentes rolantes, sendo folgas nos rolamentos e a degradação em níveis iniciais, intermediários e avançados dos componentes internos dos rolamentos. Dito isso, os resultados demonstram a necessidade da troca dos rolamentos por componentes novos, além da criação de um plano de manutenção preditiva, visando a melhor manutenibilidade da bomba em estudo.

Palavras-Chave: Análise de vibração; sensores; manutenção preditiva; falhas em rolamentos.

ABSTRACT

In this work, the importance of maintenance and monitoring of the conditions of machine components, focusing on bearings, as well as their types of failure, detection methods, and impacts on the system were demonstrated. Additionally, the advantages of using the vibration analysis method to detect internal component failures were presented, aiming to avoid invasion of the operating system. Based on this, vibration levels were collected from a water tank's motor pump using the Fluke 810 sensor, and an analysis of the RMS peaks in the frequencies detected by the equipment was conducted. From this analysis, two types of failures in the rolling components were identified: bearing clearances and the degradation at initial, intermediate, and advanced levels of the internal components of the bearings. Therefore, the results indicate the need to replace the bearings with new components, and the creation of a predictive maintenance plan, aiming for better maintainability of the pump under study.

Keywords: Vibration analysis; sensors; predictive maintenance; bearing failures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico Tempo-Frequência	22
Figura 2 – Lista de Componentes Motobomba Autoaspirante BCA-40	23
Figura 3 – Especificações do Motor BCA-40 1 1/2	24
Figura 4 – Fatores principais que afetam a vida útil da máquina	26
Figura 5 – Comparação de um deslizamento direto na superfície e deslizamento com auxílio de rolamentos	30
Figura 6 – Área de contato da esfera	31
Figura 7 – Área de contato do rolo	31
Figura 8 – Desalinhamento Paralelo	33
Figura 9 – Desalinhamento Angular	34
Figura 10 – Folga axial no rolamento	35
Figura 11 – Desbalanceamento estático	36
Figura 12 – Desbalanceamento acoplado	36
Figura 13 – Acelerômetro piezoelétrico	37
Figura 14 – Sensor Fluke 810	38
Figura 15 – Fluxograma da medição	39
Figura 16 – Escala de gravidade do Fluke 810	41
Figura 17 – Motobombas analisadas	42
Figura 18 – Motobomba escolhida	43
Figura 19 – Especificações técnicas da motobomba autoaspirante BCA-1 1/2	43
Figura 20 – Exemplo de gráfico de vibração	44
Figura 21 – Parâmetros utilizados	45
Figura 22 – Locais de medição	46
Figura 23 – Diagnóstico Sensor Fluke 810	47
Figura 24 – Picos encontrados no Local 1	48
Figura 25 – Picos encontrados no Local 2	48
Figura 26 – Gráfico 1: Folga Mecânica	50
Figura 27 – Gráfico 2: Folga mecânica	51
Figura 28 – Gráfico 3: Folga mecânica	52
Figura 29 – Gráfico 1: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Baixa Frequência)	53
Figura 30 – Gráfico 2: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Alta Frequência)	54
Figura 31 – Gráfico 3: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Alta Frequência)	55
Figura 32 – Gráfico 4: Falha dos rolamentos da Extremidade Acionada	56
Figura 33 – Gráfico 5: Falha dos rolamentos da Extremidade Acionada	57

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1 – Evolução da manutenção a partir da década de 1950.....	25
Tabela 1 – Tipos de manutenção e exigências técnicas	29
Tabela 2 – Especificações do Sensor Fluke 810.....	39
Tabela 3 – Especificações do Tacômetro	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RMS	<i>Root Mean Square</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleração
F	Força
Hz	Hertz
m	Massa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Análise de vibração	18
2.1.1 Tipos de vibração	19
2.1.1.1 Vibração livre e forçada.....	19
2.1.1.2 Vibração amortecida e não amortecida	20
2.1.2 Técnicas de vibração.....	20
2.1.2.1 Técnica no domínio do tempo	20
2.1.2.2 Técnica da frequência	21
2.1.2.3 Técnica no domínio tempo-frequência	21
2.2 Bombas	22
2.2.1 Motobomba Autoaspirante.....	23
2.2.1.1 Componentes	23
2.2.1.2 Especificações do motor	24
2.3 Manutenção	24
2.3.1 Manutenção corretiva	27
2.3.2 Manutenção preventiva	28
2.3.3 Manutenção preditiva	28
2.4 Falha mecânica	30
2.4.1 Falhas de rolamentos	30
2.4.2 Desalinhamento	33

2.4.3 Folgas.....	35
2.4.4 Desbalanceamento	35
2.5 Sensores para análise de falhas	36
2.5.1 Acelerômetros	37
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	38
3.1 Sensor FLUKE	38
3.2 Escolha da bomba para estudo	42
3.3 Método de análise	44
3.4 Parâmetros.....	45
3.5 Locais de medição	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Diagnóstico inicial.....	47
4.2 Análise das falhas de rolamentos.....	48
4.2.1 Falhas por Folga Mecânica	49
4.2.2 Falhas por defeito no rolamento.....	52
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A revolução industrial transformou os meios de produção através das máquinas, que possuem capacidade produtiva rápida e constante. Diferente do processo produtivo antigo, que era limitado pela capacidade de produção do homem durante a sua jornada de trabalho (HOBBSAWM, 1977). Diante disso, a civilização atual claramente se tornou dependente das máquinas, principalmente no setor industrial, pois uma máquina nitidamente possui uma produtividade muito superior a um ser humano (IGLESIAS, 1990).

Isto posto, a interferência humana é cada vez menor no âmbito da linha de produção, criando gradativamente mais, a necessidade da supervisão e do monitoramento das máquinas, em razão de os equipamentos industriais trabalharem de forma autônoma (COSTA & STEFANO, 2014).

Por conseguinte, é extremamente necessário que falhas em sistemas mecânicos sejam identificadas para evitar o interrompimento de sua atividade e realizar manutenção preditiva, a fim de diminuir o risco de dano do componente (MASCOLOTI, 2021). Em conformidade, Barbosa (2018) define a importância da manutenção preditiva como “estabelecer diagnósticos de possíveis, defeitos, desgastes, falhas e avarias futuras, através da análise fina da evolução de certos parâmetros dos sistemas produtivos”.

Dessa forma, o estudo da análise de vibração tem um papel fundamental no monitoramento das máquinas industriais, principalmente em máquinas de sistemas mecânicos com peças rotativas ou alternadas (GOYAL & PABLA, 2015). De acordo com o Rao, “a maioria dos motores de acionamento possuem problemas de vibração em razão do desbalanceamento inerente aos motores”. Sem dúvida, algumas falhas mecânicas são resultado de vibração indevida no projeto, como a vibração das pás e rotor das turbinas, que causam falhas imensas (RAO, 2008).

Neste sentido, há a necessidade de melhorar a confiabilidade, qualidade segurança e produtividade das máquinas por meio da análise de dados obtidos por medições como sensores de vibração (GOYAL & PABLA, 2015). Logo, a medição da vibração é fundamental para gerar esses dados pois, segundo McMillan (2004), em média 90% dos problemas surgem por conta do desbalanceamento ou

desalinhamento das partes rotativas, que podem ser detectados por meio de sensores de vibração.

Existem três tipos de parâmetros para descrever a vibração: amplitude, velocidade e aceleração. O tipo de sensor utilizado dentro de uma medição varia de acordo com a frequência que a máquina ou o objeto em estudo vibra. Na maior parte das vezes pode-se usar sensores de amplitude para frequências menores, sensores de velocidade para frequência média e para frequências maiores é utilizado o acelerômetro (TSANG, 1995). Para o bom funcionamento do medidor de vibração é necessário que ele seja montado na posição correta e não tenha influência externa durante essa atividade. Feito isso, a máquina pode ser monitorada em tempo real sem que haja a necessidade de parada (GLOWACZ et al., 2021). Dessa forma, o método de análise de vibração apresenta ser o melhor método para mostrar a condição da máquina em tempo real comparando-se com outros métodos, como o a análise por imagens térmicas (BROWN & JENSEN, 2020).

Dito isso, este trabalho tem a intenção de abordar a análise de vibração para monitorar uma máquina e detectar possíveis falhas pela manutenção preditiva, melhorando a disponibilidade, reduzindo os custos, e minimizando a perda da produção.

1.1 Justificativa

Com o aumento da demanda produtiva, a concorrência está cada vez maior no cenário industrial, tornando o mesmo um setor muito competitivo. Diante disso, a redução de custo, melhoria na qualidade do produto e vida útil das máquinas se tornam um alvo principal dentro desse mercado. Dessa forma, é necessário que haja maneiras de monitorar os componentes das máquinas, que na sua maioria são rotativas, para que haja uma melhora na disponibilidade e produtividade, para garantir menor custo com manutenção corretiva, problemas de qualidade e maior lucro.

1.2 Objetivos

Para um melhor entendimento da proposta deste trabalho, o objetivo geral e os objetivos específicos são apresentados a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar um rolamento de uma máquina rotativa com um sensor de vibração para identificar possíveis desgastes e falhas, e com isso, através da aplicação de técnicas de manutenção preditiva, melhorar a vida útil da máquina e seus componentes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os tipos de sensores para a análise de vibração;
- Mostrar os pontos positivos do método utilizado;
- Verificar a aplicabilidade e confiabilidade do método de análise gráfica dos picos de RMS encontrados, validando com dados reais;
- Apresentar possíveis falhas que rolamentos podem apresentar e suas características; e
- Propor melhorias para os tipos de falhas detectados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Análise de vibração

Rao (2008) define vibração ou oscilação como “qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo”. Então, o estudo de vibrações consiste no estudo dos movimentos oscilatórios de corpos e as suas forças relacionadas. O mesmo autor define vibração de um sistema como “a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para potencial”, também afirma que uma quantidade limitada de energia é dissipada em ciclos caso o sistema seja amortecido.

Dito isso, os sinais de vibrações auxiliam na avaliação do estado e saúde da máquina para detectar falhas de forma precoce, evitando que paradas indesejadas ocorram, fazendo com que a máquina fique parada por um longo período, impactando negativamente na produtividade da máquina e da indústria (GEORGOULAS et al., 2015). Essa análise é fundamental, visto que 90% dos problemas em máquinas na indústria são ocasionados por falhas predominantes em rolamentos (XU & CHEN, 2013).

Com base nisso, a análise de vibração se mostra muito importante dentro do processo produtivo e na manutenção dos equipamentos que compõem a planta industrial, pois essa é a técnica mais utilizada nos últimos 50 anos para determinar o estado mecânico da máquina e seus componentes (DUBE; DHAMANDE; KULKARNI, 2013). Assim, é essencial que técnicas sejam aplicadas para melhorar a vida útil das máquinas, a sua produtividade e reduzir os custos de produção (SANTOS, 2017).

Existem diferentes abordagens para a análise e diagnóstico de falhas em máquinas. Essas abordagens incluem a medição de parâmetros gerais e a análise de sinais em frequência. A medição de parâmetros gerais é eficaz na detecção de problemas no funcionamento da máquina, mas sua aplicação é limitada à identificação e diagnóstico da falha. Por outro lado, a análise de sinais em frequência permite identificar o tipo de defeito e sua localização com maior precisão, principalmente em casos de falhas em rolamentos (FRANCO & MARRA, 2000).

Tandon e Choudhury (1999) fizeram uma análise sobre detecção de falhas em rolamentos, onde classifica as técnicas de acordo com a grandeza física utilizada para

aquisição do sinal. Tais técnicas incluem medidas de vibração, pressão acústica, temperatura e análise de desgaste. Entre elas, os principais métodos usados, são os baseados em medidas de vibração. Esses métodos são subdivididos em técnicas no domínio do tempo, da frequência e no domínio tempo-frequência.

Os sinais de vibração provenientes de rolamentos contêm informações valiosas sobre as condições do estado da máquina. Como resultado, os métodos baseados em sinais de vibração têm sido amplamente estudados nas últimas décadas. O processamento de sinal é utilizado para extrair características fundamentais desses sinais (LEI; HE; ZI; HU, 2007).

2.1.1 Tipos de vibração

2.1.1.1 Vibração livre e forçada

Vibração livre denomina-se quando após uma força inicialmente exercida, o corpo continua sua vibração por ele mesmo. Um exemplo desse tipo de vibração é um balanço de parques infantis, nesse exemplo ele funciona como um pêndulo simples e exerce o seu movimento a partir de um movimento inicial até atingir um estado estacionário (RAO, 2008).

Já na vibração forçada, a vibração ou oscilação do sistema acontece de acordo com forças externas que influenciam nesse movimento. Nesse caso, podemos utilizar o estudo deste trabalho como exemplo, onde a vibração da máquina é resultante da força do motor em trabalho (RAO, 2008). Neste tipo de vibração, se a frequência natural do sistema for a mesma frequência da força externa, acontece o fenômeno de ressonância, esse fenômeno amplifica o movimento oscilatório. Dessa forma, ela pode ser responsável por alguma falha mecânica, pois ao decorrer do tempo algumas partes da máquina podem sofrer desgaste, com isso a rigidez dos seus componentes muda, e a sua frequência natural altera da mesma forma, podendo chegar ao mesmo nível da frequência da força externa (MHF PREDITIVA, 2007). Um caso conhecido de falha por ressonância provocada pela força dos ventos, é da Ponte Tacoma Narrows, construída no estado de Washington, nos Estados Unidos. De acordo com o Tale of Three Bridges (WSDoT, 20/05/2023), a ponte colapsou

violentamente em Puget Sound depois de quatro meses da sua inauguração, fazendo com que o investimento da ponte em 1940 de \$6,4 milhões de dólares fosse perdido.

2.1.1.2 Vibração amortecida e não amortecida

A vibração amortecida se dá quando qualquer energia é dissipada no sistema. Já para as vibrações não amortecidas, nenhuma energia é perdida ou dissipada pelo sistema em questão. Na engenharia o amortecimento nos sistemas físicos pode ser desprezado na maioria dos casos, pois a quantidade de amortecimento é extremamente pequena (RAO, 2008).

Quando há a dissipação de energia, ou seja, existe o movimento oscilatório de forma amortecida, elas acontecem nas formas (COSSOLINO & PEREIRA, 2010):

- Amortecimento ou atrito interno: associado aos defeitos da microestrutura;
- Amortecimento estrutural: associado ao movimento entre os componentes ou contato nas articulações do sistema mecânico; e
- Amortecimento fluídico: associado ao fluido.

2.1.2 Técnicas de vibração

A análise de sinais de vibração em rolamentos é comumente classificada em três abordagens: análise no domínio temporal, análise no domínio frequencial e análise no domínio tempo-frequência (Castejon et al, 2010).

2.1.2.1 Técnica no domínio do tempo

Entre os diversos métodos de detecção de falhas, de acordo com Tandon (1999), no domínio do tempo, os mais simples são o nível RMS e fator de crista. Esses métodos utilizam a relação entre o valor de pico (máximo) e o valor RMS (valor eficaz) de aceleração como uma medida para identificar possíveis falhas em rolamentos. Contudo, é importante ressaltar que esses métodos possuem suas limitações e não são totalmente eficazes na detecção de todas as falhas em rolamentos.

Para Mitchell (1993), o fator de crista tem demonstrado ser mais eficiente do que o nível RMS na detecção de falhas incipientes em rolamentos. Tal fato ocorre devido ao comportamento característico das falhas, em que à medida que se propagam pela superfície da pista, o valor de pico permanece praticamente inalterado, enquanto o valor RMS cresce, ocorre conseqüentemente uma diminuição do fator de crista. Para contornar essa limitação, o autor propõe o uso do fator K, que é o produto do valor RMS e o valor de pico da aceleração. Esse fator combinado permite uma avaliação mais sensível e precisa das falhas incipientes em rolamentos. Além destes métodos, no domínio do tempo, existem outros que estão relacionados com parâmetros estatísticos.

2.1.2.2 Técnica da frequência

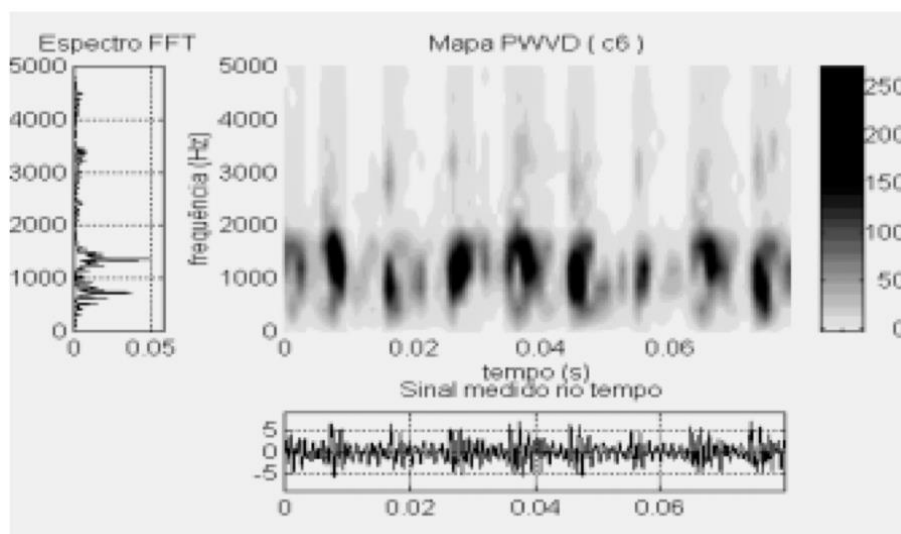
Para a técnica da frequência existe um método chamado técnica do envelope, no qual McFadden e Smith (1984) detalham sobre as suas limitações e características específicas. Dessa forma, mostram que é possível identificar a faixa de ressonância por meio dessa técnica.

Com o avanço tecnológico, autores mais recentes como Antoni e Randall (2003) usaram a técnica SANC para separar os sinais de engrenagens e rolamentos de uma caixa de transmissão, além disso, expandiram os seus estudos para que os sinais fossem detectados por um período maior, a fim de diminuir os ruídos que afetam as frequências harmônicas.

2.1.2.3 Técnica no domínio tempo-frequência

Na análise do tempo é possível monitorar o crescimento da falha ao decorrer do período, porém não se pode encontrar a local da falha do rolamento. Já para a frequência encontra-se o local em que a falha ocorre, mas não monitora o crescimento da falha. Dessa forma, é possível utilizar as duas técnicas simultaneamente, transformando-as na técnica do domínio tempo-frequência, em que com o cruzamento de dados pode-se encontrar o crescimento da falha, conforme a Figura 1, assim como a sua localização, tornando possível achar o local da falha e a sua variação de frequência (SILVA & MUCHERONI, 2000).

Figura 1 – Gráfico Tempo-Frequência



Fonte: Silva & Mucheroni (2000).

2.2 Bombas

Bombas são dispositivos mecânicos fundamentais no transporte de fluidos. Elas operam ao receber energia de uma fonte externa, que é convertida em energia cinética e pressão, impulsionando o fluido através de tubulações. Essenciais em situações em que é necessário elevar a pressão de um líquido ou movê-lo entre diferentes pontos de um sistema, as bombas são ajustadas conforme as necessidades específicas de vazão e pressão do processo em questão (FERREIRA FILHO & PEREIRA, 2003).

São categorizadas em dois grupos distintos: máquinas de deslocamento positivo e máquinas de fluxo. Nas máquinas de deslocamento positivo, o fluido é temporariamente retido em uma câmara, onde a alteração no volume da câmara provoca o aumento da pressão. Por outro lado, nas máquinas de fluxo, também conhecidas como hidrodinâmicas, o fluido circula livremente, sem confinamento, sofrendo uma transferência de energia devido a processos dinâmicos que ocorrem durante o seu percurso pela máquina (HENN, 2006).

2.2.1 Motobomba Autoaspirante

A motobomba em estudo refere-se a uma motobomba autoaspirante, isto é, uma bomba centrífuga que tem a capacidade de transportar fluidos e extrair partículas sólidas. Este dispositivo também é dotado de uma válvula de retenção, o que lhe permite aspirar água e prevenir seu retorno pela tubulação. Tal funcionalidade é viabilizada por um reservatório compacto que armazena a água inicialmente, possibilitando o início do processo de bombeamento (FEBRAMAT, 2022).

2.2.1.1 Componentes

Na Figura 2 podemos encontrar a lista de componentes do modelo em estudo.

Figura 2 – Lista de Componentes Motobomba Autoaspirante BCA-40

BCA-40																						
Item	Descrição	Composição do kit	Quant. de peças utilizadas no produto	Quant. de peças contidas em cada caixa do kit	BCA-40 1 1/2					BCA-40 2												
					3/4 cv	1 cv	1,5 cv	2 cv	3 cv	3/4 cv	1 cv	1,5 cv	2 cv	3 cv								
1	Motor elétrico IP-21, 2 polos, 60 Hz	-	1	-																		
2	Anel de respingo	-	1	-	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	8720014103A	
3	Intermediário BCA-40 FE P	-	1	-	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	8701489501A	
4	Kit parafuso SZ. NC 3/8 x 1"	-	8	5	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	8720130109A	
5	Selo 5/8 T21 BUNA	-	1	-	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	8720173101A	
6	Kit o-ring 2173	-	1	5	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	8720113117A	
7	Rotor FE BCA-40	-	1	-	8701509104A	8701509102A	8701509102A	8701509101A	8701510101A	8701512104A	8701512103A	8701512102A	8701512101A	8701511101A								
(*) 8	Kit fixação rotor	Arruela lisa 1/4 Parafuso S.NF. 1/4X5/8	1 1	1 1	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	8730504101A	
9	Kit difusor BCA-40	Difusor BCA-40 O-ring 2136	1 1	1 1	8701517451A	8701517451A	8701517451A	8701517451A	8701517451A	8701518451A	8701518451A	8701518451A	8701518451A	8701518452A								
10	Kit o-ring 2136	-	1	5	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	8720113118A	
11	Kit parafuso TCC. NC.3/16x1	-	3	5	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	8720138113A	
12	Bujão	-	2	-	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	8720037101A	
13	Kit corpo	Corpo Bujão	1 2	1 2	8701490501A	8701490501A	8701490501A	8701490501A	8701490501A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	8701490502A	
14	Kit válvula de retenção	Peso da válvula Junta da flange Arruela lisa 1/4" Parafuso S.NC. 1/4 x 3/4" Inox	1 1 1 1	1 1 1 1	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	8730554103A	
15	Corpo da válvula	-	1	-	8700134501A	8700134501A	8700134501A	8700134501A	8700134501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	8700135501A	
16	Kit parafuso S.NC. 5/16 x 1"	-	4	5	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	8720129119A	
(**)	Kit mancal MG JPL JJ R	-	1	1	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	8730501101A	
Diâmetro do rotor (mm)					132	135	135	135	136	118	118	118	118	128								

(*) Kit fixação rotor somente para modelos trifásicos.
 (**) Item usado somente em bombas Mancalizadas.
 Para bombas Mancalizadas, substituir item 8 (código 8730504101A) pelo código 8720153101A.

Revisão 00 - Abril/2015

Fonte: Bombas Londrina (2015).

Pode-se observar três conjuntos principais, sendo eles (FERREIRA FILHO & PEREIRA, 2003):

- Corpo: envolvimento do rotor, responsável por direcionar a passagem do fluido pelo equipamento;
- Rotor: pás que impulsionam o fluido; e
- Eixo de acionamento: transporta a força motriz necessária para acionar o motor.

2.2.1.2 Especificações do motor

Para o motor em estudo serão utilizados os dados do modelo BCA-40 1 1/2 com potência de 0,75 (3/4) cv (Figura 3).

Figura 3 – Especificações do Motor BCA-40 1 1/2

Modelo	Potência (cv)	Monofásico	Trifásico	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Pressão máxima sem vazão (m.c.a.)	Altura máxima de autoaspiração (m.c.a.)	Ø Máximo dos sólidos (mm)	Ø Rotor (mm)	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS																				
										Altura Manométrica Total (m.c.a.)																				
										2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32			
										Vazão em m ³ /h válida para a sucção de 0 m.c.a.																				
BCA-40 1 1/2	3/4	x	x	1 1/2	1 1/2	20	7	3	132	10,2	9,7	9,1	8,5	7,9	6,8	5,7	4,6	3,6	2,5	1,5										
	1	x	x	1 1/2	1 1/2	23	7	3	135	*	11,8	11,2	10,6	10,0	8,8	7,7	6,5	5,4	4,2	3,1	1,9									
	1,5	x	x	1 1/2	1 1/2	27	7	3	135	*	14,6	14,1	13,7	13,2	12,3	11,3	10,3	9,2	8,0	6,8	5,4	3,8	2,0							
	2	x	x	1 1/2	1 1/2	30	7	3	135	*	*	*	*	*	19,5	18,4	17,2	16,0	14,6	13,2	11,7	9,9	7,9	5,5	2,4					
BCA-40 2	3	x	x	1 1/2	1 1/2	33	7	3	136	*	*	*	*	*	24,9	24,3	23,5	22,7	21,8	20,7	19,3	17,5	15,3	12,5	9,4	6,4	3,0			
	3/4	x	x	2	2	17	7	3	118	22,3	21,3	20,2	19,2	18,0	15,7	13,0	10,1	6,6	2,1											
	1	x	x	2	2	18	7	3	118	25,4	24,3	23,2	22,1	20,9	18,5	15,8	12,9	9,7	5,9											
	1,5	x	x	2	2	20	7	3	118	29,8	28,5	27,3	26,1	24,9	22,4	19,9	17,1	13,8	9,8	4,9										
BCA-40 2	2	x	x	2	2	22	7	3	118	34,9	33,8	32,6	31,5	30,3	27,7	25,0	22,1	18,9	15,3	11,2	6,2									
	3	x	x	2	2	26	7	3	128	*	*	*	*	*	33,1	30,9	28,5	25,8	22,9	19,5	15,3	9,3								

Fonte: Bombas Londrina (2015).

2.3 Manutenção

Tem-se conhecimento que a prática de manutenção remonta a tempos antigos, mas o termo só ganhou reconhecimento a partir do século XVI, na Europa Central. No início da Revolução Industrial, em meados do século XVIII, na Inglaterra, dava início o surgimento dos instrumentos de produção. Neste período nasce, o conceito da manutenção industrial, do latim *manus tenere*, de manter o que se tem (VIANA, 2002), momento em que os operadores eram treinados para operarem e manterem suas máquinas.

Nos últimos anos, devido à intensa concorrência, os prazos de entrega dos produtos tornaram-se relevantes para todas as empresas. Como resultado, surgiu uma motivação para prevenir falhas em máquinas e equipamentos. Essa motivação

deu origem à prática da manutenção. Em resumo, nos últimos vinte anos, técnicos e empresários têm se preocupado em desenvolver técnicas específicas para aprimorar o complexo sistema envolvendo Homem, Máquina e Serviço (SOUSA, 2019).

Moellmann et al. (2006) asseguram que o grande desafio da gerência é a correta utilização dos recursos produtivos: máquina e mão-de-obra. As empresas cada vez mais buscam a adoção de ferramentas auxiliaadoras na gestão de seus equipamentos e pessoas, assim é possível visualizar a evolução da manutenção pelo Quadro 1.

Quadro 1 – Evolução da manutenção a partir da década de 1950

1980-90	TPM no Brasil Softwares ERP Fundação do JIPM (<i>Japan Institute of Plant Maintenance</i>)	Manutenção baseada nas condições
1970	Incorporação dos conceitos das ciências do comportamento Engenharia de sistemas TPM na Nippondenson	
1962	Engenharia de confiabilidade	
1960	Introdução da prevenção da manutenção	Manutenção baseada no tempo
1957	Manutenção corretiva com incorporação de melhorias	
1954	Manutenção do sistema produtivo	
1951	MP – Manutenção Preventiva	

Fonte: Adaptado de Viana (2002).

A Norma Brasileira regulada pela ABNT (1990), define manutenção na NBR 5462 como “capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”. Dito isso, pode-se afirmar que a manutenção tem impacto direto com a produção da máquina, pois ela é capaz de controlar a quantidade e qualidade dos produtos gerados (BEM-DAYA & DUFFUAA, 1995).

Segundo os autores Kardec e Nascif (2013), a manutenção trata-se de um conjunto de ações realizadas para evitar a degradação dos equipamentos devido ao uso ou desgaste natural. Tais ações visam garantir a disponibilidade dos equipamentos e instalações, atendendo, pois, aos processos de produção, bem como preservar o meio ambiente, levando em consideração alguns princípios como a confiabilidade, segurança e os custos adequados.

Os objetivos mais importantes da manutenção podem ser resumidos da seguinte maneira (SILVA NETO & GONÇALVES DE LIMA, 2002):

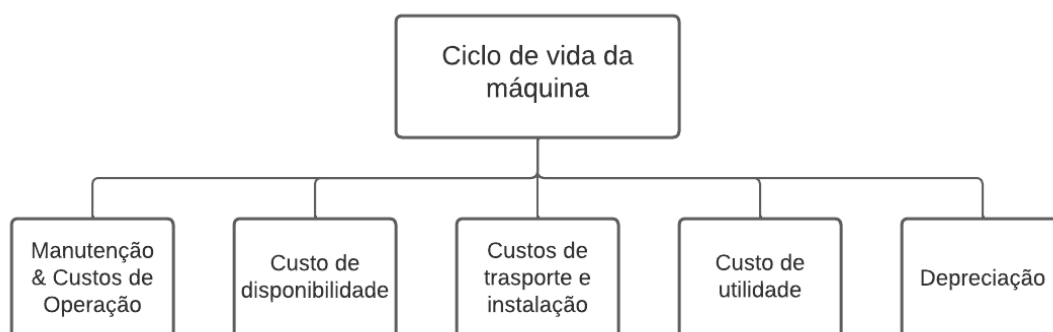
- Prever uma margem de falhas ou quebras durante o processo produtivo;
- Garantir a segurança na utilização dos equipamentos;
- Maximizar a eficácia dos equipamentos;
- Reduzir ao mínimo as paradas por falhas;
- Minimizar os custos relacionados à manutenção; e
- Assegurar um alto nível técnico na execução dos trabalhos.

Portanto entende-se que a manutenção é o conjunto de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão utilizadas no ciclo de vida de uma máquina ou componente (CABRAL et al., 2006 apud FARIA, 2011).

É notável que o objetivo da manutenção é melhorar a qualidade do produto e reduzir custos da operação (ALSYOUF, 2004), pois segundo dados da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) em média os gastos com manutenção, no Brasil, são de cerca de 5% do faturamento bruto total da indústria. Isto posto, o setor industrial representa 23,9% do PIB total do país (CNI, 2022), totalizando quase R\$ 12 bilhões no ano de 2022 (IPEA, 2022).

De acordo com um estudo realizado para analisar o impacto da manutenção no sistema de produção, Enofer & Aimienrovbiye (2010) coletou os seguintes dados na Figura 4.

Figura 4 – Fatores principais que afetam a vida útil da máquina



Fonte: Adaptado de Enofer & Aimienrovbiye (2010).

Com base nesses dados, podemos observar que a manutenção representa uma parte dos custos durante os ciclos de produção de uma máquina. Assim, é possível compreender a importância do investimento com manutenções e paradas programadas. No cenário atual, a quebra de um equipamento pode resultar em grandes prejuízos para a empresa, além de colocar em risco a sua credibilidade, (MARQUES, 2017). Então, existem basicamente três tipos de estratégias de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva.

De acordo com Viana (2002), os tipos de manutenção são as formas de encaminhar as intervenções nos instrumentos de produção, ou seja, nos equipamentos que compõem uma determinada planta. Neste sentido os principais tipos de manutenção são descritos nas seções a seguir.

2.3.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é o tipo de manutenção que busca atender de maneira imediata às necessidades de produção quando ocorre uma falha em um equipamento. Sua filosofia é baseada na ideia de que, quando um equipamento para de funcionar, a manutenção deve agir prontamente para consertá-lo (SANTOS, 2017). Tal manutenção tem por objetivo restaurar a capacidade produtiva de um equipamento ou instalação que tenha apresentado alguma falha ou redução em seu desempenho normal.

Uma vez que uma máquina parada pode afetar toda a produção, a manutenção corretiva é a primeira medida tomada para restabelecer a operação normal. Lacey (1986) declara que Henry Ford em seus estudos afirmava que a manutenção corretiva pode resolver um problema imediato, mas não é uma solução a longo prazo. No entanto, a manutenção corretiva é uma abordagem reativa, pois depende da ocorrência de falhas antes de tomar qualquer ação de manutenção. É uma prática que visa lidar com os problemas à medida que surgem, sem um planejamento antecipado.

De acordo com a norma da ABNT NBR 5462 (1990), a manutenção corretiva é definida como a atividade realizada após a ocorrência de uma falha com o objetivo de restaurar um item e colocá-lo em condições adequadas para desempenhar sua

função requerida. Kardec e Nascif (2013) divide a Manutenção corretiva em duas fases:

- Manutenção corretiva não planejada: correção da falha de maneira aleatória; e
- Manutenção Corretiva Planejada: tipo de manutenção planejada, logo tudo que é planejado é sempre mais seguro e rápido.

2.3.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva consiste em ações proativas que têm como objetivo evitar a ocorrência de falhas por meio da substituição antecipada de componentes do sistema. Essa abordagem baseia-se no planejamento cuidadoso da substituição de peças ou partes de equipamentos que possuem maior probabilidade de falhar durante a operação, caso não sejam substituídas em tempo hábil.

Dessa forma, a manutenção preventiva se mostra adequada para equipamentos em que a taxa de falhas aumenta progressivamente com o uso. Autores como Glasser (1969), Barlow e Proschan (1965, 1975) têm contribuído para o estudo e desenvolvimento desse conceito de manutenção.

2.3.3 Manutenção preditiva

A NBR 5462 também define o termo manutenção preditiva, como “Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva”.

Também, Gartner, uma empresa de consultoria e pesquisa de mercado, respeitada na indústria de tecnologia usa esse mesmo termo como “a manutenção preditiva é um componente vital da transformação digital, permitindo que as empresas detectem problemas antes que ocorram e evitem falhas dispendiosas“. Então, entende-se manutenção preditiva como um método para evitar que a manutenção corretiva ocorra, pois para acontecer a manutenção corretiva a máquina deve estar parada e as peças ou componentes para a continuação da sua atividade devem estar

disponíveis. Isso gera um custo maior caso não haja disponibilidade dos componentes que apresentaram falha, uma vez que há o tempo da máquina parada por apresentar falha, e o tempo até que a máquina seja reparada, para que consiga realizar a sua função corretamente sem que tenha impacto na qualidade do produto.

Baseado no Centro de Instrução e Avaliação da Marinha (2014), são vantagens da manutenção preditiva:

- Ampliação da vida útil das peças e componentes;
- Oportunidade de redução de estoques;
- Redução do trabalho de manutenção corretiva; e
- Facilitação da realização de análises técnicas e financeiras.

A ausência de uma estratégia de manutenção preditiva pode resultar em custos desnecessários quando ocorre uma falha prematura em uma máquina rotativa, além de interromper de forma inesperada um processo produtivo. Com o objetivo de reduzir esses problemas, serão implementadas técnicas capazes de identificar defeitos antes que afetem a máquina como um todo. Isso possibilitará a adoção de uma manutenção planejada e evitará gastos desnecessários com substituição de componentes de máquinas. Dessa maneira, a manutenção preditiva possui um papel fundamental, pois evita que a máquina tenha uma parada indesejada e a produção seja afetada por conta disso.

Em resumo, as diversas abordagens de manutenção, cada uma com custos, níveis de confiabilidade e requisitos técnicos diferentes, estão presentes na Tabela 1 apresentando os principais tipos de manutenção de acordo com suas demandas técnicas (BENEDETTI, 2002).

Tabela 1 – Tipos de manutenção e exigências técnicas

Tipo de manutenção	Exigência técnica
Corretiva	Bom orçamento para manutenção
Preventiva	Estoque de componentes e substituição deles em intervalos determinados
Preditiva	Qualidade do monitoramento dos sinais de interesse

Fonte: Benedetti (2002).

2.4 Falha mecânica

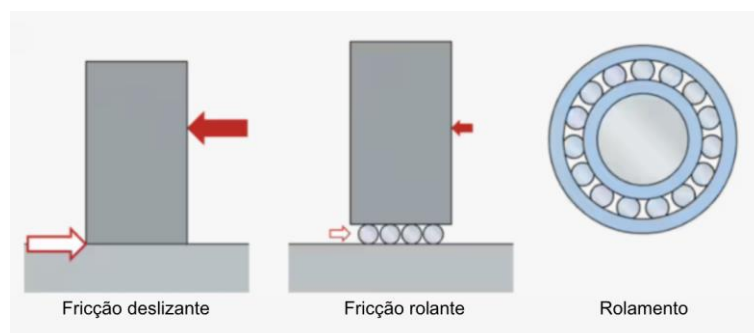
Com o aumento do uso de rolamentos, tornou-se essencial preservá-los em condições que garantam seu bom desempenho e, por consequência, o desempenho adequado do equipamento. A manutenção adequada dos rolamentos assegura o funcionamento satisfatório da máquina e sua maior durabilidade. Uma falha nos rolamentos pode comprometer toda a estrutura da máquina (ISO 9002, 2015).

Logo, a falha mecânica pode ser definida como qualquer alteração nas propriedades mecânicas iniciais do material ou componente, resultando uma mudança na performance ou função inicial esperados (COLLINS, 1993).

2.4.1 Falhas de rolamentos

Rolamentos são componentes de extrema importância em componentes rotativos, pois permitem a relação de movimento entre outros elementos de máquina (HARRIS & KOTZALAS, 2007). Esses componentes conduzem e suportam elementos rotativos, como eixos, distribuindo as cargas entre os componentes das máquinas com o mínimo de atrito, como é descrito na Figura 5. São elementos de menor custo e possibilitam a sua substituição de acordo com padrões estabelecidos internacionalmente. Dito isso, são peças que alcançam altas rotações com baixo calor e ruído, algo que interfere diretamente na performance da máquina (SKF, [s.d.]).

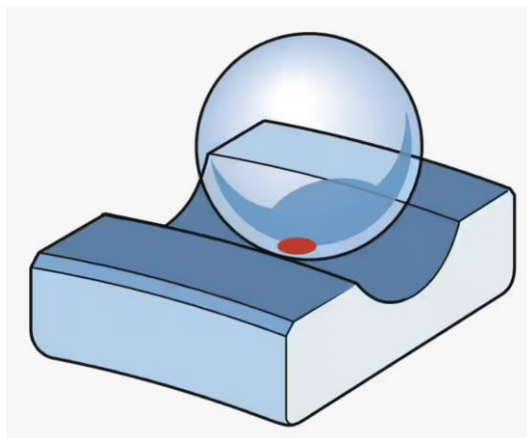
Figura 5 – Comparação de um deslizamento direto na superfície e deslizamento com auxílio de rolamentos



Fonte: Adaptado SKF ([s.d.]).

Existem dois tipos de rolamentos: esféricos e de rolo. O rolamento de esferas possui uma área de contato menor (Figura 6), pois apenas a parte inferior da esfera entra em contato com a pista. Dessa forma, esse tipo de rolamento possui menor atrito e velocidades superiores, porém possui limitações de carga (SKF, [s.d.]).

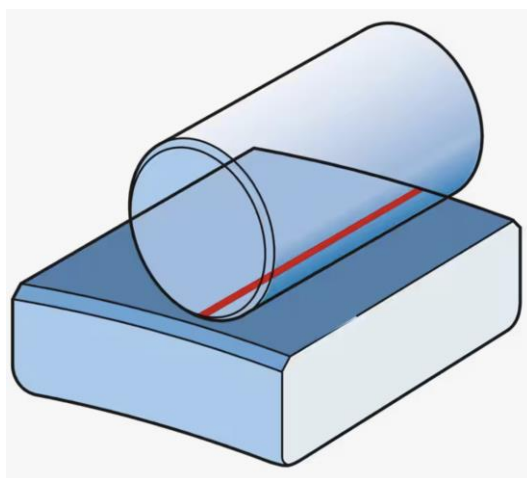
Figura 6 – Área de contato da esfera



Fonte: SKF ([s.d.]).

Já os rolamentos de rolo, o elemento rolante possui uma área de contato maior com a pista (Figura 7), e possui características opostas ao rolamento de esferas, ou seja, suporta maior carga, porém alcança velocidades menores e possui maior atrito com a pista (SKF, [s.d.]).

Figura 7 – Área de contato do rolo



Fonte: SKF ([s.d.]).

Segundo Williams (2001), as falhas de rolamentos são uma das principais causas de interrupção do funcionamento de máquinas, e algumas delas podem ser catastróficas e alcançar custos elevados. O autor também mostra que as falhas são geradas por trincas que são propagadas por: atrito com a superfície, restos de material no lubrificante ou descargas elétricas.

Para a sua detecção utilizando técnicas de vibração é importante destacar que em rolamentos as ondas de frequências não são múltiplas inteiras da frequência natural de rotação (BASTOS & JUNIOR, 2011). Além disso, segundo da Cunha (2016), este componente apresenta três estágios de degradação, sendo eles:

- Estágio inicial: Amplia a energia da banda de 500Hz a 20kHz e nos espectros apenas as harmônicas elevadas acima de 8 são visíveis
- Estágio intermediário: Maior energia nas harmônicas de ordem 4 a 8; e
- Estágio avançado: Abaixa o nível de energia acima de 500 Hz na faixa do espectro, mostrando efeitos de ordem 1 a 3.

Dito isso, como um componente mecânico eles apresentam desgaste ao longo do tempo, fazendo com que a fadiga aconteça de forma natural (BEZERRA, 2004). Porém, o rolamento pode apresentar falhas precoces por motivos de (NEPOMUCENO, 1999):

- Lubrificação inadequada;
- Montagem incorreta;
- Retentores inadequados;
- Desalinhamento;
- Passagem de corrente elétrica;
- Vibrações Externas;
- Defeitos de Fabricação; e
- Fadiga.

Com a falha do rolamento, a máquina não entra em funcionamento até que essa peça seja substituída. Dessa forma, segundo Bombassaro (2020), a máquina possui um custo de horas paradas, que somam os critérios:

- Mão de obra direta;
- Mão de obra indireta;
- Depreciação;
- Manutenção;
- Eletricidade; e
- Outros.

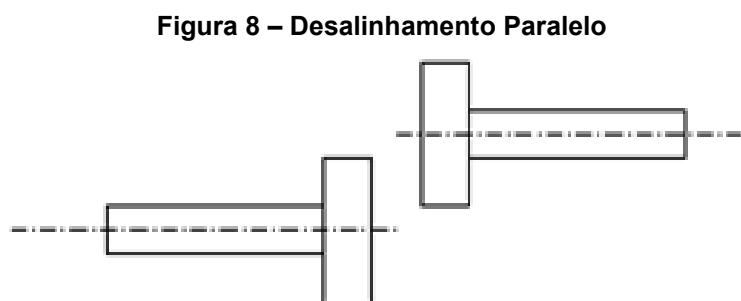
Esses custos podem ser evitados com paradas programadas e análises de vibração para o entendimento do atual estado do maquinário e os rolamentos analisados.

2.4.2 Desalinhamento

Quando os eixos de rotação não estão concêntricos acontece o fenômeno de desalinhamento. Isso gera desarmonia que interfere no funcionamento das máquinas. (LIMA, 2013).

Dito isso, existem dois tipos de desalinhamento (MOUBRAY, 1997):

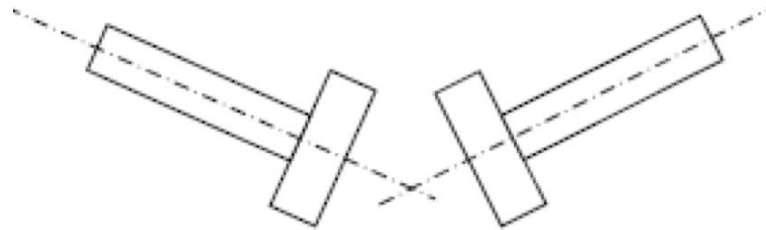
- Paralelo: quando as linhas de centro não são coincidentes (Figura 8);



Fonte: Biesek (2017).

- Angular: quando as linhas de centro são concorrentes (Figura 9);

Figura 9 – Desalinhamento Angular



Fonte: Biesek (2017).

As principais possíveis causas de desalinhamento são (MELQUESEDEQUE, 2011; LIMA, 2013; PRUFTECHNIK, 2002; ARCO-VERDE, 2008):

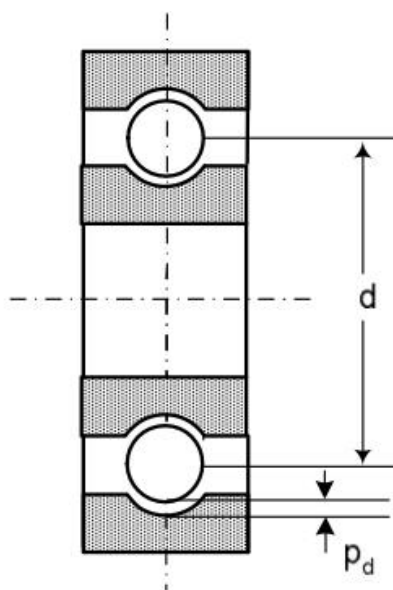
- Junção incorreta dos componentes;
- Movimento dos componentes após serem ligados;
- Dilatação térmica;
- Falta de perpendicularidade da face do acoplamento em relação ao eixo;
- Alinhamento mal executado;
- Pré-carga por eixo fletido;
- Montagem inadequada;
- Variação abrupta de carga na máquina;
- Desgaste de mancais de rolamentos e folgas; e
- “Pé-manco”.

O desalinhamento provoca maior vibração do equipamento, fazendo com que os mancais desgastem mais rapidamente, além de ocasionar falhas em rolamentos e componentes de fixação (BIESEK JÚNIOR, 2017). Também, segundo Cabral et al. (2005), a eficiência energética é reduzida com o efeito do desalinhamento na máquina.

2.4.3 Folgas

Com o movimento dos rolamentos durante o trabalho, os seus componentes sofrem desgaste. Dessa forma, folgas são geradas e interferem na distribuição de cargas, pois o ângulo de atuação de carga diminui com o aumento da folga no rolamento, como é possível observar na Figura 10 (HARRIS, 1991).

Figura 10 – Folga axial no rolamento

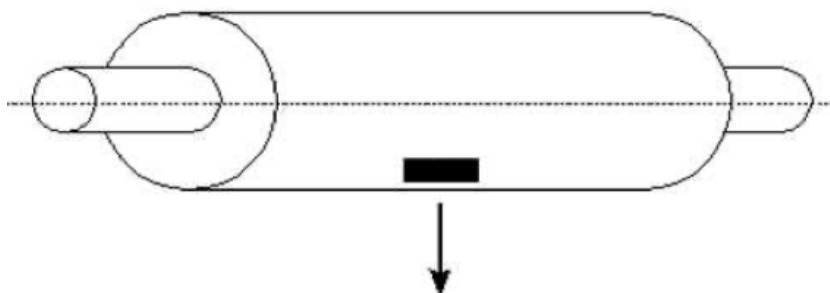


Fonte: Bezerra (2004).

2.4.4 Desbalanceamento

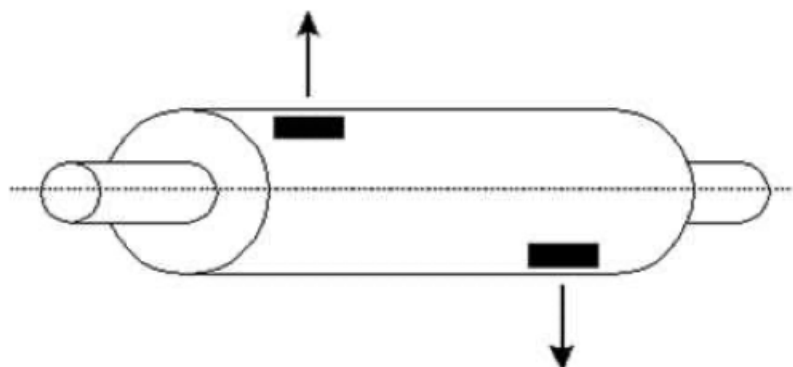
Quando o centro de massa do sólido não coincide com a linha de centro geométrica ocorre o fenômeno de desbalanceamento que, como no desalinhamento, faz com que os componentes (rolamentos) tenham uma carga dinâmica maior que a suportada pelas suas especificações. Existem três tipos de desbalanceamentos (SKF, 2002):

- Desbalanceamento estático: quando apenas uma força está envolvida (Figura 11);

Figura 11 – Desbalanceamento estático

Fonte: SKF (2002).

- Desbalanceamento acoplado: quando duas forças iguais em 180° entre si estão atuando no sólido (Figura 12); e

Figura 12 – Desbalanceamento acoplado

Fonte: SKF (2002).

- Desbalanceamento dinâmico: quando há a combinação dos desbalanceamentos estático e acoplado.

2.5 Sensores para análise de falhas

A ISO 10816 implica que a medição de vibração de partes estacionárias pode ser realizada por sensores de aceleração, velocidade ou deslocamento, sendo determinado pelo critério em que deseja ser realizada a análise.

2.5.1 Acelerômetros

Acelerômetros são sensores que possuem baixo consumo de energia e faixa de atuação em um grande intervalo de temperatura e frequência (0,1 Hz a 30kHz). Eles funcionam de acordo com a 2ª Lei de Newton, em que a aceleração é resultado de uma força agindo na massa. Esse tipo de sensor utiliza a piezoeletricidade (Figura 11) para gerar diferença de potencial.

Quando é aplicada uma determinada força ou pressão, com a vibração da máquina ou componente mecânico, o cristal piezoelétrico sofre uma carga da massa inercial e gera a diferença de potencial (Figura 13). Assim, a força de excitação gera uma carga elétrica proporcional a ela. A carga elétrica pode ser entendida com as equações (BUENO, 2007):

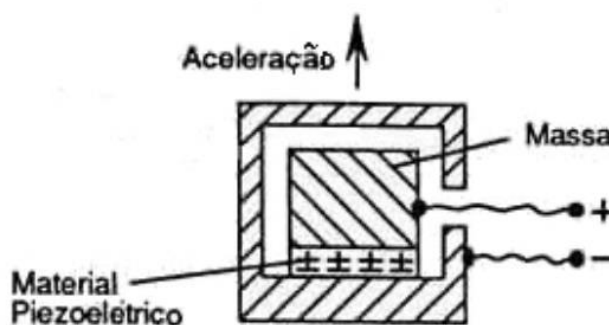
$$F = m * a \quad (01)$$

e

$$q = d_{ij} * F = d_{ij} * m * a \quad (02)$$

para isso utilizamos a fórmula da força F que é calculada por m , sendo a massa do objeto, a sua aceleração, d_{ij} a constante do cristal que é utilizado no acelerômetro, q sua carga elétrica gerada.

Figura 13 – Acelerômetro piezoelétrico



Fonte: Universidade Federal do Ceará – Seara da Ciência (2019).

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 Sensor FLUKE

Para analisar a máquina em estudo e alcançar um nível de manutenção preditiva adequado, será utilizada a análise de vibração por meio de um sensor transdutor, ou acelerômetro.

Esse tipo de sensor utiliza a piezoelectricidade para obter os dados necessários no sistema de medição, que funciona da seguinte forma: existem alguns elementos que quando sofrem deformação geram polarização no material e, conseqüentemente, uma diferença de potencial (MOREIRA, 2021). Com isso, o sinal de vibração mecânica da máquina vai ser obtido através do sensor Fluke 810 (Figura 14), que é um testador e analisador de vibração, em que será possível identificar e localizar possíveis falhas mecânicas de rolamentos e demais componentes. O sensor, além de possuir os dados de frequência de vibração, possui uma tela digital em que mostra um rápido diagnóstico do estado atual da máquina, acelerando a tomada de decisão (FLUKE CORPORATION, 2010).

Figura 14 – Sensor Fluke 810



Fonte: Fluke Corporation (2010).

A Figura 15 mostra o fluxograma dos passos a serem realizados até que os dados sejam obtidos e analisados pelo sensor:

Figura 15 – Fluxograma da medição



Fonte: Autoria própria (2023).

O sensor de vibração utilizado para a medição possui especificações para os diagnósticos que contemplam características de sensor e tacômetro, tais características podem ser visualizadas na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Especificações do Sensor Fluke 810

Especificações do Sensor		
Tipo de Sensor	Acelerômetro	
Sensibilidade	100 mV/g ($\pm 5\%$, 25°C)	
Faixa de aceleração	80 g pico	
Não linearidade da amplitude	bem como a opções e notas de aplicação registrando o seu %2 no site	
Resposta de frequência	Z	2 - 7.000 Hz $\pm 3\text{dB}$
	X, Y	2 - 5.000 Hz $\pm 3\text{dB}$
Requisito de energia (IEPE)	18 VCC a 30 VCC, 2 mA a 10 mA	
Tensão de saída de polarização	12 VCC	
Aterramento	Estojo conectado ao terra	
Design do elemento de leitura	Cisalhamento/cerâmica PZT	
Material do estojo	Aço inoxidável 316L	
Montagem	10-32 parafusos de cabeça de soquete capacitivo, ímã de terras raras de 2 polos (força de 48 lb)	
Conector de saída	4 pinos, M12	
Conector de acoplamento	M12 - F4D	
Memória não volátil	Compatível com TEDS 1451.4	
Limite de vibração	500 g pico	
Limite de choque	5000 g pico	
Sensibilidade eletromagnética, g equivalente	100 $\mu\text{g/gauss}$	
Vedação	Hermética	
Faixa de temperatura	-50°C a 120°C (-58°F a 248°F) $\pm 7\%$	
Garantia	Um ano	

Fonte: Fluke Corporation (2010).

Tabela 3 – Especificações do Tacômetro

Especificações do Tacômetro		
Dimensões (P x L)	2,86 x 12,19 cm (1,125 x 4,80 pol.)	
Peso	96 g (3,4 oz) com cabo	
Alimentação	Alimentado pelo Vibration Tester 810	
Deteção	Diodo a laser classe 2	
Faixa	6,0 a 99.999 rpm	
Exatidão	6,0 a 5.999,9 rpm	±0,01% e ±1 dígito
	5.999,9 a 99.999 rpm	±0,05% e ±1 dígito
Resolução	0,1 rpm	
Faixa efetiva	1 cm a 100 cm (0,4 pol. a 39,27 pol.)	
Tempo de resposta	1 segundo (> 60 rpm)	
Controles	Botão transparente liga/desliga para medidas	
Interface	Mini DIN de 6 pinos	
Comprimento do cabo	50 cm (19,586 pol.)	
Garantia	Um ano	
Acessórios do Tacômetro	Fita refletiva	1,5 x 52,5 cm (0,59 x 20,67 pol.)

Fonte: Fluke Corporation (2010).

Esse tipo de sensor possui algumas limitações para medições de componentes rotativos que operam com velocidade no intervalo de 200 a 12000 rpm, com isso o diagnóstico se mostra preciso apenas para os seguintes tipos de falha (FLUKE CORPORATION, 2010):

- Desequilíbrio;
- Folga;
- Desalinhamento; e
- Falhas em rolamentos.

O fabricante também mostra as informações necessárias para o bom funcionamento do sensor, assim como os dados para a garantia de possuir um diagnóstico preciso para a máquina e os componentes analisados. Tais informações são (FLUKE CORPORATION, 2010):

- Tipo de motor (CA ou CC);
- Caso motor seja CA, se possui VFD (acionador de frequência variável);
- Rotação do motor;

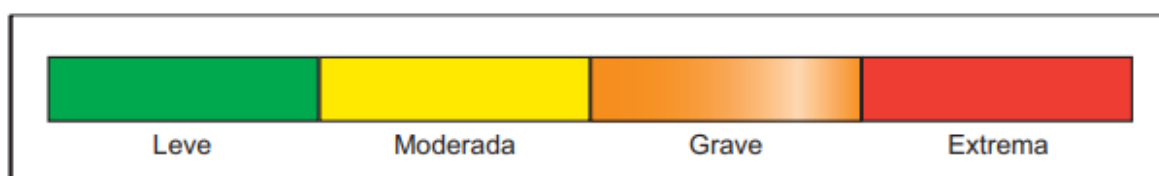
- Potência nominal do motor;
- Montagem do motor (horizontal, ou vertical);
- Tipo de rolamento motor (axial ou rolo); e
- Desconexão do motor com o trem de força (sim ou não).

É de extrema importância que esses parâmetros sejam inseridos corretamente, pois o sensor necessita desses parâmetros para garantir a confiabilidade dos dados obtidos. A orientação do motor e os tipos de rolamento, por exemplo, apresentam tipos de vibração diferentes entre si.

Após isso, é definida a orientação do sensor (axial, radial ou tangencial) e então pode ser realizada a medição da vibração.

Uma grande vantagem do Fluke 810 é que ele verifica problemas de falha de rolamentos, desalinhamento, desequilíbrio e folgas de maneira visual e rápida, através de uma escala de gravidade que é mostrada no visor do sensor (Figura 16) após ser feita a coleta dos dados de medição.

Figura 16 – Escala de gravidade do Fluke 810



Fonte: Fluke Corporation (2010).

A Fluke Corporation (2010), também mostra algumas recomendações de acordo com a escala apresentada na medição, sendo elas:

- Leve: não se recomenda nenhuma ação corretiva;
- Moderada: aumentar a frequência que os testes de vibração são feitos, pois futuramente será necessária uma ação corretiva. O intervalo de tempo para que isso ocorra são de meses ou anos;
- Grave: uma ação corretiva será necessária antes do próximo teste na máquina. O intervalo de tempo para que isso ocorra são de semanas; e
- Extrema: ação corretiva imediata para não danificar a máquina.

A partir disso, são utilizados os métodos de tempo, frequência e a combinação dos dois métodos tempo-frequência para análise e identificação das falhas. Além disso, será apontado o local da falha, assim como a variação do crescimento do nível de vibração de acordo com o tempo (SILVA & MUCHERONI, 2000). Assim, pode-se obter os resultados do comportamento da oscilação da vibração do componente e apontar o componente que precisa de reparo ou substituição.

Além disso, é possível comparar o diagnóstico rápido com a sua escala de gravidade, que o sensor fornece, com os dados obtidos pelos métodos citados anteriormente.

3.2 Escolha da bomba para estudo

Para realizar os testes de vibração com o sensor Fluke foram feitas medições em motobombas dentro do campus (Figura 17).

Figura 17 – Motobombas analisadas



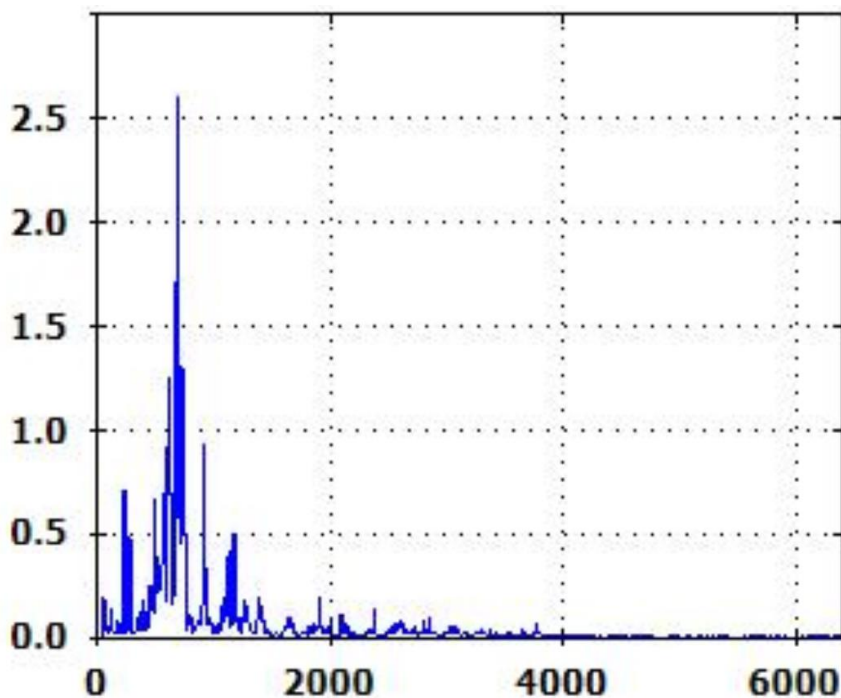
Fonte: Autoria própria (2023).

3.3 Método de análise

O método de vibração para a análise foi a análise da frequência de vibração e velocidade, dessa forma, pode-se encontrar os picos onde as falhas são identificadas e encontrar componentes falhos ou ações que devem ser realizadas para o bom funcionamento do motor.

Pode-se encontrar gráficos gerados pelo sensor durante a medição, onde o eixo X mostra a frequência em Hz e o eixo Y a velocidade em mm/s. Dessa forma, é possível visualizar picos de frequência de vibração de RMS e identificar as falhas. Um exemplo pode ser encontrado no gráfico gerado na Figura 20.

Figura 20 – Exemplo de gráfico de vibração



Fonte: Autoria própria (2023).

3.4 Parâmetros

Os parâmetros utilizados durante a operação da motobomba estão evidentes, conforme Figura 21.

Figura 21 – Parâmetros utilizados

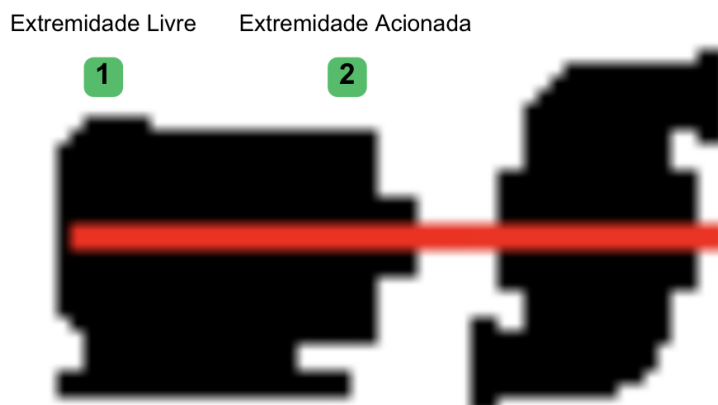
Campo conf.	Entrada
Tipo de motor	CA
Motor CA com VFD	Não
Rotação em RPM	3461.33
kW nominal	0.5
Motor montado	Horizontal
O motor tem	Rolamento de esferas
Motor separado do trem de força	Não
Motor com acoplamento fechado	Sim
Motor diretamente parafusado em	Bomba centrífuga

Fonte: Autoria própria (2023).

Estes dados são essenciais durante a configuração do Sensor Fluke 810, pois os valores de diagnóstico e medição são influenciados pelas informações que são inseridas nessa etapa.

3.5 Locais de medição

A partir da configuração dos parâmetros iniciais, o sensor recomenda dois pontos de medição identificados pela Figura 22.

Figura 22 – Locais de medição

Fonte: Autoria própria (2023).

Assim, pela Figura 22 observa-se o local 1 sendo a Extremidade Livre, constituindo a parte em que não possui carga ou acionamento e para o local 2 observa-se a Extremidade Acionada, ou seja, a parte oposta da Extremidade Livre onde possui o acionamento da máquina e o local onde a máquina realiza o trabalho.

Dessa forma, apresentam-se posteriormente diagnósticos e análises dos dois locais em que foram realizadas as medições, ambos sendo na motobomba em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Diagnóstico inicial

Após realizar medições na bomba em operação o sensor mostra um diagnóstico que constam quatro tipos de falhas na bomba em estudo, tais falhas podem ser observadas na Figura 23.

Figura 23 – Diagnóstico Sensor Fluke 810

Diagnóstico			
Descrição da falha	Gravidade da falha	Pontuação de gravidade	Escala de gravidade
Folga Na Extremidade Acionada	Moderada	48/100	
Desgaste Rolamento De Esferas Da Extremidade Acionada	Moderada	42/100	
Folga Na Extremidade Livre	Moderada	42/100	
Desgaste Rolamento De Esferas Da Extremidade Livre	Moderada	32/100	

Fonte: Autoria Própria (2023).

A tela de diagnóstico resumida do sensor auxilia no processo de tomada de decisão mostrando os pontos mais críticos. Neste trabalho, o foco do estudo são os dois desgastes de rolamentos, pois este é o tipo de falha que mostra ser o mais comum em máquinas rotativas. Assim, com a análise dos gráficos de vibração e o comportamento da máquina, pode-se encontrar diagnósticos precisos da condição deste componente (XU & CHEN, 2013).

Dito isso, considerando os resultados apresentados pelo sensor na tela de resumo de diagnóstico, observa-se que estão evidentes duas falhas de folga e duas falhas de desgaste de rolamento de esferas, sendo todas elas com gravidades moderadas, pois possuem pontuação de gravidade maior que 25 pontos (escala amarela). Esses defeitos foram encontrados pela presença de picos de vibração em frequências harmônicas dos componentes captados pelo sensor durante o seu funcionamento. Para este trabalho, serão detalhadas as análises de falhas de rolamentos e discutidas as suas frequências e picos encontradas pelo sensor.

4.2 Análise das falhas de rolamentos

Na maior parte das vezes, estes erros ocorrem devido a falhas humanas e negligência com o componente, ações como falta de lubrificação, montagem incorreta ou resíduos no componente (NSK, [s.d.]). Dito isso, ao realizar a filtragem das opções do tipo de falha pode-se perceber picos identificados por cada falha de rolamento nos locais 1 e 2 pelas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Picos encontrados no Local 1

Descrição da falha : Desgaste Rolamento De Esferas Da Extremidade Livre

Gravidade da falha : Moderada (32)

Número do pico citado	Rolamento	Eixo	Amplitude da vibração	Ordem	Faixa
Pico citado1	Local1	Radial	1.08 mm/sec	29	Alta
Pico citado2	Local1	Radial	0.86 mm/sec	28.6	Alta
Pico citado3	Local1	Axial	0.77 mm/sec	7.83	Baixa
Pico citado4	Local1	Axial	0.65 mm/sec	12.7	Alta
Pico citado5	Local1	Tangencial	0.42 mm/sec	1.67	Baixa
Pico citado6	Local1	Axial	0.41 mm/sec	16	Alta
Pico citado7	Local1	Tangencial	0.14 mm/sec	33	Alta
Pico citado8	Local1	Tangencial	0.12 mm/sec	12.6	Alta

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 25 – Picos encontrados no Local 2

Descrição da falha : Desgaste Rolamento De Esferas Da Extremidade Acionada

Gravidade da falha : Moderada (42)

Número do pico citado	Rolamento	Eixo	Amplitude da vibração	Ordem	Faixa
Pico citado1	Local2	Radial	1.57 mm/sec	49.8	Alta
Pico citado2	Local2	Radial	1.57 mm/sec	45.6	Alta
Pico citado3	Local2	Axial	1.31 mm/sec	12.7	Alta
Pico citado4	Local2	Axial	1.31 mm/sec	10.7	Baixa
Pico citado5	Local2	Radial	0.31 mm/sec	8.62	Baixa
Pico citado6	Local2	Tangencial	0.19 mm/sec	10.7	Baixa

Fonte: Autoria própria (2023).

Observa-se que somente a visualização desses dados não auxiliam na identificação do tipo de falha e a sua recorrência, isto posto, é necessário realizar a

análise dos gráficos fornecidos pelo sensor e encontrar as falhas observando o comportamento das ondas de vibração.

4.2.1 Falhas por Folga Mecânica

A primeira parte para análise dos picos de vibração é encontrar a frequência natural do sistema, pois quando há a existência de falhas elas são detectadas pela emissão de frequências múltiplas e o entendimento do seu comportamento. Para isso, para encontrar a frequência natural do nosso sistema será utilizada a Equação 03 utilizando a rotação do funcionamento do motor como base para a frequência natural.

$$Frequência\ natural = \frac{Rotação\ do\ Componente}{60} \quad (03)$$

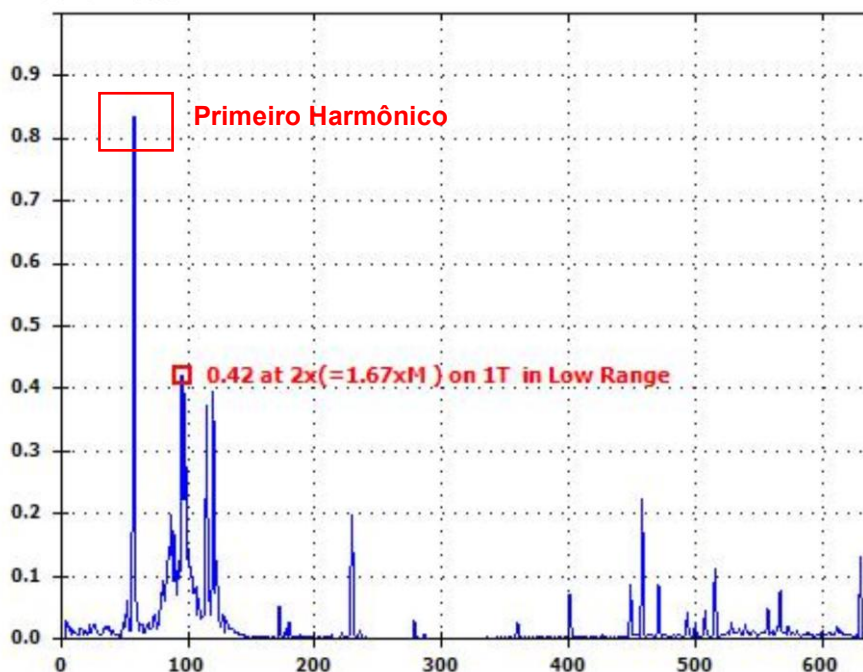
Assim, temos a rotação do motor de 3461 RPM quando em funcionamento, dessa forma, encontramos que a frequência natural do sistema é de 57,7 Hz. A partir disso, podemos realizar análises detalhadas e identificar as falhas pelo comportamento dos picos e os intervalos em que eles são exibidos.

No diagnóstico do sensor é possível observar que há a detecção de folga no sistema, ou seja, existe a permissão de movimento ou grau de liberdade indesejado que não deveria ocorrer no conjunto rotativo quando em operação da máquina. Esse tipo de falha pode ser classificado em três tipos de folga mecânicas:

- Folga estrutural: apresenta uma onda no primeiro harmônico e a sua estrutura de fixação é responsável pela geração deste ruído;
- Folga de parafusos: causado por elementos de fixação (parafusos) que não estão devidamente apertados, gerando um espectro com múltiplos de 0,5x da frequência natural; e
- Folga de componentes rotativos: causado pela folga em componentes que são acoplados ao eixo, principalmente o rolamento, gerando espectros de harmônicos e sub-harmônicos no intervalo de até 10x a frequência natural.

Dito isso, pode-se identificar o comportamento do terceiro tipo de folga mecânica quando é feita a análise gráfica deste tipo de falha, o primeiro grande pico é encontrado no gráfico da Figura 26.

Figura 26 – Gráfico 1: Folga Mecânica



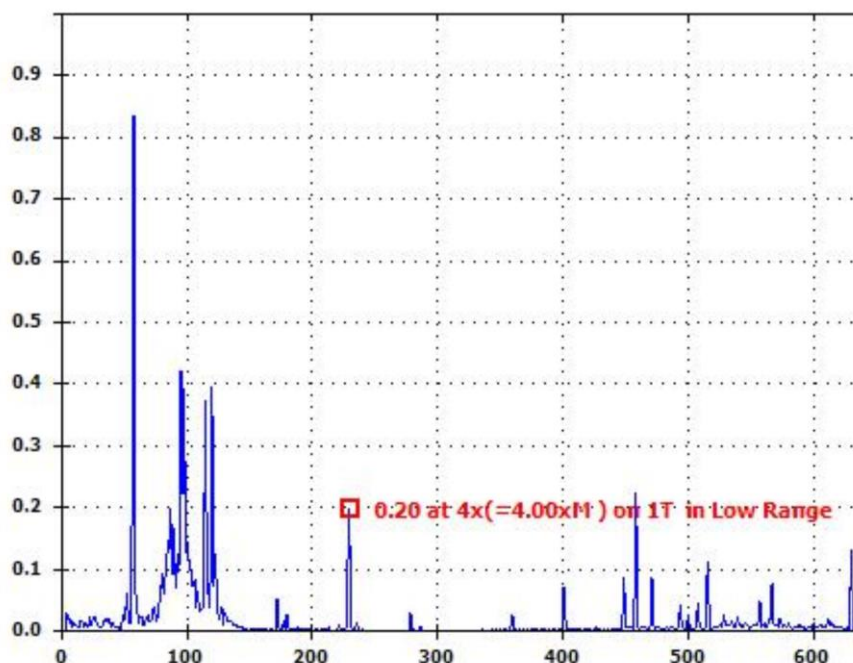
Fonte: Autoria própria (2023).

O primeiro grande pico do gráfico refere-se ao primeiro harmônico, ou seja, a frequência natural do nosso sistema que deve coincidir com a mesma frequência identificada no início da discussão. Dito isso, vemos que este pico é próximo do encontrado pela transformação da rotação em frequência, mostrando o valor próximo de 47,7 Hz.

Partindo para o ponto destacado com pico de 0,42 mm/s observa-se que é um valor de velocidade maior em comparação com os demais picos encontrados no gráfico. Além disso, possui frequência de duas vezes a frequência harmônica, respeitando assim os parâmetros que identificam folga mecânica por componentes rotativos.

Outros picos são encontrados também quando é feita análise do mesmo gráfico, como é possível observar na Figura 27.

Figura 27 – Gráfico 2: Folga mecânica

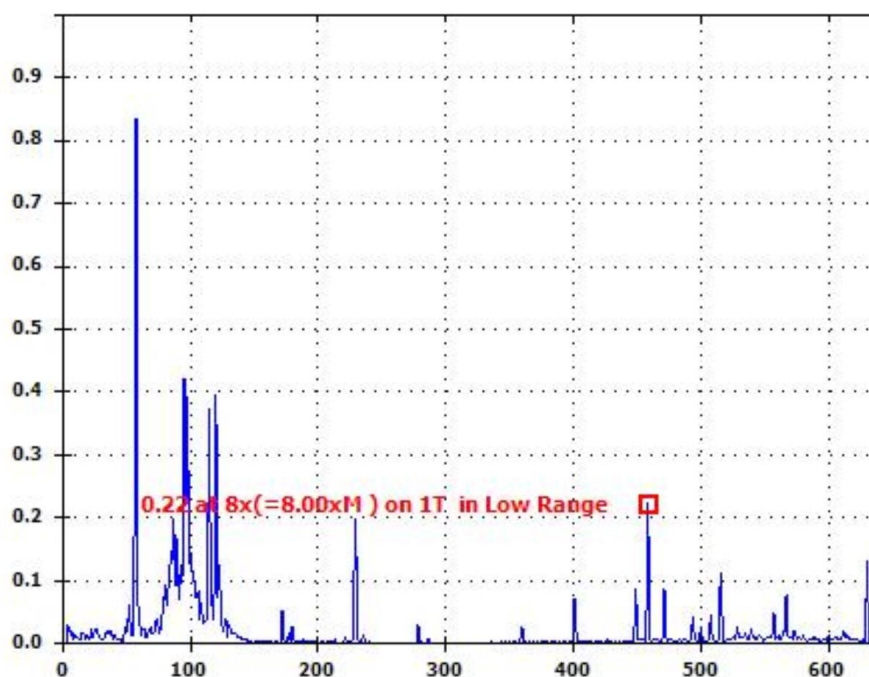


Fonte: Autoria própria (2023).

Da mesma forma, observa-se o comportamento do pico de 0,2 mm/s na faixa de múltiplos da frequência harmônica dentro do intervalo de frequência baixa (até 500 Hz). A partir disso, pode-se encontrar dois pontos que comprovam a hipótese inicial de folga mecânica por componentes rotativos.

Para fortalecer esse resultado a Figura 28 também mostra mais um pico no mesmo intervalo de análise.

Figura 28 – Gráfico 3: Folga mecânica



Fonte: Autoria própria (2023).

Igualmente nos gráficos 1 e 2, pode-se observar o pico de 0,22 mm/s de velocidade no intervalo do múltiplo de 8 vezes a frequência natural do sistema, ou seja, a vibração coincide com a do sistema, levando a análise de que o mesmo componente ou conjunto de componentes está falhando, gerando picos de vibração quando em análise do seu funcionamento.

4.2.2 Falhas por defeito no rolamento

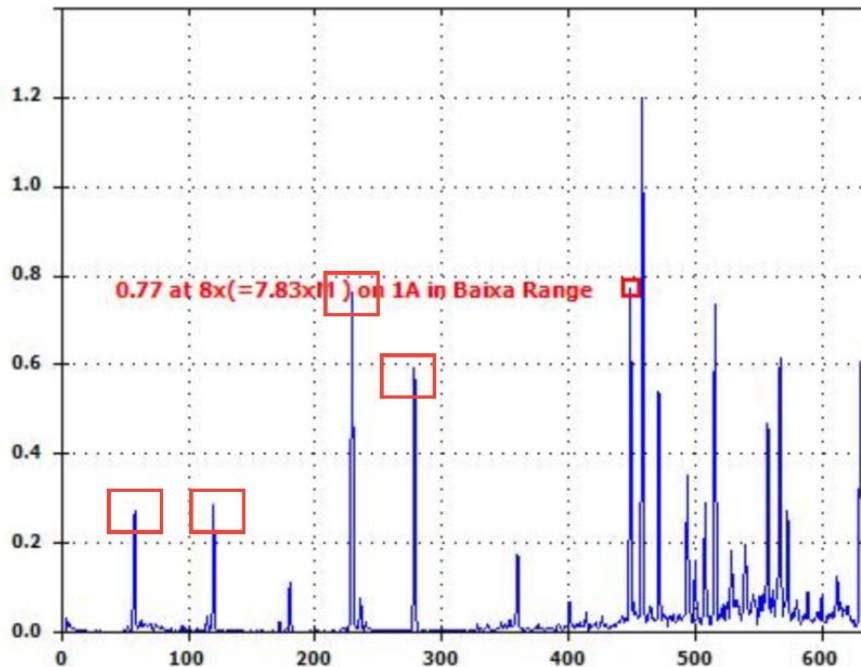
As falhas de apresentadas por defeito no rolamento é a mais presente em análises de vibração, pois se trata de componentes que giram com alta rotação podendo ter contato com impurezas e já saem da fábrica com uma vida útil estabelecida pela fabricante, ou seja, é de conhecimento do projetista e do manutentor que este componente rolante irá falhar e necessitará a troca por um novo componente. Para identificar este tipo de falha, será realizada uma análise similar da identificação de folga no sistema, pois para os rolamentos o entendimento é diferente quando realizada a análise.

Primeiramente, o motor em estudo da fabricante WEG pode possuir vários tipos diferentes de rolamento, que não são identificados nas especificações da carcaça do motor, então para a sua identificação é necessária a abertura do motor e identificação do componente em si. O objetivo deste trabalho é utilizar a técnica de vibração por se tratar de um método não invasivo no sistema, ou seja, que a medição possa ser feita de maneira que não interfira o funcionamento do sistema ou a parada da máquina, dessa forma, a análise para os rolamentos identificará apenas faixa de criticidade da degradação dos componentes internos.

Para os rolamentos, a frequência natural é a mesma do sistema, pois este elemento gira de acordo com a rotação do eixo, porém os múltiplos da frequência natural não precisam ser necessariamente exatos como na análise de folgas mecânicas.

Em baixa frequência os rolamentos da Extremidade Livre (Local 1) possuem os seguintes picos nas Figuras 29.

Figura 29 – Gráfico 1: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Baixa Frequência)



Fonte: Autoria própria (2023)

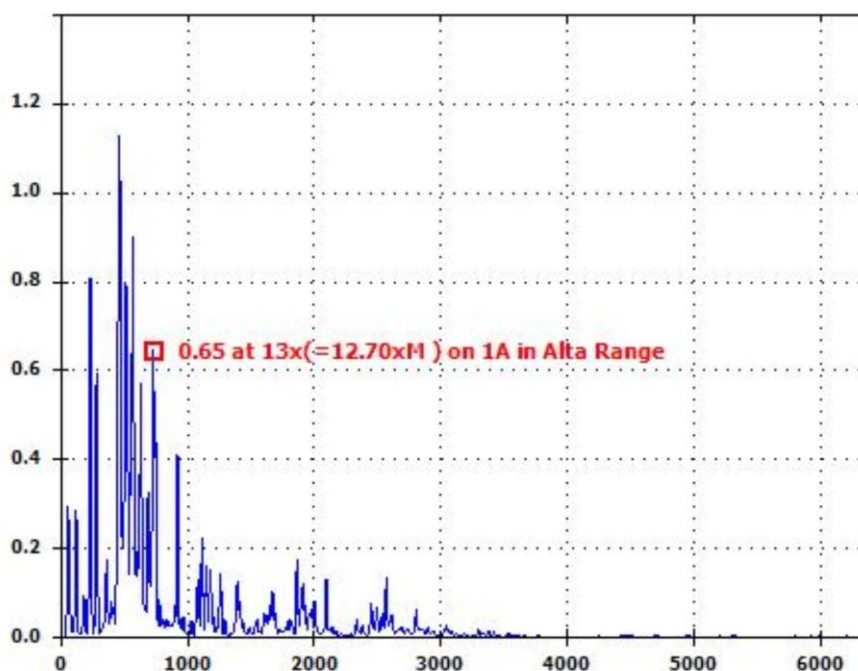
Para estes rolamentos da extremidade livre infere-se que as frequências analisadas estão no intervalo das múltiplas das frequências de 57 Hz, porém não

necessariamente são compostas por múltiplos exatos, como é o caso do ponto em destaque do próprio sensor no pico de velocidade de 0,77 mm/s de 7,83 vezes.

Com esses dados nota-se nos rolamentos deste local existem degradações intermediárias e avançadas nos componentes internos do elemento, pois os picos se concentram no espectro até 600 Hz e formam sequências harmônicas, comportamento comum quando há falha de componentes internos de um rolamento, dito isso, implica-se que durante o movimento das esferas com os anéis interno e externo existe ressonância da peça, fazendo com que o espectro se comporte dessa maneira. Além disso, com o motor em funcionamento é possível ouvir ruído muito perceptível do elemento, dessa forma, encontra-se que o objeto está degradado e pode falhar durante a atividade da motobomba.

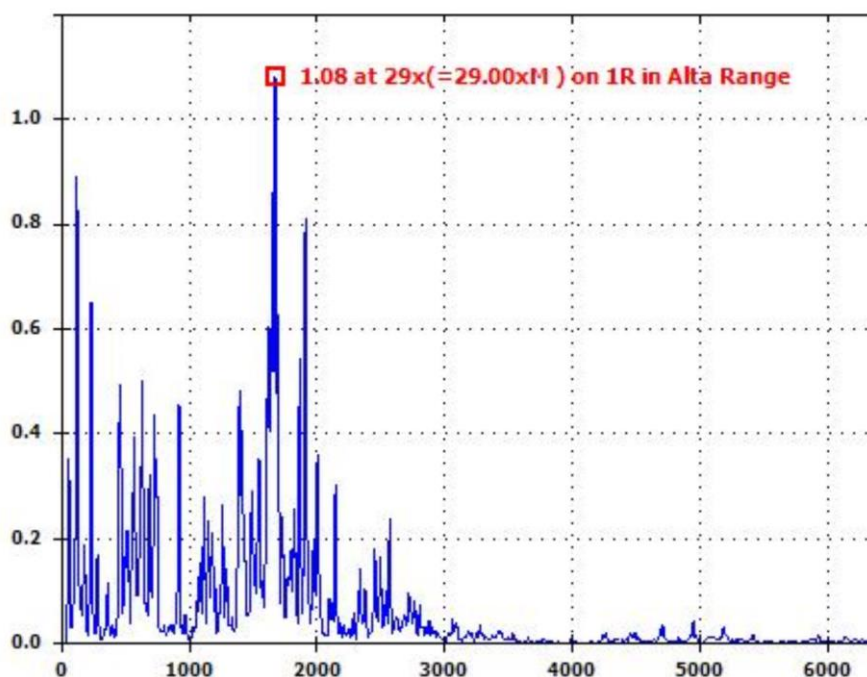
Já para a análise em alta frequência desse local, observa-se os gráficos das Figuras 29 e 30.

Figura 30 – Gráfico 2: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Alta Frequência)



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 31 – Gráfico 3: Falha dos rolamentos da Extremidade Livre (Alta Frequência)

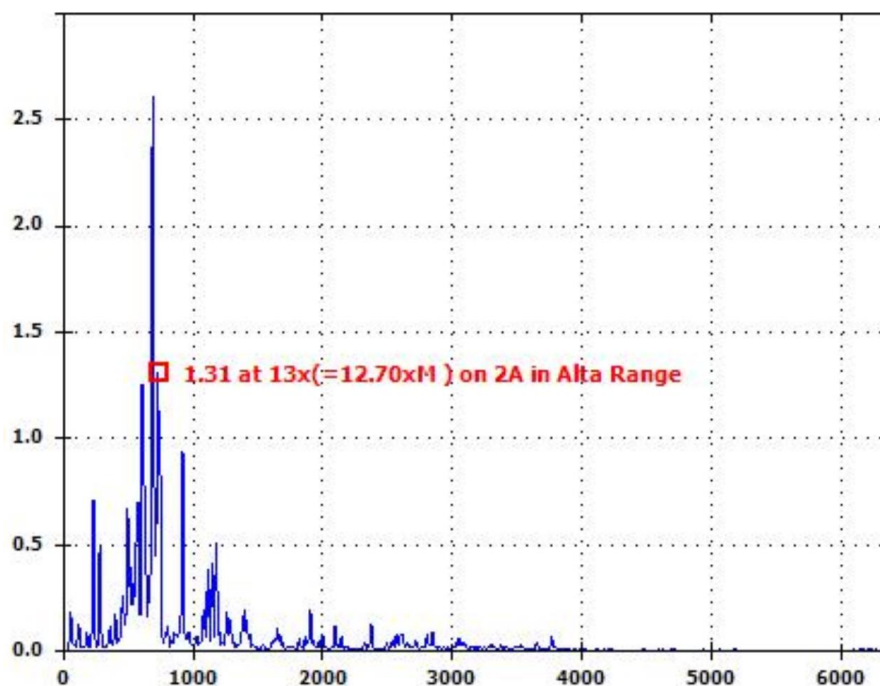


Fonte: Autoria própria (2023).

A partir dessas figuras, pode-se observar picos presentes com múltiplos da frequência natural em alta frequência, ou seja, com ordem maior que 8 vezes a frequência natural. Quando há esse tipo de comportamento do espectro, ou seja, mostra picos em frequências muito altas, no intervalo de 500 Hz até 20kHz, implica-se que o componente possui degradação no estágio inicial, isto é, possui nível básico de falha, mas não é perceptível por ruído como no caso das falhas intermediárias e avançadas presentes no rolamento identificado em baixa frequência. Dito isso, para esse componente vale a verificação das condições do item, como a lubrificação do componente, pois a falta dessa atividade pode implicar no início do dano da peça.

Para a análise dos rolamentos do Local 2 (Extremidade Acionada) foram encontrados picos em frequências altas e baixas, dessa forma, pode-se observar tais picos nas Figuras 31 e 32.

Figura 32 – Gráfico 4: Falha dos rolamentos da Extremidade Acionada

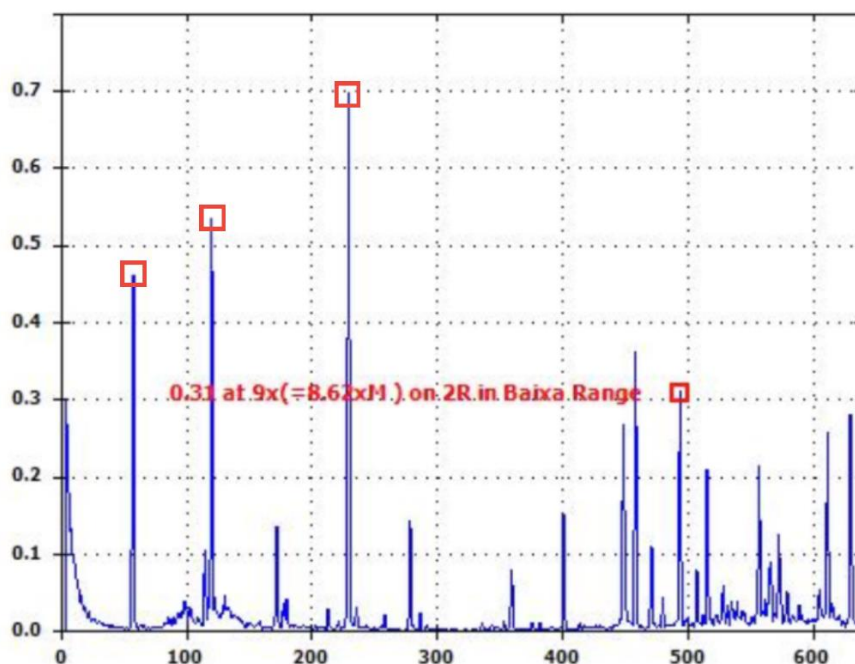


Fonte: Autoria própria (2023).

De forma similar para o Local 1, a análise para este também parte do princípio do comportamento dos picos em altas frequências, identificando falhas iniciais nos componentes internos dos rolamentos que podem ser o começo da deterioração da função do componente.

Agora, para a avaliação dos picos identificados na faixa de espectro de baixa frequência (até 500 Hz), observa-se a Figura 32.

Figura 33 – Gráfico 5: Falha dos rolamentos da Extremidade Acionada



Fonte: Autoria própria (2023).

Com a visualização dos picos gerados na medição, observa-se que assim como nos rolamentos da extremidade livre aqui também existem picos gerados nas frequências harmônicas em frequências inferiores a 500 Hz. Dito isso, somado a hipótese do ruído presente quando a máquina está em operação podemos identificar que o desgaste desse componente já se encontra em um estágio avançado, desgaste que pode implicar na falha catastrófica do componente e interromper o funcionamento do motor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise de vibração e a observação do ruído externo elevado que o motor apresentava em funcionamento, entende-se que a hipótese inicial estava correta e a bomba apresentava falha em seus componentes rotativos.

Com isso, a partir do entendimento dos gráficos de frequências, observa-se que os rolamentos que fazem parte do conjunto do motor apresentam defeitos das três magnitudes: inicial, intermediário e avançado. Também, compreende-se que existe folga no eixo e componentes rolantes, falhas que estão ligadas a falta de manutenção com o equipamento, bem como a falta do acompanhamento do estado dos itens que compõem o conjunto dessa máquina. Com isso, é inerente que estes objetos podem falhar ao acionar o motor e realizar suas atividades.

Dessa forma, como ação corretiva deverá ser realizada a substituição dos rolamentos da extremidade externa e interna por itens novos, pois como são elementos de custo relativamente baixo não há a intenção de reparo, visto que implicaria em um processo com custo maior e mais demorado.

Assim, ao realizar a troca desses componentes por novos, espera-se a melhora na *performance* da máquina, melhor eficiência, disponibilidade, assim como menor ruído e consumo de energia. Além disso, é importante que haja o monitoramento do sistema juntamente com a aplicação de técnicas de manutenção preditiva, uma vez que ao aplicar esses conceitos e desenvolver um plano de manutenção é possível detectar falhas potenciais precocemente, evitar que haja o interrompimento do funcionamento da bomba, preservar a vida útil dos itens, mitigar falhas catastróficas e desgastes antecipados dos componentes internos.

REFERÊNCIAS

- ALSYOUF, I. **Cost Effective Maintenance for Competitive Advantage** [Dissertação de doutorado]. Terotechnology. Växjö University Press, Acta Wexionensia, 2004.
- ANTONI, J.; RANDALL, R. B. **Unsupervised Noise Cancellation for Vibration Signals: Part I** – Evaluation of Adaptive Algorithms. Mechanical Systems and Signal Processing, p. 1-13, 2003.
- ANTONI, J.; RANDALL, R. B. **Unsupervised Noise Cancellation for Vibration Signals: Part II** – Evaluation of Adaptive Algorithms. Mechanical Systems and Signal Processing, p. 1-13, 2003.
- ARCO-VERDE, M. M. **Identificação de Falhas em Sistemas Rotativos Empregando Técnicas Não-lineares**. Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462:Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1990.
- BARBOZA, Tiudorico Leite. **Um histórico da manutenção e conceitos sobre sua função**. Revista Marítima Brasileira. v. 138 n. 10/12 (2018): O Primeiro Grande Passo do Prosub. 2020.
- BARLOW, R.E.; PROSCHAN, F. **Mathematical Theory of Reliability**. John Wiley & Sons, 1965.
- BARLOW, R.E.; PROSCHAN, F. **Reliability and Life Testing Probability Models**. Holt, Rinehart and Winston, 1975.
- BASTOS, R. J.; JUNIOR, R. B. **Previsão de falhas em rolamentos utilizando a demodulação de sinais de vibração**. Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente, 2010. Valinhos, SP.
- BEN-DAYA, M.; DUFFUAA, S. O. **Maintenance and quality: the missing link**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 1, n. 1, p. 20-26, 1995.
- BENEDETTI, Julinho Alberto. **Manutenção Centrada em Confiabilidade e Análise de Vibração**, 2002.
- BEZERRA, R. A. **“Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração”**. D.Sc. Thesis, FEM, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.

BIESEK JÚNIOR, Luís Carlos. **Detecção de Desalinhamento por Análise de Vibração**. Trabalho de Conclusão de Curso. Pato Branco, 2017.

BOMBAS LONDRINA. **Catálogo de Bombas Série BCA-40**. Disponível em: <<https://bombaslondrina.com.br/catalogos/schneiderbombas/BCA-40-2.pdf>>.

BOMBASSARO, Grasiela; BEN, Fernando. **Análise de custos em uma máquina sequencial de uma indústria metalúrgica na serra gaúcha**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências Contábeis) - Universidade de Caxias do Sul, 2020.

BROWN, D. N.; JENSEN, T. **Machine-condition monitoring using vibration analysis**, 2020. Disponível em: <https://www.bksv.com/media/doc/bo0253.pdf>.

BUENO, Douglas Domingues. **Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, São Paulo. 2007.

CABRAL, Juliano C. Silva; BRASIL, Krug Marlon; SILVA, Marcelo C.; GOMES, C. H. **Efeitos do desalinhamento em transmissão de potência motor-bomba**. Ilha Solteira, SP: XII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 2005. p. 2.

CASTEJON, Cristina; LARA, O.; GARCIA-PRADA, J.C. **Automated diagnosis of rolling bearings using MRA and neural networks**, 2010.

CENTRO DE INSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DA MARINHA. **Manutenção Preditiva: uma ferramenta para maximização da disponibilidade operacional das embarcações**. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação na Administração Pública*, v. 3 (n. 1), p. 1-12, 2014.

CHAGSEN, Wan. **Analysis Rolling Element Bearings**. London: Mechanical Engineering Publication, 1987. 410 p.

COLLINS, A. **Mechanical Failures: Mechanisms and Analysis**. [S.l.]: Wiley, 1993. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ootTEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=mechanical+failures+definition&ots=TX2bGLg325&sig=BscJmN8EUBuLS1zhVkYngXASySQ#v=onepage&q=mechanical%20failures%20definition&f=false>.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Informativo Técnico-Científico ITC04- Amortecimento/ATCP: **Amortecimento: classificação e métodos de determinação**. São Carlos: ATCP Engenharia Física, [revisado e publicado online em 01/11/2010]. Disponível em: <www.atcp.com.br>.

COSTA, Melina; STEFANO, Fabiane. “**A era das fábricas inteligentes está chegando**”, 2014.

CUNHA, Paulo Mário da. **Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope**. 2016.

SILVA NETO, João Cirilo da; GONÇALVES DE LIMA, A. M. **Implantação do Controle de Manutenção**. Revista Club de Manutenção, n. 10, 2002.

DUBE, A. V; DHAMANDE, L. S.; KULKARNI, P. G. **Vibration Based Condition Assessment Of Rollingelement Bearings With Localized Defects**. International Journal of Scientific & Technology Research, v. 2, n. 4, p. 149–155, 2013.

ENOFER, Obamwonyi Martyn; AIMIENROVBIYE, Gregory. **Maintenance impact on Production Profitability - A Case Study**. Växjö, 2010. Tese (Doutorado) - School of Engineering, Växjö University. Department of Terotechnology (Total Quality Maintenance).

FEBRAMAT. **Bomba autoaspirante e bomba periférica**: entenda a diferença. Disponível: <<https://febramat.com.br/2021/10/05/bomba-autoaspirante-e-bomba-periferica-entenda-a-diferenca/>>.

FERREIRA FILHO, J.; RODRIGUES, R. C. **Monitoramento e controle de processos, 2 /** — Rio de Janeiro: Petrobras Brasília: SENAI/DN, 2003. 249 p.: il. — (Série Qualificação Básica de Operadores).

FLUKE CORPORATION. **810 Vibration Tester**. Fluke Corporation, 2010, Rev. 3, 9/18.

FRANCO, Hilário, MARRA, Ernesto. **Auditoria contábil**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

GEORGOULAS, G. et al. **Rolling element bearings diagnostics using the Symbolic Aggregate approxImation**. Mechanical Systems and Signal Processing, p. 1–14, 2015.

GLASSER, G.J. **Planned Replacement: Some Theory and its Application**. Journal of Quality Technology, v. 1, n. 2, p. 110-119, 1969.

GLOWACZ, A. et al. **Fault diagnosis of angle grinders and electric impact drills using acoustic signals**. Applied Acoustics, [S.l.], v. 179, p. 108070, 2021.

GOYAL, Deepam; PABLA, Bs. **The Vibration Monitoring Methods and Signal Processing Techniques for Structural Health Monitoring: A Review**. Archives of Computational Methods in Engineering, 2015

HARRIS, T. A. **Rolling Bearing Analysis**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1991. 991 p.

HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. **Advanced Concepts of Bearing Technology**. 5th ed. USA: Taylor & Francis, 2007.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2.ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM, 2006. 474 p.

HOBSBAWM. Eric J. **A era das Revoluções – 1789/1848**. Rio de Janeiro: Ed. Paz e Terra, 1977.

IGLESIAS, Francisco. **A revolução Industrial**, 10ª Edição, São Paulo, Brasiliense, 1990.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Quality management systems — Guidelines for the application of ISO 9001:2015**. United Kingdom: 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines**. Geneva: ISO, 2016.

IPEA. **Desempenho do PIB no quarto trimestre de 2022**. Carta de Conjuntura. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/carta-conjuntura/>.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção – Função Estratégica**. 4ª Edição: Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2013.

LACEY, Robert. **FORD The Men and the Machine**. William Heinemann Ltd, 1 de janeiro de 1986.

Lei, Y., He, Z., Zi, Y., & Hu, Q. 2007. **Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs**. Mechanical Systems and Signal Processing, 21, 2280–2294.

LIMA, I. A. M. **Proposição de uma bancada didática para análise de vibração gerada por desalinhamento e desbalanceamento**. Brasília-DF: Universidade Federal de Brasília, 2013.

MAIS, J. **Spectrum Analysis: The key features of analyzing spectra**. SKF USA Inc., 2016

MARQUES, Emanuely de Arruda. **Uma discussão sobre os modelos que incorporam erro humano na realização da manutenção**. Programa de Pós-Graduação. Recife, 2017.

MASCOLOTI, Gabriela Tavares. **Desenvolvimento e aplicação de módulo de sensoriamento de baixo custo para o monitoramento de saúde estrutural de máquina rotativa**, 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, São Carlos - SP.

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. **Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique - a review**. Tribology international, 1984

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. **Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing**. Journal of sound and vibration, 1984

MCMILLAN, R. B. **Rotating machinery: practical solutions to unbalance and misalignment**. Lilburn: Fairmont Press, 2004.

MELQUESEDEQUE, M. AC. **Identificação de Falhas em Sistemas Rotativos Empregando Técnicas Não-lineares**, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MHF PREDITIVA. **Ressonância**. Disponível em:
https://www.mhfpreditiva.com.br/ressonancia_362061889.pdf.

MITCHELL, John S. **Machinery Analysis and Monitoring**. Oklahoma: Penn Well Books, 1993. 566 p.

MOELLMANN, A. H.; ALBUQUERQUE, A. S.; CONTADOR, J. L.; MARINS, F. A. S. **Aplicação da teoria das restrições e do indicador de eficiência global do**

equipamento para melhoria de produtividade em uma linha de fabricação.
Revista Gestão Industrial, 2006.

MOREIRA, Beatriz Lanna. **Utilização de sensores piezoelétricos para geração de energia elétrica a partir da vibração de motores.** Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Engenharia Elétrica, Campo Grande, MS, 20 de julho de 2021.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance: second edition.** 2ª. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

MÜLLER, Rafael Walter. **ANÁLISE DE FALHA EM ROLAMENTO DE TORNO INDUSTRIAL.** Salão de Iniciação Científica (21.: 2009 out. 19-23: Porto Alegre, RS). Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de Manutenção Preditiva.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999. Cap. XI, Identificação da Origem das Vibrações Monitoração, pp. 410-498.

TIPOS DE FALHAS. NSK. Disponível em: <<https://www.nsk.com.br/tipos-de-falha-129.htm>>.

PAULA, D. C. **Pesquisa-ação sobre o uso de indicadores de desempenho do equipamento em uma fábrica de geradores.** Guaratinguetá, 2011.

PORTAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Importância da indústria.** Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/>.

PRUFTECHNIK. **A Practical Guide to Shaft Alignment.** 4ª ed. [S.I.]: LUDECA Inc., 2002.

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas.** 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SANTOS, R. S. **Detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas utilizando técnicas de processamento de sinais.** Guaratinguetá, 2017. 136 f.

SILVA, Antonio Almeida; MUCHERONI, Mario Francisco. **Monitoramento de condição de rolamentos através da análise conjunta tempo-frequência de sinais de vibração.** Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Campina Grande, PB, Brasil, 2000.

SILVA, Derick Henrique de Jesus. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SKF. General Bearing Knowledge - **Bearing Basics**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge/bearing-basics>.

SOUSA, Muller de Almeida et al. **Manutenção industrial**, 2019.

TANDON, N.; CHOUDHURY, A. **A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings**. Tribology International, v. 32, p. 469-480, 1999.

TSANG, AH. **Condition-based maintenance: tools and decision making**. J Qual Maint Eng, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 3-17, 1995.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Seara UFC. **O acelerômetro**. Disponível em: <https://seara.ufc.br/pt/tintim-por-tintim/tecnologia/o-acelerometro/>.

VIANA, H.R.G. PCM - **Planejamento e Controle da Manutenção**. 1ªed. Rio De Janeiro: Qualitymark, 2002. 192 p.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (WSDoT). **Tale of Three Bridges**. Disponível em: <https://www.wsdot.wa.gov/TNBHistory/tale-of-three-bridges-1940.htm>

XU, H.; CHEN, G. **An intelligent fault identification method of rolling bearings based on LSSVM optimized by improved PSO**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 35, n. 1-2, p. 167–175, 2013.