

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – IFRS
CAMPUS IBIRUBA

JUNIOR JANDREY

IMPLANTAÇÃO DE PROCESSO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DO
MONITORAMENTO REMOTO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO DE UM REDUTOR DE
VELOCIDADE

IBIRUBÁ – RS

2023

JUNIOR JANDREY

IMPLANTAÇÃO DE PROCESSO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA ATRAVÉS DO
MONITORAMENTO REMOTO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO DE UM REDUTOR DE
VELOCIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a banca examinadora do
Instituto Federal do Rio Grande do Sul
Campus Ibirubá, como parte dos requisitos
para obtenção do diploma de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Me. Hermes José
Gonçalves Júnior

IBIRUBÁ - RS

2023

RESUMO

Esse trabalho aborda a aplicação dedicada ao monitoramento remoto de vibração como alternativa para aplicação de técnicas de manutenção preditiva. O trabalho apresenta os principais tipos de manutenção utilizados nas indústrias, enfatizando a aplicação de processos de manutenção preditiva, na qual destaca o monitoramento de vibração como um dos principais métodos para identificar falhas no equipamento. O principal objetivo deste trabalho é implementar a melhoria no processo de manutenção preditiva dedicado ao setor de manutenção da usina hidrelétrica gerenciada pela Coprel. O mesmo dedica-se ao monitoramento automatizado e de forma remota dos níveis de vibração e temperatura de um redutor de velocidade. A manutenção preditiva existente no setor de manutenção se baseava na coleta manual dos níveis de vibração das máquinas com um grande intervalo entre as medições, que eram realizadas de forma manual com um sensor de vibração, o que causava imprecisões nos dados coletados. Dentre os resultados obtidos a partir da melhoria de processo destaca-se a redução das imprecisões nas medidas adquiridas por parte da equipe de manutenção de campo, pois as coletas não precisam ser feitas de forma manual. Padronização na realização das medições, pois as coletas são feitas em intervalos predefinidos e sempre no mesmo ponto. A plataforma de monitoramento adotada possibilita a definição de alarmes quando as vibrações atingem o valor determinado com base nas características de cada rolamento e possibilita a visualização das vibrações características dos tipos de falha dos rolamentos utilizados no redutor.

PALAVRA-CHAVE: manutenção preditiva, aquisição de dados, gerenciamento de ativos, confiabilidade.

ABSTRACT

This work addresses the application dedicated to remote vibration monitoring as an alternative for predictive maintenance techniques. The paper presents the main types of maintenance used in industries, emphasizing the application of predictive maintenance processes, highlighting vibration monitoring as one of the primary methods for identifying equipment failures. The main objective of this work is to implement improvements in the predictive maintenance process dedicated to the maintenance sector of the hydroelectric power plant managed by Coprel. It focuses on the automated and remote monitoring of vibration and temperature levels in a speed reducer. The existing predictive maintenance in the maintenance sector relied on manual collection of machine vibration levels with a large interval between measurements. These measurements were manually performed with a vibration sensor, leading to inaccuracies in the collected data. Among the results obtained from the process improvement, a reduction in inaccuracies in the measurements acquired by the field maintenance team stands out, as collections no longer need to be done manually. There is standardization in measurement execution, as collections are made at predefined intervals and always at the same point. The adopted monitoring platform allows the definition of alarms when vibrations reach the determined value based on the characteristics of each bearing and enables the visualization of characteristic vibrations of the types of bearing failures used in the reducer.

KEYWORD: predictive maintenance, data acquisition, asset management, reliability.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	8
1.2	OBJETIVOS.....	9
1.3	JUSTIFICATIVA	10
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	10
2.1.1	<i>Geração de energia hidrelétrica</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Turbinas axiais.....</i>	<i>12</i>
2.1.3	<i>Multiplicador de velocidade</i>	<i>14</i>
2.2	HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO	15
2.2.1	<i>Manutenção preventiva</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Manutenção corretiva</i>	<i>18</i>
2.2.3	<i>Manutenção preditiva</i>	<i>18</i>
2.3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	19
2.3.1	<i>Método de observação.....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Análise de óleo.....</i>	<i>19</i>
2.3.3	<i>Medição de vibração</i>	<i>20</i>
2.3.4	<i>Análise de vibração.....</i>	<i>22</i>
2.3.5	<i>Métricas para análise de vibração</i>	<i>23</i>
2.3.6	<i>Mancal de rolamento e falhas típicas de rolamento</i>	<i>25</i>
2.4	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1	COPREL GERAÇÃO	29
3.2	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO COPREL.....	30
3.3	ESTUDO DE CASO	32
3.3.1	<i>Plano de manutenção.....</i>	<i>33</i>
3.3.2	<i>Método de controle atual.....</i>	<i>33</i>
3.4	ESTUDO DA MELHORIA	35
3.5	INSTALAÇÃO.....	40
3.5.1	<i>Ativação da plataforma web.....</i>	<i>42</i>
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	45
4.1	COMPARATIVO ENTRE O MEDIÇÃO MANUAL E AUTOMÁTICA	45
4.2	COMPARATIVO ENTRE ANÁLISES EXISTENTES E NOVAS ALTERNATIVAS.....	47

5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6.	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	51
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração de energia por tipo de usina	10
Figura 2: Ilustração de uma usina hidrelétrica.....	11
Figura 3: Turbina do tipo hélice (bulbo).....	12
Figura 4: Turbina do tipo kaplan.....	13
Figura 5: Gerador WEG linha S - vertical	14
Figura 6: Multiplicador de velocidade	15
Figura 7: Histórico da manutenção.....	15
Figura 8: Relatório de análise de óleo hidráulico.....	20
Figura 9: Medidor de vibração.....	21
Figura 10: Acelerômetro medidor de vibração teknikao NK 300	21
Figura 11: Monitor automático de vibração	22
Figura 12: Elementos de um rolamento	26
Figura 13: Divisão do setor de manutenção.....	27
Figura 14: Fluxo do planejamento e controle da manutenção.....	28
Figura 15: Centro de operações Coprel	29
Figura 16: Sala de Planejamento e Controle da Manutenção	30
Figura 17: Tela de cadastros do <i>Engeman</i>	31
Figura 18: Planos de manutenção x aplicação.....	32
Figura 19: Dados técnicos do multiplicador.....	32
Figura 20: Horas de trabalho do multiplicador de velocidade.....	34
Figura 21: Coleta de vibração no rolamento superior do eixo de baixa rotação.....	35
Figura 22: Sensor de vibração HF+	40
Figura 23: Pontos de monitoramento de vibração em um redutor.....	41
Figura 24: Instalação do sensor de vibração.....	42
Figura 25: Plataforma <i>web</i> – <i>Dynapredict</i> – área Coprel.....	43
Figura 26: Cadastro de <i>spot</i> – informações	43
Figura 27: Cadastro de <i>spot</i> – monitoramento	44
Figura 28: Coordenadas do <i>Spot</i>	44
Figura 29: Cadastro de <i>spot</i> – rolamentos	45
Figura 30: Tela de <i>Dashboard</i> da plataforma <i>web</i>	45
Figura 31: Pontos de monitoramento do mancal superior do eixo de baixa rotação .	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Representação de um gráfico de curtose	24
Gráfico 2: Representação de um gráfico de <i>Skewness</i>	24
Gráfico 3: Taxa equivalente de indisponibilidade forçada	36
Gráfico 4: Estimativa de perda de produção	37
Gráfico 5: Velocidade RMS	47
Gráfico 6: Espectro de aceleração do mancal do eixo de alta rotação no lado acoplado	49
Gráfico 7: Espectro de aceleração em cascata	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planos de manutenção.....	33
Tabela 2: Perda de produção	37
Tabela 3: Tempo médio para execução da atividade	38
Tabela 4: Relação de sensores avaliados.....	39
Tabela 5: Pontos de coleta e tempo médio de trabalho	46
Tabela 6: Relação de espectrais disponíveis para utilização	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A manutenção desempenha um papel importante no correto funcionamento da indústria e do efetivo funcionamento dos seus equipamentos, a fim de garantir a maior disponibilidade dos ativos e reduzir os tempos de máquina parada devido à quebra de algum componente (Kardec & Nascif, 2012).

A manutenção já não é mais vista como um empecilho no funcionamento dos equipamentos, pois com a evolução dos sistemas de planejamento e controle da manutenção, conseguimos nos embasar em dados estatísticos para identificar o melhor momento de realizar uma manutenção no ativo (Nepomuceno, 1989).

O setor de planejamento e controle da manutenção é responsável por avaliar o comportamento dos ativos e verificar o melhor método de manutenção para um determinado equipamento, avaliando os custos de manutenção, custos de reposição do ativo, tempo de máquina parada para a correção do problema e até mesmo quando é o melhor período para realizar a substituição completa do ativo devido ao aumento dos custos de manutenção (Kardec & Nascif, 2012).

O principal índice pelo qual o setor de planejamento e controle da manutenção é cobrado se refere ao tempo de máquina disponível, ou seja, a máquina deve estar disponível pelo maior tempo possível para executar o trabalho que ela deve desempenhar.

Para que seja realizado o planejamento de forma assertiva algumas técnicas de manutenção se fazem muito úteis e a principal delas é a manutenção preditiva. Segundo Kardec & Nascif, o objetivo da manutenção preditiva é prevenir as falhas do equipamento através do acompanhamento de parâmetros diversos, o que possibilita que o equipamento fique em operação pelo maior tempo possível, pois o principal termo associado a manutenção preditiva é o de predizer as condições do equipamento.

Segundo Kardec & Nascif, a medição de vibração pode ser realizada tanto de forma manual com um dispositivo portátil, como de forma fixa com um sensor acoplado ao dispositivo, esse segundo método ainda possibilita que os dados sejam coletados de forma automática e em um menor intervalo de medição, além de ser possível a

comunicação remota através de uma rede de comunicação, evitando a necessidade de ir até o local para verificar os níveis de vibração. O método de medição adotado irá depender da criticidade do ativo e o nível de precisão que se desejar da medição.

Com o maior número de informações, o setor de planejamento pode analisar os gráficos de vibração e prever possíveis falhas no equipamento, como por exemplo um desgaste em rolamentos, desalinhamento do conjunto, falha do sistema de lubrificação ou até mesmo um problema de engrenamento em caixas de redução.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal, implementar uma melhoria do processo de manutenção preditiva utilizado atualmente dentro das usinas da Coprel. Visando melhorar a disponibilidade das máquinas da PCH Cotovelo do Jacuí, e aumentar os índices de confiabilidade de seus equipamentos. O estudo se caso de direciona na manutenção preditiva em um multiplicador de velocidades a fim de acompanhar os níveis de vibração dos mancais de rolamento e antever possíveis quebras do equipamento.

Analisar a viabilidade de implementar um sistema de monitoramento online dos níveis de vibração, através da implantação de sensores sem a utilização de cabos de interligação e com um sistema de comunicação, afim de implementar o primeiro ativo com esse sistema de monitoramento remoto de vibração, dentre as usinas da Coprel.

A partir da ativação do sistema de monitoramento remoto tem-se como objetivo a padronização das medições realizadas, reduzir o intervalo entre as medições e possibilitar avaliar os impactos dos níveis de vibração no comportamento do equipamento em questão.

O trabalho visa implementar na forma de um projeto piloto o monitoramento dos níveis de vibração do multiplicador de velocidade, o monitoramento será feito por um sensor com um sistema de comunicação remota com a plataforma web fornecida pelo fabricante.

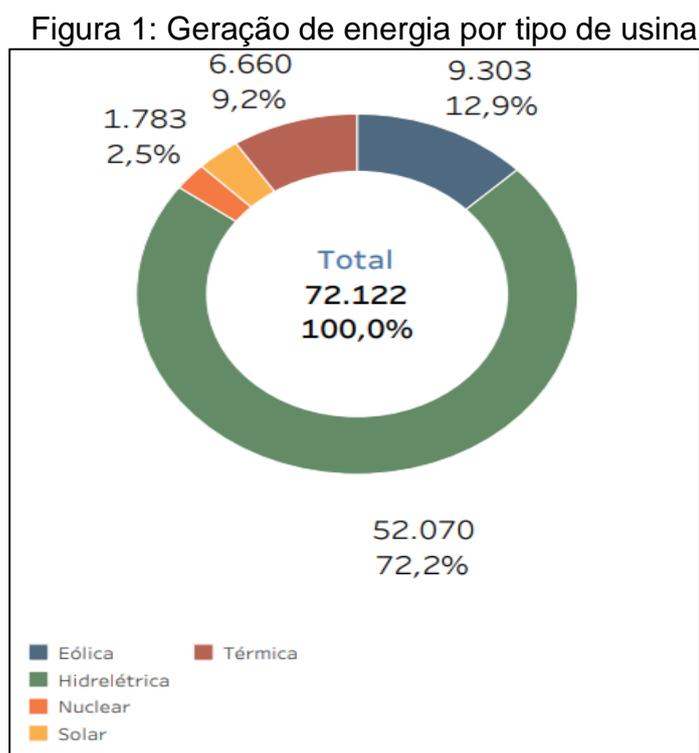
1.3 JUSTIFICATIVA

A demanda por essa melhoria de processo se ocorreu após recorrentes problemas de quebra do equipamento, além do grande intervalo entre as medições realizadas no plano de manutenção existente. O intervalo entre medições não permitia ter a informação do correto funcionamento do equipamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A energia elétrica pode ser gerada de diferentes formas, o operador nacional do sistema elétrico (ONS) fornece relatórios atualizados a cada hora sobre as variações na geração de energia de acordo com cada um dos modos de geração de energia. Como ilustrado na figura 1 a geração de energia mais presente no sistema nacional brasileiro é a hídrica, portanto é uma das mais importantes e confiáveis fontes de geração.

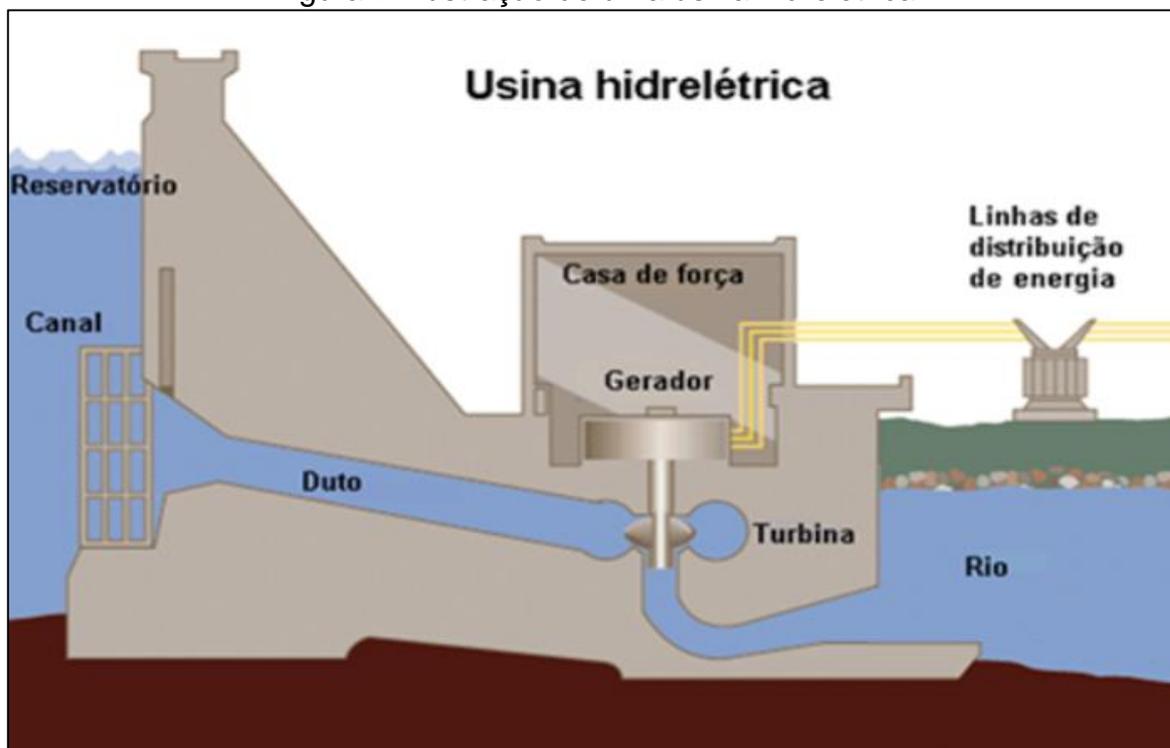


2.1.1 Geração de energia hidrelétrica

“Uma central hidroelétrica ou hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras (barragem, captação e condutos de adução de água [condutos forçados, trecho final inferior do conduto forçado, tubo de sucção], casa de máquinas e restituição de água ao leito do rio [canal de fuga]) e equipamentos (caixa espiral, pré-distribuidor, anel inferior, distribuidor, roda da turbina, eixo inferior da roda da turbina, tampa da turbina, servo motor, aro de operação, cruzeta inferior, bloco de escora, gerador [estator, rotor, enrolamento de amortecimento], cruzeta superior e eixo superior), cuja finalidade é a geração de energia elétrica”(MOURA,A.P.;MOURA A.A.F.;ROCHA, E.P.,2019, p.23)

O sistema de geração de energia de uma hidrelétrica (Figura 2) se baseiam no princípio de diferença de nível entre o reservatório onde é captada a água e o leito do rio, e acumula energia na forma potencial gravitacional da água, essa energia potencial é transformada em energia mecânica no momento em que a água passar pela turbina. A energia mecânica da turbina é transmitida pelo eixo da turbina onde está acoplado um sistema gerador para transformar a energia mecânica em energia elétrica que é distribuída aos consumidores. (MOURA,A.P.;MOURA A.A.F.;ROCHA, E.P.,2019)

Figura 2: Ilustração de uma usina hidrelétrica

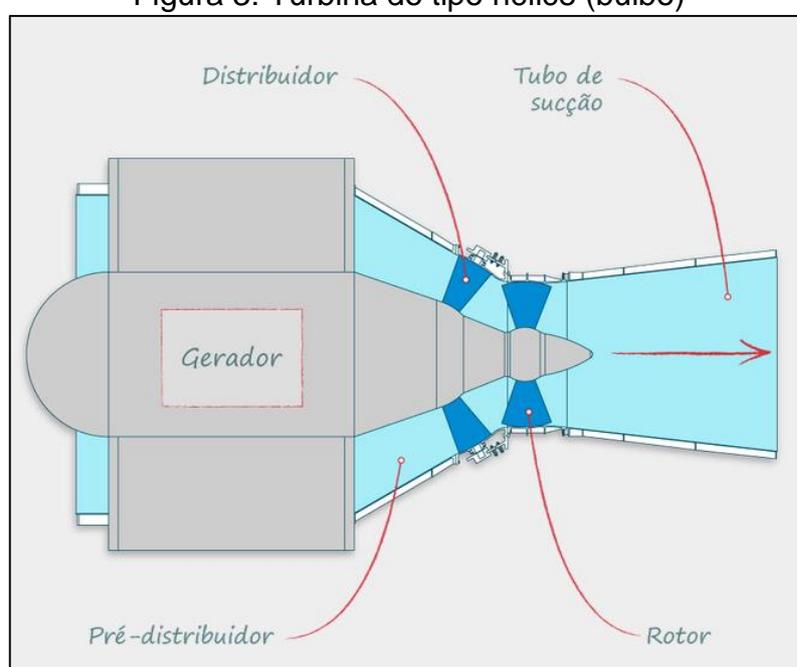


Fonte: DACHERY (2023)

2.1.2 Turbinas axiais

Nas turbinas de fluxo axiais o escoamento ocorre através do rotor e acontece na direção paralela ao eixo do rotor ou axial (HENN, 2006). Como exemplos de máquinas axiais citam-se as turbinas hidráulicas do tipo Hélice (Figura 3) e Kaplan (Figura 4), destas as mais utilizadas em pequenas centrais hidrelétricas (PCH) são as do tipo Kaplan devido ao fato de serem mais indicadas para baixos desníveis entre o reservatório e o leito do rio.

Figura 3: Turbina do tipo hélice (bulbo)

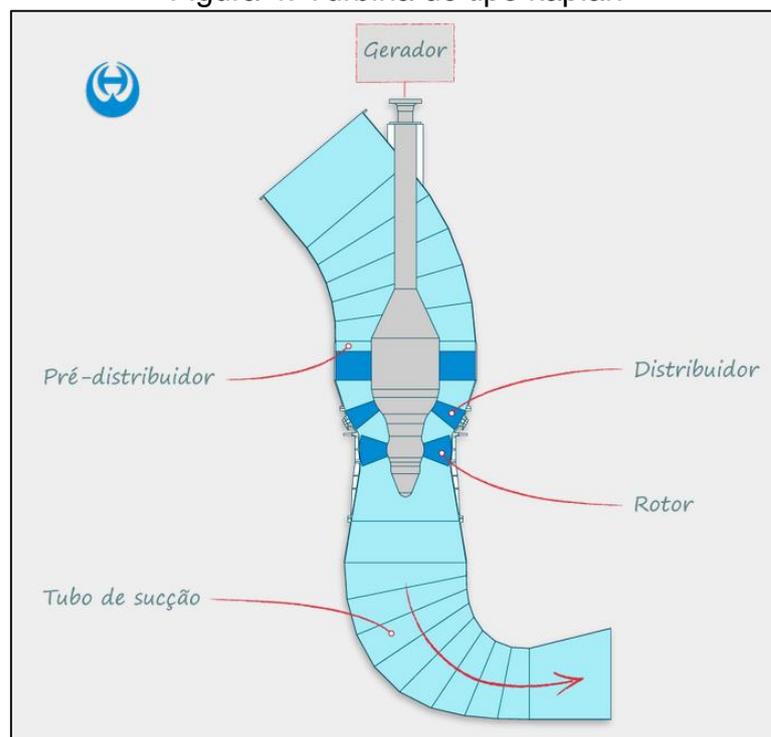


Fonte: Hydrowheel (2023)

As turbinas do tipo Kaplan são predominantemente utilizadas com seu eixo posicionado na vertical como ilustra a figura 4, para SANTOS (2012, p. 35):

O engenheiro Viktor Kaplan (1876-1934), após estudos teóricos e experimentais, concebeu em 1912 um novo tipo de turbina axial, a turbina com rotor de pás móveis, ajustáveis em pleno funcionamento. O seu intuito era melhorar o rendimento médio e a faixa operacional da turbina axial, ao permitir que as pás do rotor se acomodassem melhor ao escoamento vindo do distribuidor em várias condições de funcionamento. Em particular, as perdas por choque na entrada do rotor foram sensivelmente reduzidas.

Figura 4: Turbina do tipo kaplan



Fonte: Fonte: Hydrowheel (2023)

A especificação da turbina ocorre através de critérios técnicos, a (ELETROBRÁS, 2023) define algumas diretrizes básicas para os projetos de usinas hidrelétricas levando em consideração os diferentes tipos de equipamentos disponíveis no mercado. A velocidade de rotação das turbinas e geradores é definido em função da equação (1), onde K é o coeficiente adimensional entre 1300 e 1900; para PCH utilizar o valor 1600, P representa potência da turbina (kW) e H representa a altura líquida da queda.

$$n = \frac{KH_{liq}^{0,75}}{P^{0,5}} \quad (1)$$

Segundo ELETROBRAS (2023) a rotação nominal do gerador é igual à velocidade nominal síncrona da turbina. Quando se torna economicamente inviável trabalhar com a mesma velocidade na turbina e no gerador, a alternativa é o acionamento indireto do gerador através de um multiplicador de velocidade. Neste caso, usualmente utilizam-se geradores de 4, 6 ou 8 pólos. A figura 5 ilustra um gerador do fabricante WEG.

Figura 5: Gerador WEG linha S - vertical



Fonte: Weg (2023)

2.1.3 Multiplicador de velocidade

O multiplicador de velocidade ilustrado na figura 6, consiste em uma caixa de engrenagens projetada para atender a duas faixas de velocidade distintas, onde uma velocidade está associada ao eixo principal e outra ao eixo secundário, além de possuir uma estrutura capaz de resistir aos esforços radiais do movimento, transferindo o trabalho do eixo principal para o eixo secundário.

É um dispositivo largamente utilizado em máquinas que precisam de acoplamento em rotações diferentes, como por exemplo, em uma turbina do tipo Kaplan vertical com 300 RPM acionando um gerador síncrono de 1200 RPM, neste caso é necessário um multiplicador de 4 vezes.

Figura 6: Multiplicador de velocidade



Fonte: Weg (2023)

2.2 HISTÓRICO DA MANUTENÇÃO

Manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT NBR 5462, 1994). A evolução da manutenção ocorre com a revolução da indústria e surgimento de máquinas e equipamentos, podendo ser divididas em quatro gerações que se complementam (Figura 7).

Figura 7: Histórico da manutenção



Fonte: Engeteles (2022).

A primeira evolução compreende o surgimento da manutenção corretiva de forma rudimentar onde as civilizações antigas realizavam reparos em estruturas e equipamentos danificados. Segundo Kardec & Nascif, na época antes da primeira guerra as manutenções eram baseadas apenas de forma corretiva, somente após a falha ou quebra do equipamento.

No período pós-guerra surgiu a segunda evolução da manutenção, isso se dá pelo fato do aumento da mecanização e complexidade das máquinas e equipamentos da industrial acarretada pelo aumento da demanda por produtos ao mesmo tempo em que a mão de obra (força de trabalho) se reduzia devido à intensidade dos conflitos armados. A partir daí surge o conceito de manutenção preventiva onde passou a se tratar de uma forma diferente a falha do equipamento, entendendo que algumas máquinas, como os aviões, não poderiam ser reparadas durante o voo e por isso precisavam de uma manutenção prévia e programada. O custo de manutenção também se elevou em comparação aos custos operacionais, devido ao fato de alguns componentes serem substituídos bem antes do final de sua vida útil (Kardec & Nascif, 2012).

A terceira geração da manutenção ocorre junto com a aceleração dos processos de melhoria industrial onde a necessidade de aumentar a capacidade de produção mantendo os mesmos equipamentos já existentes na fábrica. A maneira encontrada para o aumento da produção seria aumentar a confiabilidade das máquinas e equipamentos, reduzindo o tempo de máquina parada, principalmente em horários de produção. O principal advento da terceira evolução foi o surgimento da manutenção preditiva onde os equipamentos eram monitorados durante seu funcionamento, o que permitia uma avaliação do estado do equipamento para planejar o melhor momento de fazer a manutenção preventiva dando origem a manutenção preventiva baseada na condição. Nesta geração surge também a manutenção centrada na confiabilidade que visa garantir o maior tempo de máquina disponível, levando em conta métodos de análise de falha para projetar uma possível falha em determinado momento. (Kardec & Nascif, 2012).

Com o passar dos anos a necessidade de elevar a confiabilidade dos equipamentos e tirar sempre o máximo de capacidade produtiva surge a quarta evolução da manutenção. Nesta fase se consolida uma estrutura organizacional no setor de manutenção que tem foco em garantir a disponibilidade e confiabilidade dos ativos da indústria. Devido à necessidade de produzir o máximo possível, as

estratégias de manutenção precisaram ser revistas, a fim de reduzir as intervenções nos equipamentos, tanto para manutenções preventivas ou programadas. Um outro marco dessa fase é o aprimoramento, pelos setores de manutenção, da contratação ou terceirização buscando contratos de longo prazo, em uma relação de parceria, com indicadores que medem os resultados que interessam ao negócio, sendo os principais já citados acima: disponibilidade e confiabilidade (Egeteles, 2022).

2.2.1 Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é a manutenção planejada e controlada, realizada em datas predeterminadas (ALMEIDA, 2014). A manutenção preventiva se baseia em históricos das paradas e das falhas atendidas em manutenções corretivas, para projetar o melhor momento de realizar a substituição de um determinado componente do equipamento.

O principal benefício da manutenção preventiva consiste em evitar paradas indesejadas do equipamento, pois os componentes são substituídos antes mesmo da falha, além de que os horários que a máquina ficará parada para manutenção, será em um horário que não afeta o sistema produtivo (ALMEIDA, 2014).

De um certo modo esse tipo de manutenção se baseia na periodicidade de substituição, sugerida pelo fabricante do equipamento, pois em vários casos não se tem um histórico do equipamento, principalmente quando falamos em equipamentos novos na planta fabril. Ponto negativo desse tipo de manutenção é que por vezes os componentes são substituídos antes do final de sua vida útil, que poderiam ser utilizados por mais algum tempo antes da efetiva falha. (Kardec & Nascif, 2012).

A manutenção preventiva pode ser dividida em diferentes técnicas, como:

- Plano de lubrificação – Realizar a lubrificação periódica das partes móveis do equipamento.
- Plano de inspeção – Consiste em inspeção visual do equipamento de um modo geral, habitualmente é realizada pelo operador da máquina.
- Plano de Limpeza – Tem por finalidade manter o bom funcionamento do equipamento evitando o acúmulo de poeira e incrustações oriundas de vazamentos de óleo ou qualquer tipo de lubrificante utilizado.

2.2.2 Manutenção corretiva

Manutenção corretiva é uma política de manutenção que corresponde a uma atitude curativa, ou seja, efetua-se o conserto após avaria (ABNT NBR 5462, 1994). Esse método se refere ao conjunto de procedimentos executados após uma falha no equipamento, ou seja, consiste em esperar que a falha ocorra para realizar a manutenção. Este tipo de manutenção geralmente é a de maior custo para a empresa, devido ao fato de o equipamento sair de operação sem um planejamento de quando a falha vai ocorrer.

Segundo Kardec & Nascif (2012), em alguns casos a manutenção corretiva pode ser viável para a empresa, desde que exista uma política de manutenção corretiva planejada, que pode advir de alguns fatores:

- Pode ser compatibilizado a intervenção com horários alternativos a produção.
- A falha do equipamento não causa nenhum risco a segurança dos trabalhadores nem para a instalação.
- Melhora no planejamento do tempo da equipe de manutenção.
- Garantia de que todos os sobressalentes estarão à disposição, assim como ferramentas e equipamentos necessários.
- Garantia de que os técnicos de manutenção estarão capacitados para execução do reparo.

2.2.3 Manutenção preditiva

É o tipo de manutenção que as intervenções são programadas baseando-se em dados estatísticos e inspeções detalhadas da saúde do equipamento. Nesse tipo de manutenção, as inspeções periódicas se limitam à monitoração de parâmetros que possam indicar o estado operacional de um sistema ou equipamento (ALMEIDA, 2014).

Para a implementação de manutenção preditiva precisam ser avaliados alguns aspectos a fim de manter a efetividade do programa de manutenção, nesta etapa deve ser avaliado a criticidade do equipamento para o processo produtivo da indústria, os critérios deverão estar alinhados às particularidades da planta classificando os equipamentos (Kardec & Nascif, 2012).

2.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

2.3.1 Método de observação

De acordo com Fogliatto & Ribeiro (2011) entende que as pessoas que utilizam o equipamento são as que possuem os maiores conhecimentos referentes a seu funcionamento, por isso o método de observação se dá através da inspeção sensitiva onde o operador da máquina fará uma primeira avaliação do ativo, este operador que perceberá se existe algum ruído diferente na máquina, devido a seus conhecimentos e experiência no convívio diário com o equipamento.

As maneiras mais utilizadas de praticar a preditiva pelo modo de observação são através de inspeções periódicas no equipamento de forma visual. Segundo Kardec & Nascif (2012), a identificação de falhas ocultas também ajuda a garantir a confiabilidade do sistema e que um exemplo simples dessa aplicação é o botão de teste de lâmpadas de sinalização e alarmes em painéis.

2.3.2 Análise de óleo

Alguns equipamentos como transformadores têm um elevado custo para a realização de uma manutenção preventiva sem a certeza que realmente existe um problema no equipamento. A solução para reduzir esses custos de preventiva é acompanhar o estado transformador através da análise do óleo isolante, o comportamento dos gases dissolvidos no óleo pode indicar se existe um risco iminente ao funcionamento do equipamento. Cada um dos componentes internos do transformador caracteriza um tipo de defeito no equipamento (ABNT, NBR 10576, 2017).

Essa análise de óleo também pode ser aplicada em sistemas hidráulicos de lubrificação, onde podemos avaliar a concentração de partículas metálicas no óleo que pode representar um desgaste de um componente interno do sistema, além de avaliar se existe concentração de água no óleo hidráulico (Figura 8). Segundo Kardec & Nascif (2012), o aumento do número da concentração de partículas encontradas na análise de óleo lubrificante, em relação ao seu tamanho, indica que o mecanismo está sofrendo um desgaste abrasivo entre os componentes.

Figura 8: Relatório de análise de óleo hidráulico

DADOS DA AMOSTRA																
Equipamento	Usina Cotovelo															
TAG	MULTIPLICADOR VELOCIDADE UG1															
Óleo Analisado	MOBILGEAR 600 XP 220	ISO VG (40°C)	220													
Tempo de Uso		Volume do Sistema	Litros													
Data da Coleta	01/02/2018	Reposição	Litros													
RESULTADO DA ANÁLISE																
Membrana 5M	Situação*		Legenda													
	Viscosidade 40°C (cSt):	205,11	LT - Leves Traços													
	Presença de Água:	Nil	T - Traços													
	Insolúveis (membrana 5M)		P - Presença													
	Metálicos:	P	PA - Presença Acentuada													
	Não Metálicos:	P	Nil - Nada (Zero)													
			NA - Não Analisado													
*Amostra analisada no laboratório próprio da Lubritec Scherer																
Escala Aceitável de Viscosidade																
ISO / VG	32		46		68		100		150		220		320		460	
Mínimo / Máximo	27	37	39	53	58	78	85	115	128	173	187	253	272	368	391	529
Recomendação																
Elevada presença de insolúveis metálicos e não metálicos. Recomenda-se a troca da carga e uma verificação aprofundada do equipamento.																

Fonte: Coprel (2018).

2.3.3 Medição de vibração

A forma mais importante empregada na técnica de manutenção preditiva é a medição dos níveis de vibração do equipamento, pois com ela estima-se o estado da máquina e dos seus componentes internos.

Uma vez que todo o equipamento rotativo apresenta um determinado nível de vibração, uma alteração do comportamento vibratório pode ser indício do agravamento de um defeito. Um nível de vibração elevado costuma ser consequência do desbalanceamento do rotor, desalinhamento entre o equipamento acionador e acionado, deformações na carcaça do equipamento, roçamento, falhas de lubrificação, desgaste e defeitos superficiais nos seus componentes (Menna, 2007, p.1)

O monitoramento da vibração pode ser realizado de diferentes formas, o principal método de coleta dos valores é manual ou automático, isso vai depender da criticidade do equipamento e da periodicidade das medições requeridas (Kardec & Nascif, 2012).

Medição manual consiste em utilizar um medidor de vibração portátil, onde o técnico de manutenção vai no local e realiza a coleta em pontos predeterminados para

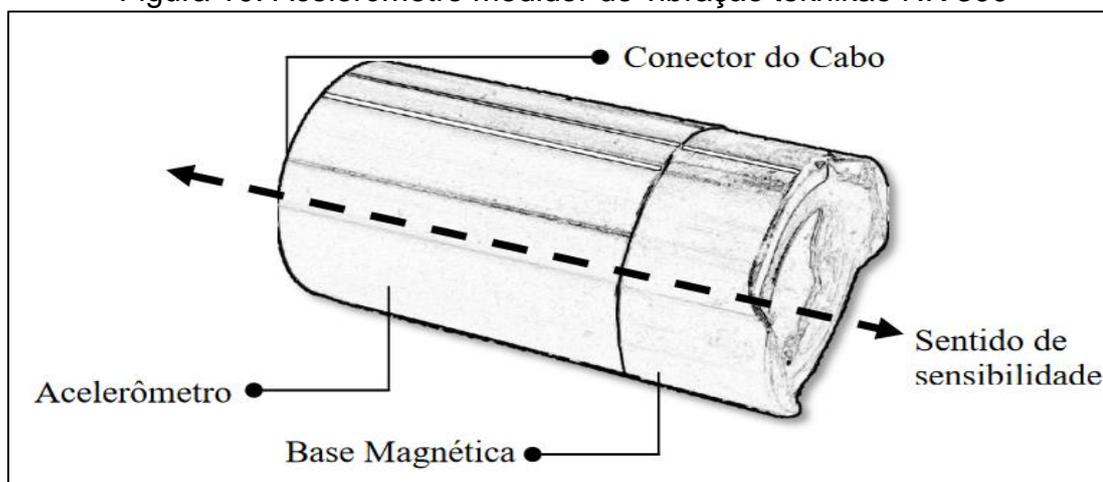
o monitoramento de vibração. O medidor de vibração (Figura 9) é composto por um circuito eletrônico e um sensor acelerômetro de base magnética (Figura 10).

Figura 9: Medidor de vibração



Fonte: Manual NK 300 - Teknikao (2023).

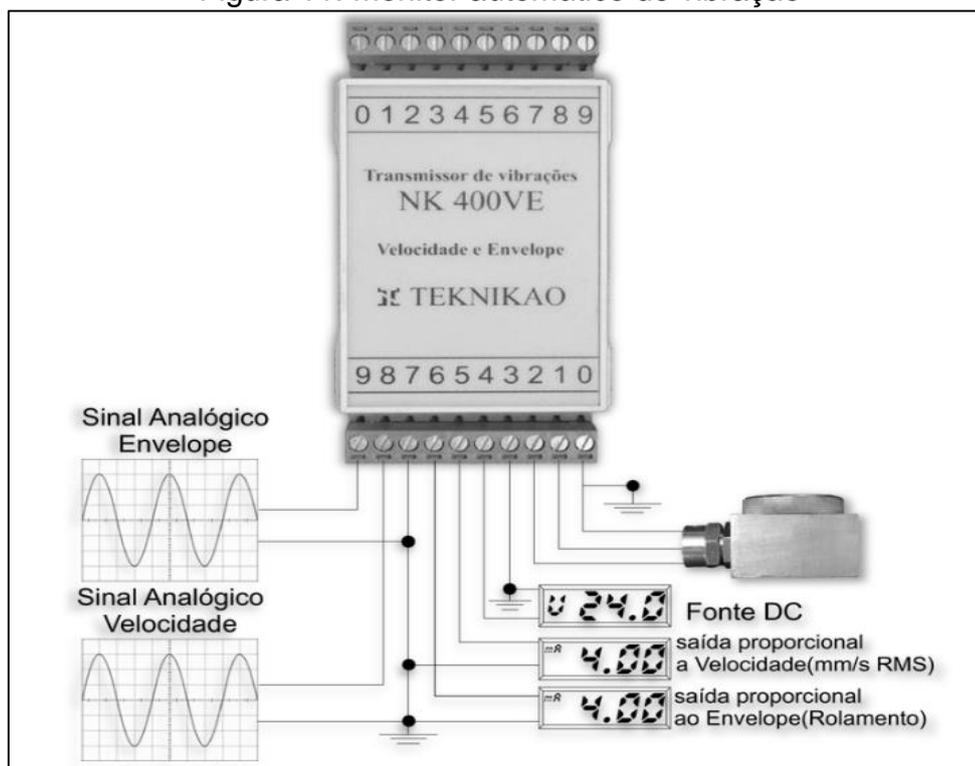
Figura 10: Acelerômetro medidor de vibração teknikao NK 300



Fonte: Manual NK 300 - Teknikao (2023).

O sistema de monitoramento de vibração automática consiste na instalação de um equipamento responsável por monitorar o comportamento da vibração do equipamento de forma contínua e permanente. Nesta aplicação são instalados sensores em pontos estratégicos do equipamento, conectados com um transmissor de vibração (Figura 11) onde os dados são coletados, isso permite a leitura da vibração sem que o operador precise ficar realizando a coleta.

Figura 11: Monitor automático de vibração



Fonte: Manual NK 400 - Teknikao (2023).

2.3.4 Análise de vibração

Os valores de vibração coletados juntos aos equipamentos precisam passar por um processo de avaliação para que se tenha um diagnóstico mais preciso dos impactos desses valores de vibração coletados. De acordo com (Dynamox, 2023) os dados precisam ser transformados em frequência, sendo possível identificá-los através da análise espectral.

Essa análise atua na identificação de diferentes frequências presentes na vibração e determina se há picos ou parâmetros anormais, que possibilitam detectar de forma antecipada o comportamento de um componente ou uma falha no ativo que se está monitorando, Nepomuceno (1989) descreve os principais defeitos como:

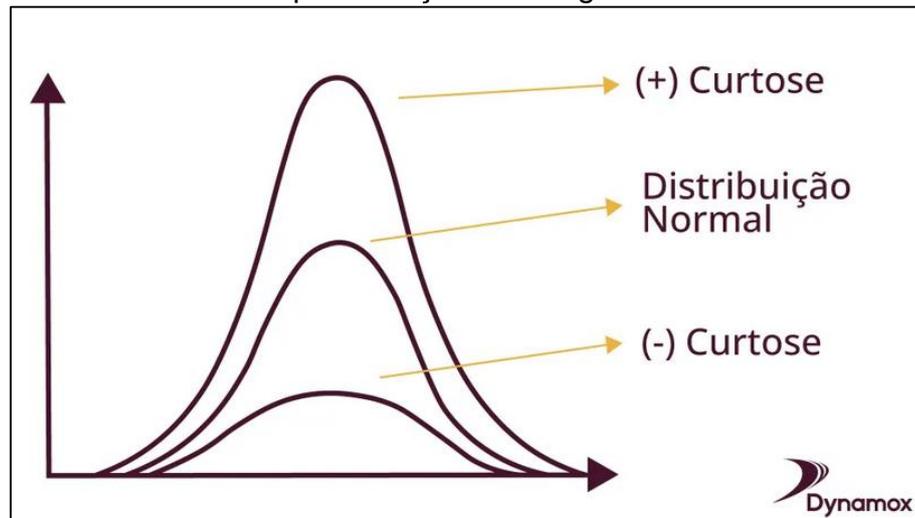
- Falha na pista de um rolamento;
- Desalinhamento entre eixos;
- Deficiência no sistema de lubrificação;
- Engrenagens com defeito;
- Folga excessiva nos mancais;
- Falta de rigidez no sistema de fixação.

2.3.5 Métricas para análise de vibração

As métricas de vibração se referem aos métodos utilizados para analisar as possíveis falhas, essas métricas são divididas em dois principais tipos, as quantitativas que podem ser sinais de Pico, Pico a Pico e RMS. O outro tipo se refere a avaliação qualitativa da forma do sinal de vibrações representadas pela curtose e *skewness* (Dynamox, 2023).

- **Valor de Pico:** é o valor de maior amplitude que o sinal apresenta, pode ser considerado como o valor verdadeiro de pico. Caso esse sinal sofra variação brusca, pode indicar o surgimento de impactos no sinal. (Dynamox, 2023)
- **Valor Pico a Pico:** é o valor de amplitude entre o pico mínimo e o pico máximo do sinal. Sua variação de forma brusca pode indicar o surgimento de impactos no sinal. (Dynamox, 2023)
- **Valor RMS:** é o valor de energia vibratória do equipamento monitorado. Sua variação ocorre de acordo com a evolução de uma falha, isso se dá devido ao aumento do número de picos nas medições realizadas, esses picos cada vez maiores representam um aumento na energia vibratória do equipamento e por consequência o valor RMS aumenta de forma relacionada a evolução da falha. (Menna, 2007)
- **Curtose:** esta avaliação expressa o quão similares os valores de um sinal são, pode ser interpretada graficamente como uma distribuição normal representada pelo Gráfico 1. Em casos onde o sinal apresentar muitos picos distintos a curtose será elevada. Por exemplo, em um rolamento novo o sinal será bastante aleatório e com picos mais baixos o que causa uma curtose baixa, com o decorrer do tempo e elevação desses picos a curtose irá se elevar o que representa que existe uma falha no rolamento. (Santander, 2014)

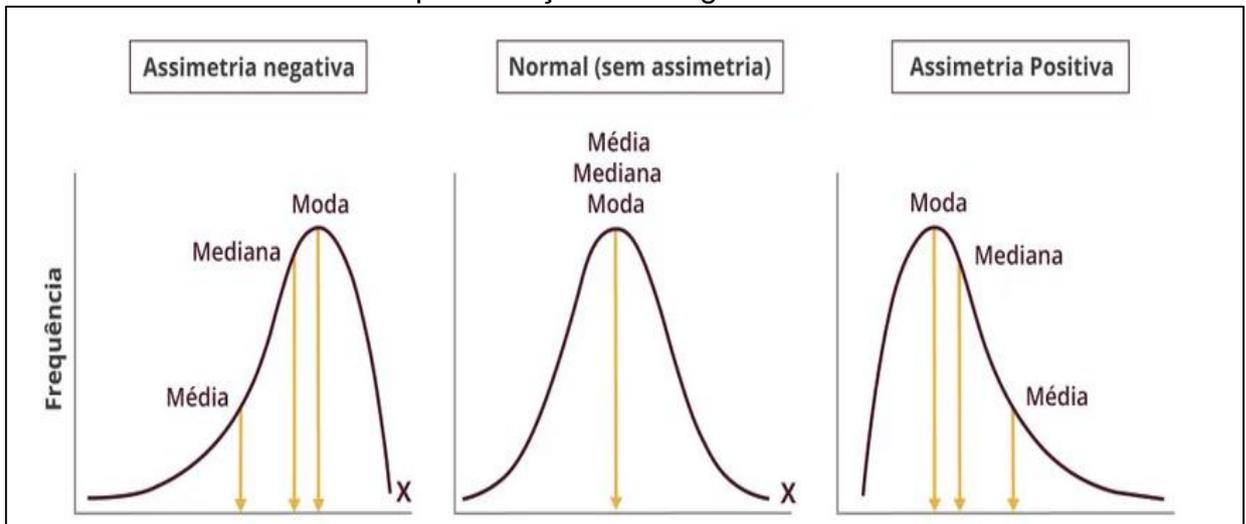
Gráfico 1: Representação de um gráfico de curtose



Fonte: Dynamox (2023)

- **Skewness (Assimetria):** assim como a curtose a *skewness* avalia a qualidade do sinal recebido o Gráfico 2 representa a distorção do sinal. Quando ocorre qualquer tipo de assimetria do sinal avaliado em relação ao ponto zero de vibração tendem ter valores de *skewness* acentuados e por isso representa a existência de alguma falha no equipamento. (Santander, 2014)

Gráfico 2: Representação de um gráfico de Skewness



Fonte: Dynamox (2023)

2.3.6 Mancal de rolamento e falhas típicas

Um mancal de rolamentos é um dispositivo mecânico projetado para fixação de um eixo rotativo à base rígida de uma máquina, sem que seja prejudicado a rotação livre do eixo, proporcionando um movimento suave e eficiente.

Os mancais de rolamento, fabricados para suportar cargas que atuam perpendicularmente ao eixo, tais como os rolamentos dos cubos de rodas, são chamados de rolamentos radiais. Já os projetados para suportar cargas que atuam na direção do eixo são chamados de rolamentos axiais. Um rolamento axial, por exemplo, pode ser utilizado para suportar o empuxo da hélice propulsora de um navio. Alguns tipos de rolamento radiais são capazes de suportar, cargas combinadas, isto é, cargas radiais e axiais (Franceschi & Antonello, 2014,p.44).

Segundo Almeida (2016), o rolamento é um dispositivo utilizado para substituir a fricção de deslizamento entre as superfícies, permitindo o movimento relativo entre duas ou mais partes, reduzir o desgaste e prolongando a vida útil do eixo e do mancal de rolamentos.

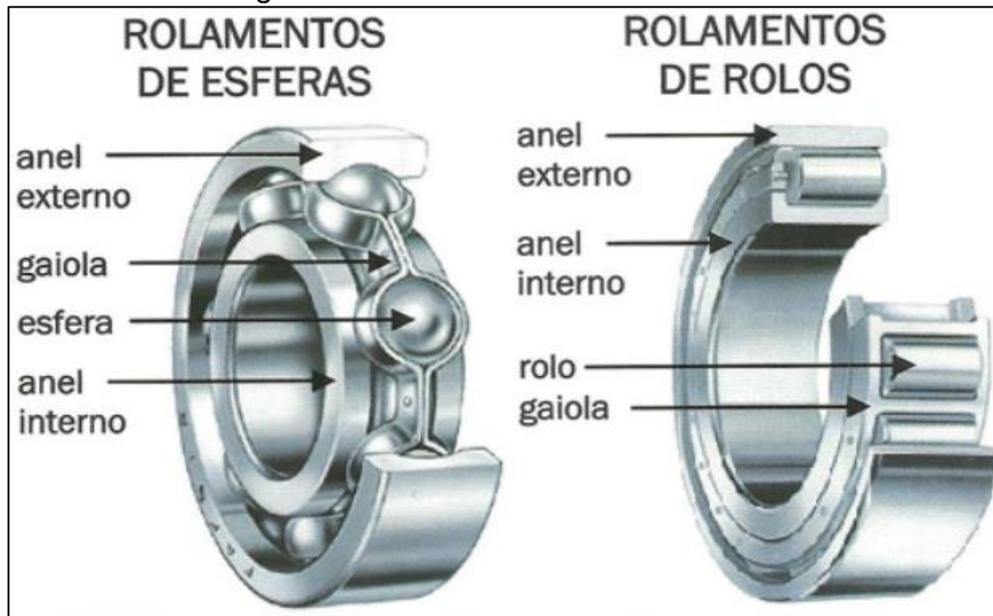
Estes rolamentos estão sujeitos a variações de esforços, o que acarreta o surgimento de variação no comportamento da vibração, tanto do rolamento como do mancal. O comportamento dessas vibrações pode sinalizar o comportamento do equipamento e até mesmo uma falha ou anomalia nos rolamentos.

As frequências características de falhas de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: são assíncronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhecem as características do rolamento que está sendo monitorado (WEBER, 2009).

As frequências de falha em rolamento somente são visualizadas no espectro de vibração se o rolamento apresentar algum defeito, a amplitude desta frequência será a resultante do grau de degradação dos componentes do rolamento (CORONATO, 2003).

Durante o funcionamento do rolamento podem ser identificadas quatro frequências principais de falha dos componentes do rolamento, eles estão associados aos componentes internos do rolamento representados pela figura 12:

Figura 12: Elementos de um rolamento



Fonte: Elgalvao (2023)

- **Defeito BPFI** – Se refere a frequência de passagem dos elementos rolantes sobre um defeito na pista interna do rolamento repetidamente durante a rotação do sistema. O termo vem do inglês *Ball Pass Frequency Inner Race*.
- **Defeito BPFO** – Se refere a frequência de passagem dos elementos rolantes sobre um defeito na pista externa do rolamento repetidamente durante a rotação do sistema. O termo vem do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*.
- **Defeito BSF** – Se refere a frequência de vibração caracterizada pela rotação dos elementos rolantes sobre a sua pista interna, ou seja, o defeito está localizado no elemento rolante e caracteriza defeitos como desalinhamento ou excesso de carga axial do rolamento. O termo vem do inglês *Ball Spin Frequency*.
- **Defeito FTF** – Se refere a frequência característica de defeitos no giro da gaiola ou defeito em alguns dos elementos rolantes. O termo vem do inglês *Fundamental Train Frequency*.

2.4 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO

Para Egeteles (2022), o planejamento e controle da manutenção (PCM) vem a ser o núcleo tático do setor de manutenção que tem por objetivo garantir a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos de forma segura e com melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

O setor de manutenção pode ser relacionado a uma pirâmide, e é dividido em três principais níveis (Figura 13):

Figura 13: Divisão do setor de manutenção



Fonte: Engeteles (2022).

- **Nível estratégico:** é a área responsável por gerir o orçamento da manutenção, monitorar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e buscar o engajamento da equipe em busca dos objetivos.
- **Nível tático:** área responsável por elaborar os planos de manutenção, criar os cronogramas de quando e como as atividades serão executadas, além de apresentar os indicadores do setor de manutenção.

- Nível operacional: é a área responsável por executar a manutenção de acordo com os planos e procedimentos de manutenção, elaborados pela equipe tática.

O fluxo no setor de manutenção (Figura 14) pode vir de duas fontes distintas, a primeira é de uma demanda proativa, onde são gerados os planos de manutenções preventivas ou preditivas para garantir a disponibilidade do equipamento. E o segundo caminho é quando surgem demandas emergenciais de manutenção corretiva, onde o ativo pode estar próximo da falha e continua operando e se pode programar a correção ou quando o ativo já sofreu algum problema e precisa de um atendimento emergencial para que volte a operar o mais rápido possível (Egeteles, 2022).

O PCM é quem realizará a avaliação dessas demandas e redirecionará para a execução da atividade de acordo com os critérios técnicos necessários.

Figura 14: Fluxo do planejamento e controle da manutenção



Fonte: Egeteles (2022).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

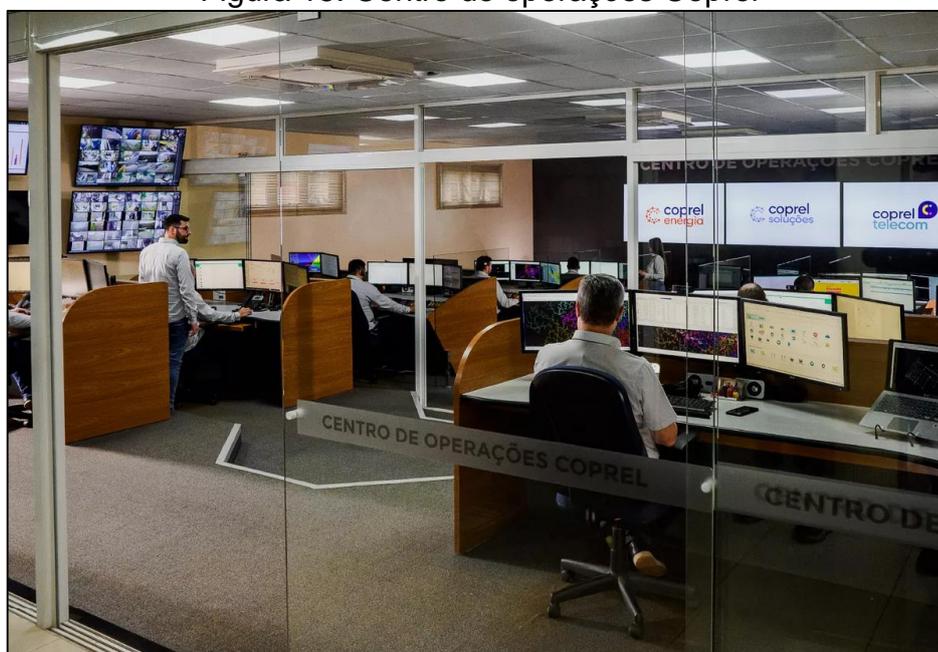
3.1 COPREL GERAÇÃO

A Coprel geração é uma cooperativa criada em 1968 com o objetivo de levar a energia elétrica para as famílias que viviam no interior em uma época onde os recursos eram muito limitados, com o passar dos anos a cooperativa foi ganhando robustez e crescendo cada vez mais, principalmente com a ajuda da comunidade em que ela está inserida.

Com o decorrer dos anos conseguiu viabilizar a construção da primeira usina hidrelétrica própria, e desde então vem crescendo no setor de geração de energia. Com a evolução do setor de geração foi ganhando expertise para também realizar a manutenção de suas próprias usinas e para prestação de serviços de operação e manutenção de usinas.

Atualmente conta com moderno centro de operações de onde monitora e opera de forma remota 13 usinas hidrelétricas (Figura 15).

Figura 15: Centro de operações Coprel



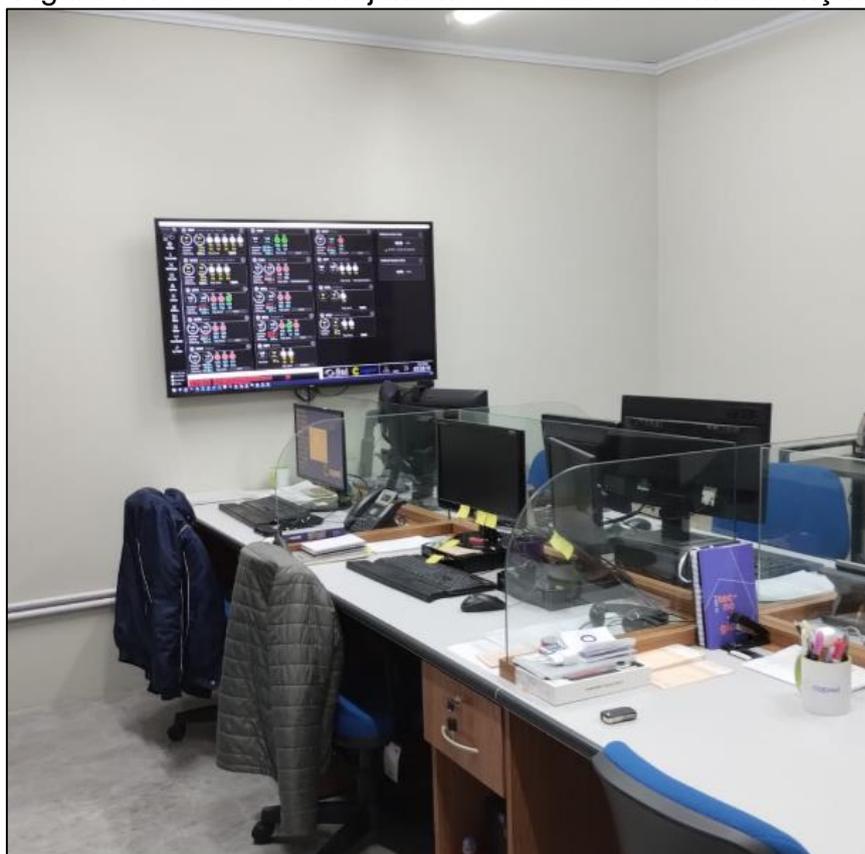
Fonte: COPREL (2023)

3.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA MANUTENÇÃO COPREL

O PCM da Coprel está localizado junto à sede da cooperativa no município de Ibirubá - RS, de onde são gerenciados todos os empreendimentos atendidos pela Coprel geração. O setor é composto por um gerente de manutenção e quatro colaboradores de planejamento e serviços, responsáveis pelo planejamento das atividades realizadas pelas equipes de manutenção.

A equipe de planejamento da manutenção monitora de forma online o estado de todas as usinas operadas pela Coprel, através de um monitor localizado no centro da sala (Figura 16). A equipe está centralizada em um único ambiente para otimizar a comunicação durante todas as etapas do processo de planejamento.

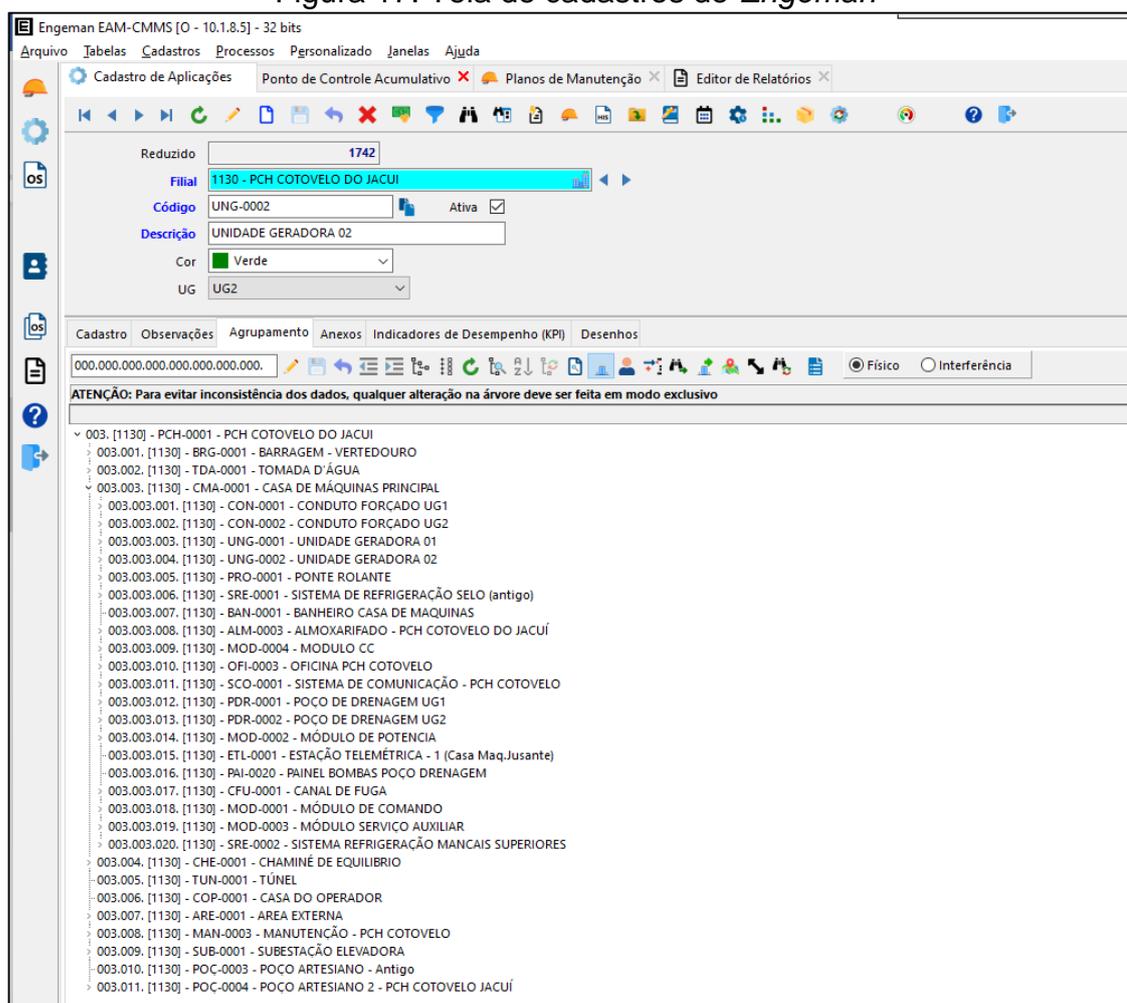
Figura 16: Sala de Planejamento e Controle da Manutenção



Fonte: Autor (2023).

O controle dos ativos da manutenção é feito através do *software* Engeman, onde são cadastrados todos os equipamentos existentes (Figura 17) nas usinas e subestações. Neste *software* são criados os planos de manutenção e todas as ordens de serviço a serem atendidas pelas equipes de manutenção.

Figura 17: Tela de cadastros do Engeman



Fonte: Autor (2023).

Os planos de manutenção são criados de acordo com critérios estabelecidos pelo fabricante dos equipamentos, alguns têm como referência o valor acumulativo de horas trabalhadas e outros por períodos específicos de tempo. As ordens de serviço são geradas automaticamente quando o limite de horas programado é atingido.

A Figura 18 é um relatório obtido a partir do *software* de manutenção onde estão relacionadas algumas aplicações (ativos) em relação ao plano preventivo associado ao equipamento. A mesma figura ilustra a data da última manutenção e a data da próxima manutenção de acordo com a periodicidade especificada no sistema.

Figura 18: Planos de manutenção x aplicação

Filial: PCH COTOVELO DO JACUI					
Aplicação: ACO-0003 - ACOPLAMENTO GERADOR-MULTIPLICADOR					
Plano	Ativo	Últ. Manut.	Período	Prox. Manut	DDS
090 - PCHCJ - MULTIPLICADOR / PLANO LUBRIFICAÇÃO ACOPLAMENTO GERADO	N	14/02/2013	175	22/02/2024	QUI
Aplicação: ACO-0004 - ACOPLAMENTO GERADOR-MULTIPLICADOR					
Plano	Ativo	Últ. Manut.	Período	Prox. Manut	DDS
090 - PCHCJ - MULTIPLICADOR / PLANO LUBRIFICAÇÃO ACOPLAMENTO GERADO	N	13/05/2014	175	12/12/2023	TER
Aplicação: MUV-0001 - MUTIPLICADOR DE VELOCIDADE 1					
Plano	Ativo	Últ. Manut.	Período	Prox. Manut	DDS
091 - PCHCJ - MULTIPLICADOR / PLANO LIMPEZA TROC CALOR DO MULTIPLICAD	S	31/08/2023	182	29/02/2024	QUI
1082 - PCHCJ - MULTIPLICADOR DE VELOCIDADE - FILTRAGEM DO ÓLEO	S	30/05/2023	365	29/05/2024	TER
Aplicação: MUV-0002 - MUTIPLICADOR DE VELOCIDADE 2					
Plano	Ativo	Últ. Manut.	Período	Prox. Manut	DDS
091 - PCHCJ - MULTIPLICADOR / PLANO LIMPEZA TROC CALOR DO MULTIPLICAD	S	15/06/2023	182	14/12/2023	QUI
1082 - PCHCJ - MULTIPLICADOR DE VELOCIDADE - FILTRAGEM DO ÓLEO	S	30/04/2023	365	29/04/2024	DOM
Aplicação: MUV-0003 - MUTIPLICADOR DE VELOCIDADE 3					
Plano	Ativo	Últ. Manut.	Período	Prox. Manut	DDS
091 - PCHCJ - MULTIPLICADOR / PLANO LIMPEZA TROC CALOR DO MULTIPLICAD	S	03/05/2023	182	01/11/2023	QUA
1082 - PCHCJ - MULTIPLICADOR DE VELOCIDADE - FILTRAGEM DO ÓLEO	S	30/03/2023	365	29/03/2024	QUI
Emitido em: 12/10/2023 17:00:23					

Fonte: Autor (2023).

3.3 ESTUDO DE CASO

A PCH Cotovelo do Jacuí dispõe de duas unidades geradoras com turbinas do tipo Kaplan S vertical de marca Hacker 1,766 kW de potência e velocidade nominal de 300 RPM acoplada e um Gerador de marca WEG do tipo SSA560 com potência nominal de 2000 kVA a uma velocidade de 1200 RPM.

Para o funcionamento do conjunto turbina gerador precisamos da instalação de um multiplicador de velocidade entre os dois equipamentos, devido à diferença de rotação nominal de cada um dos equipamentos, a figura 19 apresenta os dados técnicos do multiplicador utilizado no empreendimento. Onde já se percebe a criticidade do componente, pois sem ele o sistema não pode operar corretamente.

Figura 19: Dados técnicos do multiplicador

Dados técnicos	
Fabricante	Flender
Multiplicador tipo	SENS 500E/4
Potência turbina	1775 kw
Rotação de entrada	306,93 rpm
Rotação de saída	1200 rpm
Redução nominal/exata	4 / 3,91
Fator de serviço	2,4
Volume de óleo	~140 litros
Tipo de óleo	Vg 220

Fonte: Coprel (2023).

3.3.1 Plano de manutenção

Os planos de manutenção referentes ao multiplicador de velocidade, foram criados conforme as orientações do fabricante do equipamento. Como preventivas estão cadastrados os planos de manutenção conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Planos de manutenção

PLANO DE MANUTENÇÃO	TIPO DE PLANO	PERIODICIDADE
MULTIPLICADOR / PLANO LIMPEZA TROCADOR DE CALOR DO MULTIPLICADOR	PERIÓDICO / PREVENTIVO	182 DIAS
MULTIPLICADOR DE VELOCIDADE - FILTRAGEM DO ÓLEO	PERIÓDICO / PREVENTIVO	365 DIAS
PLANO DE SUBSTITUIÇÃO DE ROLAMENTOS E RETENTORES	ACUMULATIVO / PREVENTIVO	30000 HORAS
CHECK – LIST DA PCH COTOVELO DO JACUÍ	PERIÓDICO / PREDITIVO	30 DIAS

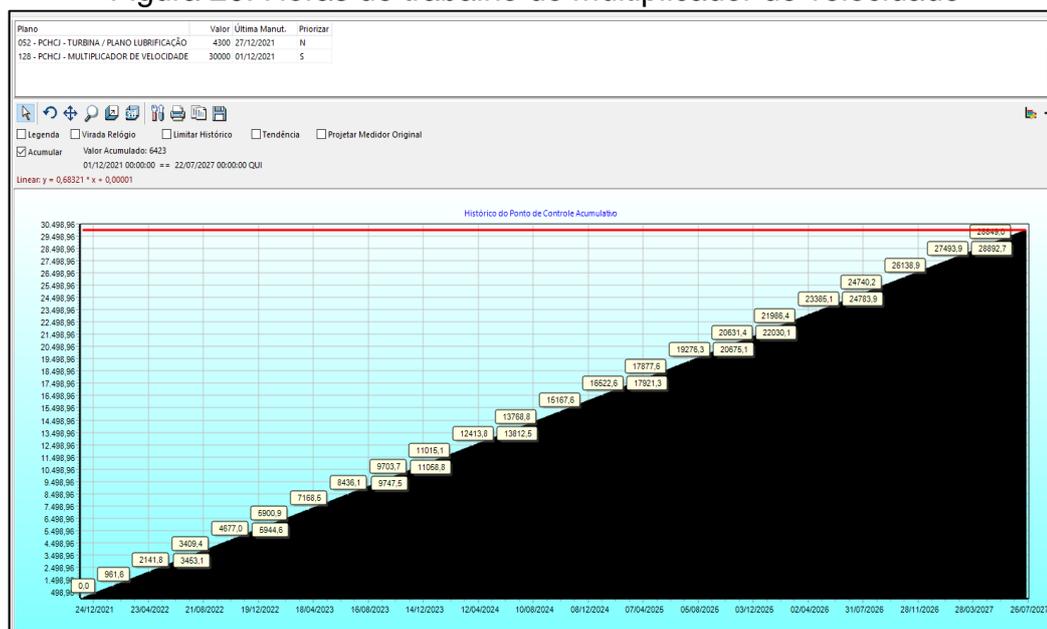
Fonte: Coprel (2023).

O Check-list da usina engloba uma verificação geral na usina onde são realizadas as medições de vibração de todos os equipamentos sujeitos a vibrações, medição de temperatura, avaliação de ruídos anormais e testes de sistemas auxiliares. Esse procedimento é feito mensalmente, pois a usina é operada totalmente remota sem a presença de operador local.

3.3.2 Método de controle atual

O método preventivo utilizado até o momento era o acompanhamento das horas de trabalho do ativo, que são utilizadas como ponto de controle para que seja gerado plano de substituição dos rolamentos e retentores do multiplicador de velocidade, a figura 20 ilustra as horas trabalhadas do multiplicador de velocidade e uma projeção de quando o equipamento atingirá as horas previstas para a manutenção preventiva, baseado na média de tempo em que o equipamento trabalhou desde a última manutenção.

Figura 20: Horas de trabalho do multiplicador de velocidade

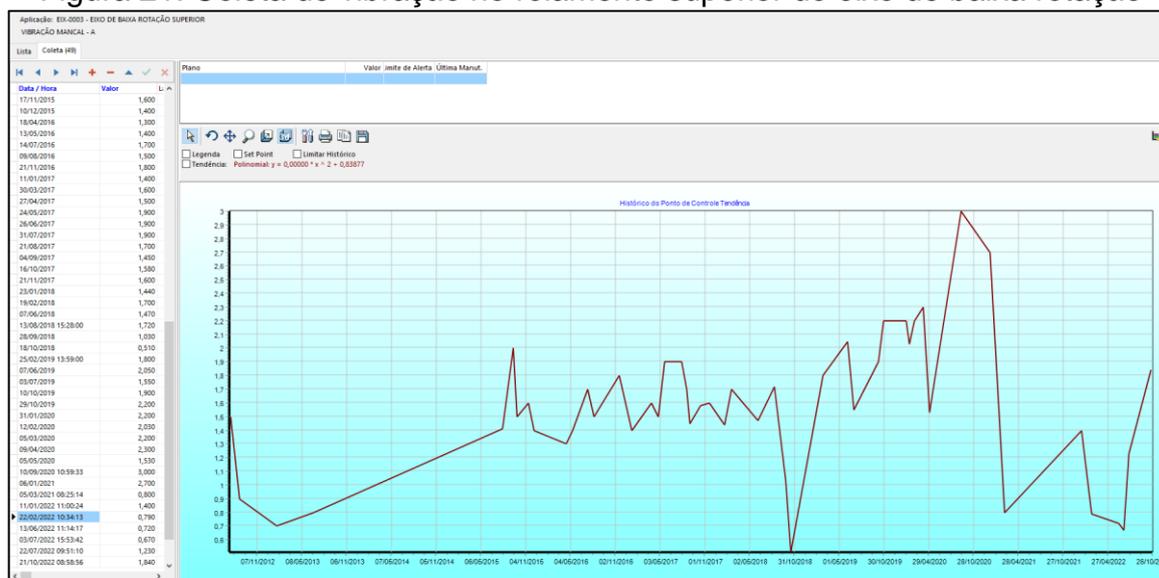


Fonte: Coprel (2023).

O método preditivo utilizado atualmente é a medição de temperatura e vibração dos rolamentos do multiplicador, estas medições são realizadas no plano de manutenção mensal designado como *check-list* da PCH Cotovelo do Jacuí. O grande problema deste tipo de coleta de vibração é que não se tem uma avaliação completa do equipamento, pois o intervalo entre as medições é de um mês aproximadamente.

A figura 21 ilustra os valores de vibração coletados até o ano de 2022, o gráfico representa no eixo das abscissas a data em que a coleta foi realizada e no eixo das ordenadas e magnitude da vibração, representada pelo índice de velocidade de descolamento, medido em milímetros dividido por segundos (mm/s). Além disso percebe-se o grande período entre uma coleta e outra, a tabela a esquerda do gráfico contido na imagem 21 relaciona o valor de vibração coletado e a data em que foi realizada a coleta.

Figura 21: Coleta de vibração no rolamento superior do eixo de baixa rotação



Fonte: Coprel (2023).

Outra dificuldade de acompanhamento desta variação de vibração é que o técnico necessita realizar a medição da vibração nas três direções: vertical, horizontal e axial do rolamento. O equipamento utilizado é um medidor unidirecional do modelo NK 300, já mencionado anteriormente, esse equipamento só permite a medição em uma única direção, além de medir apenas a velocidade do deslocamento.

Percebe-se o ponto de melhoria no processo a partir do momento em que ocorreram algumas quebras de equipamentos antes do período de atendimento ao plano de substituição de rolamentos e retentores. De onde surgiu a necessidade de um acompanhamento mais próximo do ativo a fim de evitar a parada não programada. Principalmente em épocas de períodos chuvosos onde a indisponibilidade do ativo causa grandes perdas de geração de energia, além do custo de manutenção do equipamento.

3.4 ESTUDO DA MELHORIA

Devido às recorrentes quebras do equipamento, a equipe de planejamento e controle da manutenção foi em busca de possibilidades para melhorar o monitoramento do equipamento, foram apresentadas para a direção da Coprel algumas alternativas de equipamentos para o monitoramento dos níveis de vibração do ativo. Para que fosse aprovado o investimento foi preciso realizar o levantamento

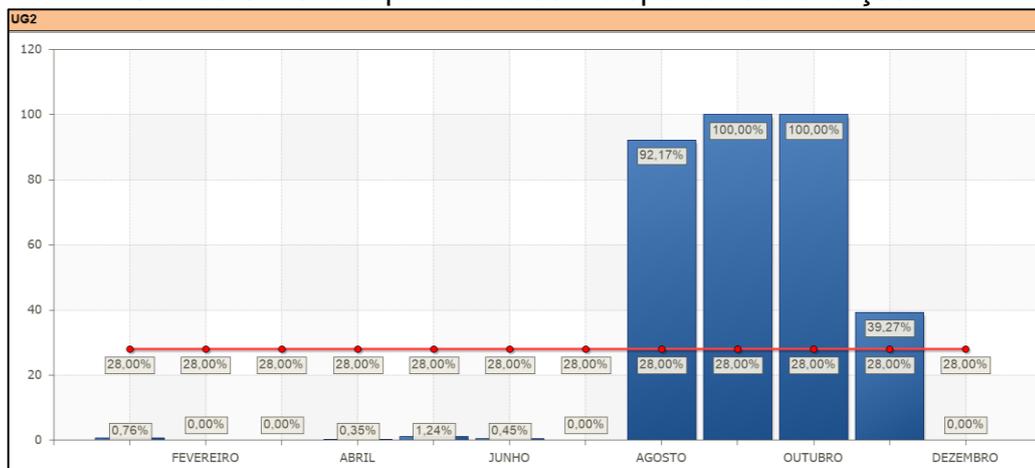
de custos de manutenção e tempo de máquina parada, causados pelas quebras do equipamento.

O período de máquina parada pode ser separado por duas características principais:

1. Taxa equivalente de indisponibilidade programada (TEIP): onde são contabilizadas as horas de máquina parada devido a alguma intervenção para manutenção preventiva do equipamento.
2. Taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF): onde são contabilizadas as horas de máquina parada devido a alguma falha no equipamento, que fica parado até que a equipe de manutenção solucione o problema.

Tomando como base o ano de 2021 a unidade geradora 02, da PCH Cotovelo do Jacuí, a média de taxa de indisponibilidade forçada foi de 28%(Gráfico 3), este gráfico representa que a máquina ficou parada em 28% de todo o tempo corrido do ano de 2021.

Gráfico 3: Taxa equivalente de indisponibilidade forçada



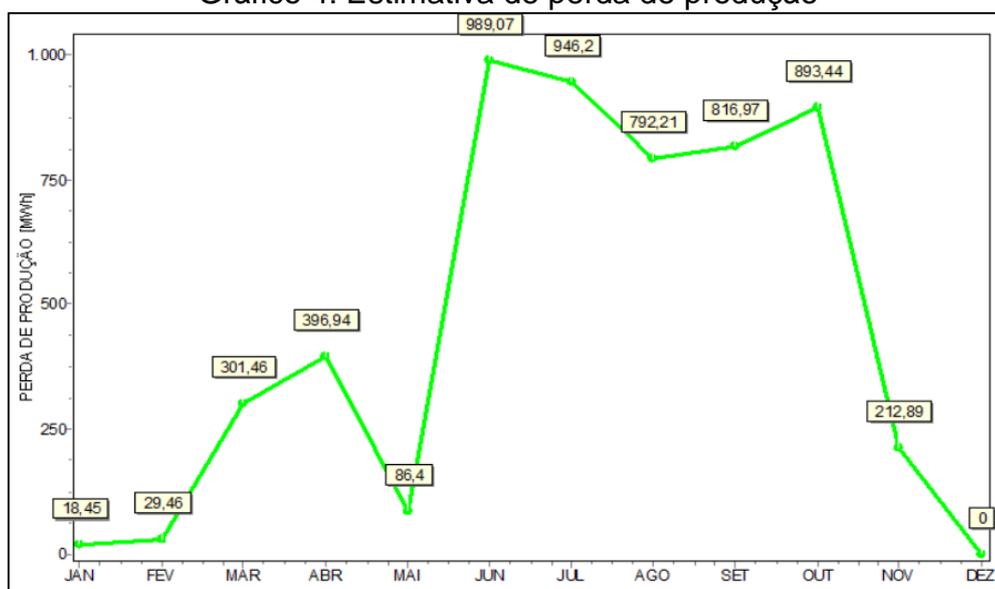
Fonte: Coprel (2023).

Todo período de indisponibilidade compreendido entre os meses de agosto e novembro, foram causados pela quebra do multiplicador de velocidade em um período onde não existia um equipamento reserva, para que a máquina não ficasse indisponível durante o trabalho de reparo no multiplicador.

De posse da informação de tempo de indisponibilidade é possível projetar a quantidade de energia elétrica, que a usina deixou de gerar no intervalo em que esteve indisponível devido à quebra do multiplicador de velocidade, essa projeção é chamada de perda de geração.

O gráfico 4 ilustra a estimativa de perda de produção (geração de energia elétrica), durante o ano de 2021, é calculada com base no período em que a máquina poderia gerar energia caso estivesse disponível, em resumo o reservatório possuía água suficiente para que a unidade geradora pudesse gerar energia, mas devido à indisponibilidade o reservatório extravasa e a água segue o leito do rio sem que seja aproveitada a sua energia potencial.

Gráfico 4: Estimativa de perda de produção



Fonte: Coprel (2023).

Dentre todas as perdas de geração do ano de 2021 separamos na tabela 2 apenas as que tiveram relação direta com a quebra do multiplicador de velocidade, durante todo período que a máquina esteve indisponível, deixamos de gerar 2.715,31 MWh de energia.

Tabela 2: Perda de produção

Mês	Perda de Produção (MWh)
Agosto	792,21
Setembro	816,97
Outubro	893,44
Novembro	212,89
Total:	2.715,31

Fonte: Coprel (2023).

Além das perdas de geração, precisam ser mensuradas as horas de trabalho da manutenção para a correção do problema, o que envolve a desmontagem do grupo gerador para desacoplar o multiplicador de velocidade, montagem do multiplicador reserva, alinhamento do conjunto em relação a turbina e em relação ao gerador para em seguida liberar para a operação.

A tabela 3 ilustra o tempo médio para a execução da substituição de um multiplicador avariado por um multiplicador reserva, nessa condição precisamos considerar que serão necessários dois técnicos de manutenção. Está sendo levado em conta apenas horas de trabalho, desconsiderando o tempo de deslocamento da equipe até o local da atividade.

Tabela 3: Tempo médio para execução da atividade

Atividade	Tempo projetado (dias)	Tempo projetado (Hora Homem)
Desmontagem do sistema e retirada do multiplicador avariado	5	88
Alinhamento do multiplicador reserva em relação a turbina	1	17,6
Alinhamento do gerador e montagem do sistema	5	88
Tempo total da atividade	11	193,6

Fonte: Coprel (2023).

Para mensurarmos a perda relacionada a atividade de substituição mencionada na tabela 3, precisamos levar em consideração que a máquina estará parada durante toda a atividade, desde o momento da quebra até o momento que a equipe liberar o equipamento para operação, a equação 2 é utilizada para calcular a perda de geração, como base de cálculo é utilizada a potência nominal da turbina de 1776 kW.

$$\text{Perda de Geração} = 1.776 \text{ kW} * \text{número de dias} * 24 \text{ horas} \quad (2)$$

$$\text{Perda de Geração} = 1.776 \text{ kW} * 11 * 24 \text{ horas} = 468.864 \text{ kWh} \quad (3)$$

A perda de geração estimada (equação 3) para realizar a troca de multiplicador em uma época de chuva, onde a máquina poderia trabalhar 24 horas por dia, seria de aproximadamente 468,86 MWh de energia.

A fim de evitar as paradas não programadas e perda de receita por indisponibilidade de máquina foi sugerido a instalação de um sistema capaz de monitorar a saúde do ativo de forma contínua e capaz de identificar as possíveis falhas antes que ocorram e causem a quebra do equipamento.

A tabela 4 ilustra os modelos de sensores avaliados, dentre eles, optou-se pela utilização do sensor da marca *Dynamox* do modelo HF+, por atender todas as necessidades para um projeto piloto e devido ao custo inferior ao do modelo da *Traction*. O modelo da *Traction* exigia uma compra mínima de 10 unidades e teria um custo mensal para utilização da plataforma, enquanto o modelo HF+ só tem o custo da aquisição e a utilização da plataforma é sem custos adicionais.

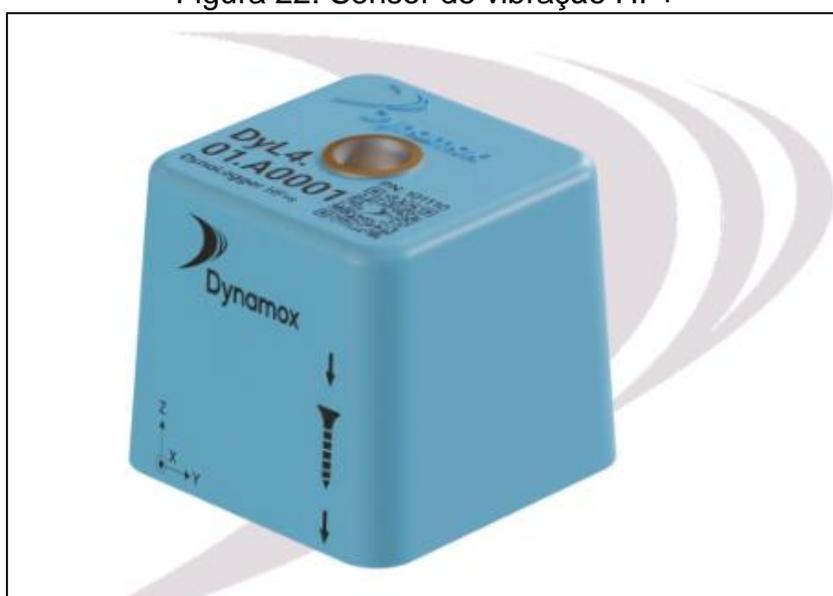
Tabela 4: Relação de sensores avaliados.

	DynaLogger HF+	DynaLogger TcAs	Sensores de Vibração da Traction
Escala de frequência	2 Hz até 13500 Hz	3 Hz até 2500 Hz	1 Hz até 32000Hz
Tipo de fixação	colado ou parafusado	Colado	Colado ou parafusad
Conexão	Bluetooth	Bluetooth	Conexão via 3G ou 4G
Duração de bateria	4 anos	4 anos	3 anos
Espectro de análise de vibração completo	Sim	Não	Sim
Custo de aquisição	Médio (somente custo da compra)	Baixo	Alto (Paga um valor mensal para uso da plataforma)
Indicado para máquinas de:	Acima de 10 RPM	Até 10 RPM	Todas as faixas de rotação

Fonte: Autor (2023).

A alternativa encontrada foi a utilização de um sensor de vibração da marca dynamox, do modelo HF+ (Figura 22), o qual foi escolhido devido às características flexíveis para a utilização do sensor, pois o mesmo entrega medição de temperatura e vibração triaxial para equipamentos de alta e baixa rotação. Além de não ser necessária a instalação de nenhum cabo para o seu funcionamento, pois possui uma bateria de longa duração e comunicação sem fio.

Figura 22: Sensor de vibração HF+



Fonte: Dynamox (2023)

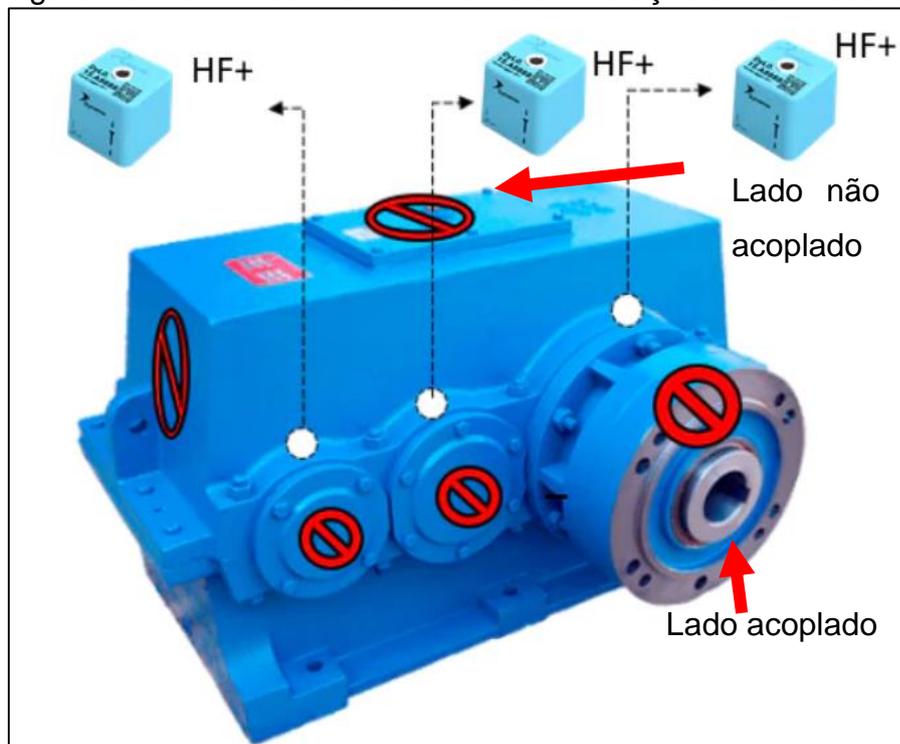
3.5 INSTALAÇÃO

Seguindo as orientações do fabricante, para os equipamentos do tipo redutores e multiplicadores de velocidade, é necessário a instalação de um sensor de vibração para cada mancal de rolamento, ou seja, é necessário a instalação de dois sensores para cada eixo (Figura 23). Serão instalados um sensor no lado acoplado (acoplamento entre multiplicador e turbina) do eixo de baixa rotação e um do lado não acoplado assim como para o eixo de alta rotação também será necessário a instalação de um sensor no lado acoplado (acoplamento entre multiplicador de velocidade e o gerador) e um sensor no lado não acoplado.

Além disso o fabricante também sugere que o seja evitado fixar os sensores em tampas parafusadas e que sempre que possível, devesse escolher partes rígidas

da máquina e o mais próximo possível dos elementos a serem monitorados, neste caso os rolamentos.

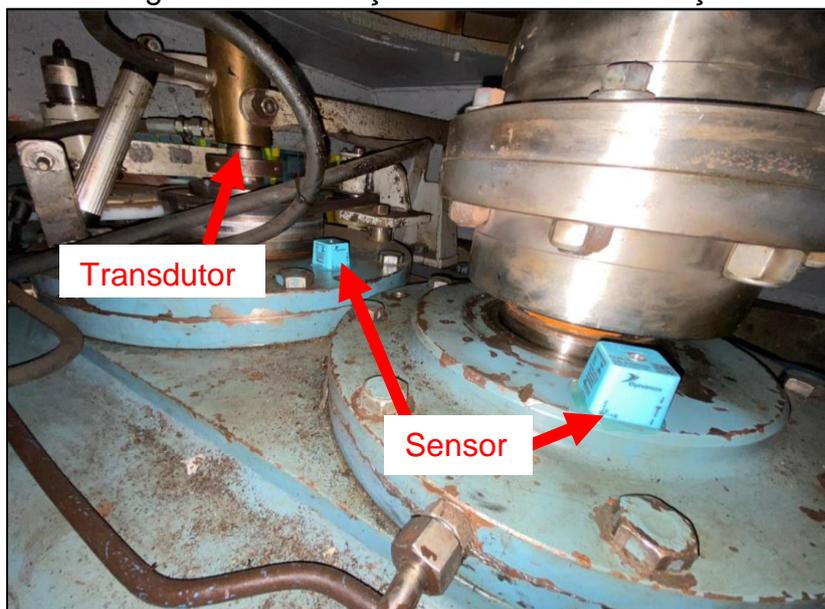
Figura 23: Pontos de monitoramento de vibração em um redutor



Fonte: Dynamox (2023)

A figura 24 ilustra os sensores instalados junto ao eixo de alta rotação no lado acoplado (lado direito) e no lado não acoplado do eixo de baixa rotação (lado esquerdo), o dispositivo localizado junto ao lado não acoplado do eixo de baixa rotação é um transdutor que tem por finalidade controlar a rotação da turbina, sem finalidade na transferência de potência mecânica para o gerador.

Figura 24: Instalação do sensor de vibração



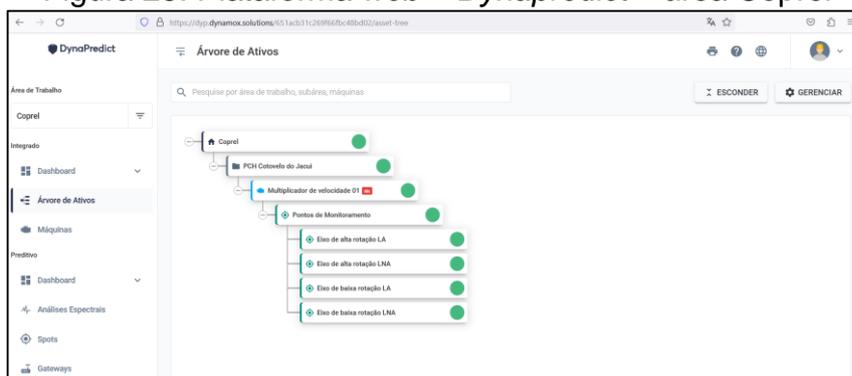
Fonte: Autor (2023).

3.5.1 Ativação da plataforma *web*

O sensor de vibração escolhido permite o monitoramento remoto, através da comunicação *bluetooth* e de um acesso à internet, esta funcionalidade nos permite monitorar o comportamento do ativo a partir de uma plataforma *web* fornecida pelo fabricante do sensor, na qual podemos monitorar diferentes ativos instalados em pontos distintos, desde que tenham comunicação com a internet.

Após a instalação do equipamento em campo, precisamos criar a árvore de ativos junto à plataforma *web*. Nesta plataforma *web*, o fabricante disponibiliza uma área de trabalho de uso exclusivo para a empresa adquirente dos sensores. A figura 25 ilustra a árvore de ativos cadastrada em nosso projeto de melhoria, onde foi criado de forma separada a usina e o equipamento que se deseja monitorar, na sequência foram cadastrados os “*Spots*” (como são chamados os sensores) com as nomenclaturas de acordo com o ponto onde estão instalados, como por exemplo o “eixo de alta rotação LA” que se refere ao mancal de rolamento do lado acoplado do eixo de alta rotação.

Figura 25: Plataforma web – Dynapredict – área Coprel



Fonte: Autor (2023).

Para realizarmos o cadastro dos *spots* de forma correta e que o sistema possa gerar os gráficos de vibração e deslocamento de forma condizente com a realizado do equipamento em campo, precisamos observar alguns detalhes na ativação do spot na plataforma web, seguindo os passos de configuração do sistema. A primeira etapa (Figura 26) é descrever o nome do *spot* de forma padronizada para que não ocorra o cadastro com nomes iguais no sistema, neste momento também descrevemos a rotação nominal do eixo que se deseja monitorar e o tipo de mancal que estaremos avaliando, neste caso um mancal de rolamentos.

Figura 26: Cadastro de spot – informações

Fonte: Autor (2023).

A próxima etapa no cadastro do *spot* é a definição dos pontos de monitoramento e o tipo de sensor que está sendo utilizado para realizar as medições (Figura 27). Nesta etapa um dos pontos mais importantes é o correto cadastro dos eixos do sensor, este ponto precisa ser comparado com a instalação do equipamento, a figura 28 ilustra o sensor instalado na máquina, observa-se que no corpo do sensor está impresso o sistema de coordenadas. Nesta mesma etapa também é

parametrizado o intervalo de amostra que se refere ao tempo em que o *spot* irá realizar uma coleta de temperatura, velocidade e aceleração, para enviar à plataforma *web*.

Figura 27: Cadastro de *spot* – monitoramento

The screenshot shows the 'Central do Spot' web interface. On the left is a sidebar with navigation options: 'Eixo de alta rota...', 'Acessar Spot Viewer', 'Informações', 'Monitoramento' (highlighted), 'Níveis de Operação', 'Alertas', 'Rolamentos', 'Frequências', and 'Preferências de Visualização'. The main content area is titled 'Central do Spot' and contains the following configuration sections:

- Sensor:** Modelo: HF+, DynalLogger: Dyl.3.04.A0826, Faixa Dinâmica: 8g. A link 'Saiba como instalar corretamente os DynalLoggers' is visible.
- Orientação dos Eixos:** Eixo X: Horizontal, Eixo Y: Vertical, Eixo Z: Axial.
- Telemetria:** Intervalo de Amostras: 5 Minutos. Métricas: Temperatura, Velocidade, Aceleração.

Fonte: Autor (2023).

Figura 28: Coordenadas do *Spot*



Fonte: Autor (2023).

Na sequência precisa ser cadastrado, as informações referentes ao rolamento utilizado no mancal que se está monitorando, na figura 29 está ilustrado os dois rolamentos que estão presentes no mancal de rolamentos do eixo de alta rotação no lado não acoplado. A definição correta do rolamento utilizado é importante para a análise da vibração do equipamento, pois a partir desta definição poderá ser associado a vibração medida a uma determinada falha em um rolamento específico, que veremos na sequência deste trabalho.

Figura 29: Cadastro de *spot* – rolamentos

Nome ↑	Elementos	FTF	2xBSF	BPFO	BPFI
★ LSL19 2328 (INA)	13	0.390	4.274	5.070	7.930
QJ328 (FAG)	13	0.410	4.648	5.330	7.670

Fonte: Autor (2023).

Com a configuração de todos os campos e início das coletas de dados dos sensores a plataforma *web* fornece um *dashboard* (Figura 30) onde pode-se acompanhar de forma *online* o *status* dos sensores, os valores médios de velocidade, temperatura e aceleração, assim como o nível de bateria do sensor e a indicação de a quanto tempo foi realizada a última coleta de informações e da última coleta de espectro de vibração.

Figura 30: Tela de *Dashboard* da plataforma *web*

Status ↓	Spot	Tendência	Vel. mediana	Temp. mediana	Acel. mediana	BAT	Sincronização
✓	Eixo de baixa rotação LA	●●●●●●●●	2,42 -	50,94 -	0,69 -	🔋	Telemetria: há 8 minutos Espectro: há 19 horas

Fonte: Autor (2023).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 COMPARATIVO ENTRE O MEDIÇÃO MANUAL E AUTOMÁTICA

O histórico de manutenção preditiva da máquina em questão, apresentava diversos pontos de melhoria, principalmente em relação a padronização dos pontos de coleta, dos intervalos de coleta e das variáveis em questão. Os valores de vibração precisavam ser coletados e lançados no sistema um a um e de forma manual (Figura

31), o técnico de manutenção precisava lançar todas as informações para cada um dos mancais de rolamento monitorados.

Figura 31: Pontos de monitoramento do mancal superior do eixo de baixa rotação

Aplicação: EIX-0003 - EIXO DE BAIXA ROTAÇÃO SUPERIOR									
TEMPERATURA EIXO BAIXA ROT SUPERIOR									
Lista Coleta									
Descrição	Tipo de Ponto de Controle	Máximo Coletas	Período Histórico	Unidade	Decimais	Set Point	Tipo Regressão	Ativo	
▶ TEMPERATURA EIXO BAIXA ROT SUPERIOR	03 - TERMÔMETRO	24	365	°C - CELCIL	1	48,0	0 - Automática	<input checked="" type="checkbox"/>	
VIBRAÇÃO MANCAL - A	05 - MEDIDOR DE VIBRAÇÃO	12	365	MM/S - MII	3	2,000	0 - Automática	<input checked="" type="checkbox"/>	
VIBRAÇÃO MANCAL - H	05 - MEDIDOR DE VIBRAÇÃO	12	365	MM/S - MII	3	1,200	0 - Automática	<input checked="" type="checkbox"/>	
VIBRAÇÃO MANCAL - V	05 - MEDIDOR DE VIBRAÇÃO	12	365	MM/S - MII	3	1,300	0 - Automática	<input checked="" type="checkbox"/>	

Fonte: Autor (2023).

Estas coletas realizadas de forma manual desprendem um tempo considerável da equipe de manutenção, pelo fato do ponto de medição de vibração ser um local com espaço restrito devido aos pontos de fixação da máquina e o tempo necessário para realização do lançamento dos valores de vibração no *software* de controle da manutenção (Engeman). Outro ponto de falha no método da coleta manual é que estão suscetíveis a erro de lançamento devido ao grande volume de informações a serem coletadas e lançadas no sistema.

Para que se possa mensurar a quantidade de coletas que o técnico de manutenção precisa fazer iremos considerar todos os pontos a serem medidos os valores de vibração de forma manual. A tabela 4 apresenta o número de medições a serem realizadas em um multiplicador de velocidade, essas coletas são realizadas uma vez ao mês, o tempo estimado para a coleta foi estimado com base no tempo médio para execução da referida atividade.

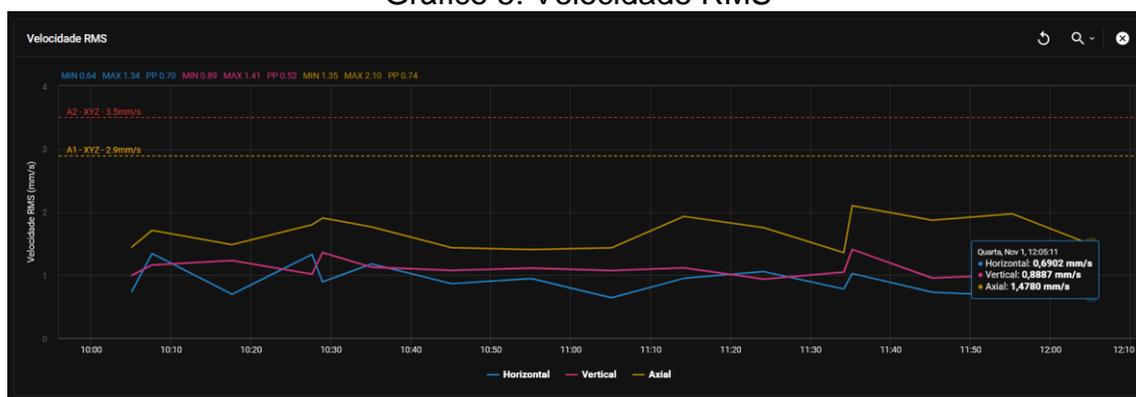
Tabela 5: Pontos de coleta e tempo médio de trabalho

Nº de Mancais	Nº de pontos de coleta para cada mancal	Total de medições	Tempo estimado:
04	03	12	15 minutos

Fonte: Autor (2023).

A coleta automatizada nos proporciona a possibilidade de reduzirmos o intervalo entre as medições o gráfico 5 nos mostra os valores de velocidade RMS lidos em um intervalo de tempo, as coletas são realizadas com intervalo pré-definidos de dez minutos, o que se tornaria inviável medir na forma manual, pois o tempo de realizar todas as coletas é maior que o intervalo entre as medições.

Gráfico 5: Velocidade RMS



Fonte: Autor (2023).

Neste comparativo, já percebemos um enorme ganho na aquisição das informações, pois em um período de um mês onde teríamos apenas um valor de vibração coletado teremos um total de 4.320 coletas para avaliar o comportamento real do ativo.

4.2 COMPARATIVO ENTRE ANÁLISES EXISTENTES E NOVAS ALTERNATIVAS

As análises do comportamento da vibração eram impraticáveis, principalmente pela grande janela de intervalo entre as medições, muitas informações preciosas eram perdidas nesse intervalo de medição, se avaliarmos o comportamento da máquina durante a ocorrência de qualquer valha em outro componente do conjunto, por exemplo em uma parada da turbina devido a atuação de uma das proteções. Não existiam dados suficientes para prevermos uma falha no ativo.

A partir da implementação do sistema de monitoramento automático e de forma remota os dados podem ser visualizados com um intervalo muito pequeno, como já citado no gráfico 5. Porém com o sensor escolhido para esse projeto piloto podemos realizar a coleta do espectro de vibração da máquina. A tabela 5 apresenta algumas das faixas de espectro disponíveis para configuração e coleta a partir do sensor utilizado.

Tabela 6: Relação de espectrais disponíveis para utilização

Selecione uma configuração espectral como padrão:

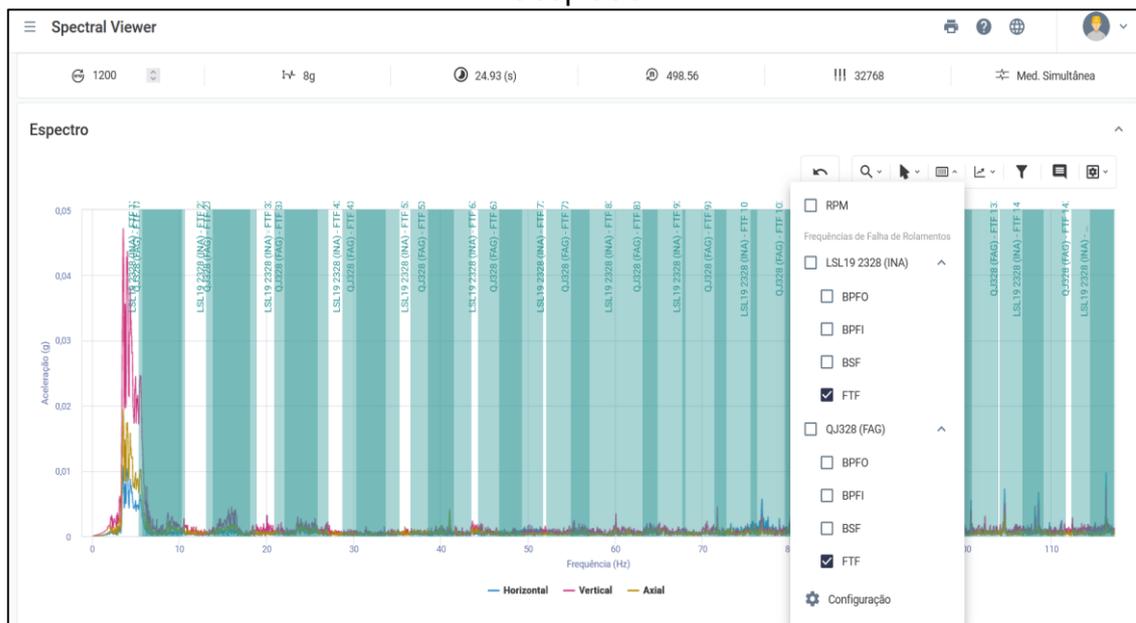
Espectral X, Y e Z - 1314 Hz - 24.93 s - 32768 linhas - 498.56 voltas

Eixos	Frequência Máxima	Duração da Coleta	Linhas	Voltas	Resolução em Frequência	Resolução em Amplitude
Z	571 Hz	172.01 s	98304	3440.21	0.01 Hz	0.06250 g
Y	571 Hz	172.01 s	98304	3440.21	0.01 Hz	0.06250 g
X	571 Hz	172.01 s	98304	3440.21	0.01 Hz	0.06250 g
Z	571 Hz	86.01 s	49152	1720.1	0.01 Hz	0.00024 g
Y	571 Hz	86.01 s	49152	1720.1	0.01 Hz	0.00024 g
X	571 Hz	86.01 s	49152	1720.1	0.01 Hz	0.00024 g

Fonte: Autor (2023).

O espectro de vibração nos permite realizar uma análise mais detalhada do comportamento do ativo, pois na plataforma foram cadastrados os modelos de rolamento associados a cada um dos mancais. O gráfico 6 representa um espectro de vibração coletado junto ao mancal do eixo de alta rotação no lado acoplado com o gerador, onde podemos comparar a aceleração de vibração do eixo em relação a frequência de falha fornecida pelo fabricante do rolamento. Para esse comparativo utilizamos a frequência fundamental de falha na gaiola do rolamento, onde percebe-se que mesmo que as frequências são próximas, até o momento não caracteriza uma falha na gaiola do rolamento. Porém precisam ser comparados com os demais tipos de falha do rolamento, e aí sim realizar um diagnóstico se as frequências medidas estão relacionadas com algum tipo de falha do referido rolamento.

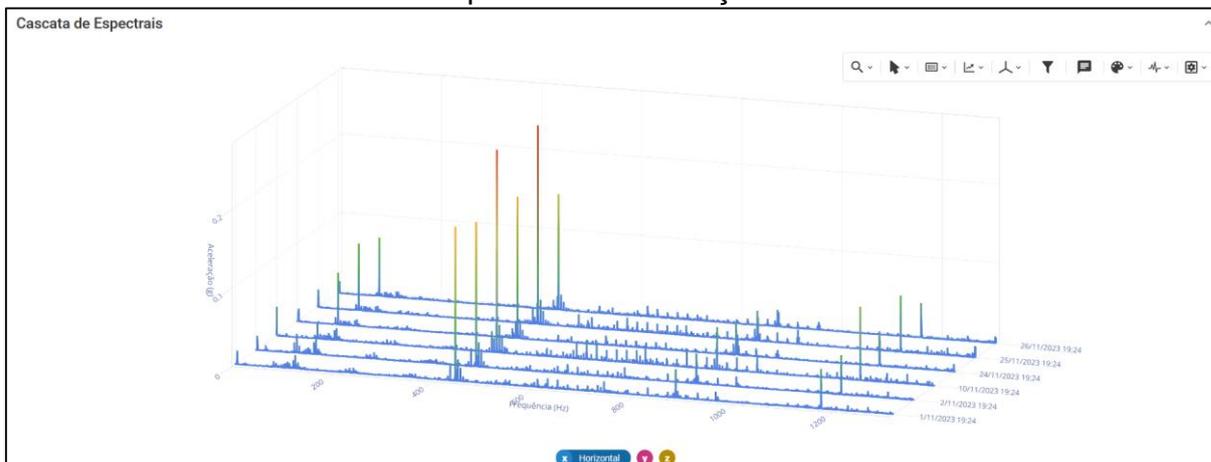
Gráfico 6: Espectro de aceleração do mancal do eixo de alta rotação no lado acoplado



Fonte: Autor (2023).

A implantação do sensor de vibração nos trouxe outra funcionalidade muito útil na análise de espectro em relação ao acompanhamento, podemos comparar os espectros anteriores em um único gráfico, que permite visualizar a evolução da amplitude de aceleração em uma determinada faixa de frequência. O gráfico 7 ilustra no eixo das abcissas a faixa de frequência e no eixo das ordenadas a amplitude da aceleração medida, cada uma das linhas representa uma medição de espectral, representa a evolução da amplitude de aceleração em relação à frequência entre os espectros coletados em cinco dias anteriores.

Gráfico 7: Espectro de aceleração em cascata



Fonte: Autor (2023).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do presente trabalho conclui-se, que a manutenção preditiva é um dos pontos que requerem mais atenção junto ao setor de manutenção, pois em determinados ativos a detecção de possíveis falhas pode significar uma redução dos custos de manutenção, além do aumento da confiabilidade do ativo.

No ativo avaliado neste estudo, podemos perceber resultados positivos, apesar do pequeno intervalo de tempo em que o sensor está instalado a campo, já conseguimos ter um histórico dos espectros vibracionais e iniciar a avaliação do comportamento do ativo em determinadas condições de trabalho.

Identificou-se uma economia do tempo de trabalho da equipe de manutenção e maior padronização nas medições coletadas, devido ao sensor ser colado junto a carcaça do mancal, tendo sua referência sempre fixa e impossibilitando o erro de lançamento por parte do técnico de manutenção.

O monitoramento remoto e automático se mostrou bastante eficiente e nos mostra uma gama de oportunidades futuras, pelo simples fato de não necessitar de uma dupla de colaboradores para a realização das medições em campo, estes colaboradores podem ser utilizados em atividades que necessitem de uma maior atenção de forma local, como por exemplo as inspeções visuais e sensitivas que não podem ser feitas de forma remota.

O principal ganho foi a possibilidade de padronizar as medições e iniciar um acompanhamento dos mais diferentes aspectos vibracionais, no método utilizado anteriormente a única informação que se tinha era a velocidade de deslocamento, não estavam disponíveis as informações de aceleração e de deslocamento. Essas variáveis possibilitarão uma gama de trabalhos de avaliação do comportamento do equipamento. Que sem dúvidas contribuirá muito para as tomadas de decisão da equipe de planejamento e controle da manutenção.

Com base nas informações obtidas na plataforma, a equipe de PCM poderá avaliar o melhor período para realizar uma manutenção, considerando a evolução da falha e os períodos em que exige uma maior disponibilidade do equipamento, podendo programar uma parada em épocas que não causem perdas de geração para a usina hidrelétrica.

6. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o andamento do presente trabalho identificou-se algumas oportunidades de pesquisas futuras, com o objetivo de melhorar o fluxo dos processos no setor de manutenção e reduzir o trabalho das equipes de campo, devido a enfrentarmos uma redução na disponibilidade de mão de obra qualificada para a realização de algumas atividades de manutenção.

Pode ser avaliado a viabilidade de instalação de sensores similares para o monitoramento de mancais do tipo deslizante, os quais apresentam algumas características distintas das apresentadas no presente trabalho.

Outra opção de trabalhos futuros, seria uma avaliação aprofundada da análise de espectro vibracional do conjunto de mancais de rolamento, pois o presente trabalho não tinha como objetivo fazer a análise detalhada do comportamento do ativo.

Devido ao fato deste sensor ter especificação que atende a trabalho em áreas classificadas, ou seja, é hermeticamente fechado e não possui a necessidade de interligação por cabos, podemos sugerir a instalação de um sensor no interior de algumas turbinas hidráulicas que são do tipo Kaplan horizontal, este tipo de turbina apresenta riscos de falha no sistema de abertura das pás do distribuidor e a única maneira de verificar essa falha é abrindo a máquina. Com a utilização do sensor poderia ser avaliado o espectro de vibração a fim de comparar o comportamento da máquina durante a sua operação e quando ocorre a evolução de uma falha.

Na manutenção preditiva em usinas hidrelétricas, a antecipação de falhas é um passo em direção e melhoria da confiabilidade, garantindo assim um fluxo contínuo de energia sustentável. O acompanhamento dos ativos durante a sua operação proporciona um aumento na disponibilidade dos equipamentos e também contribui para a previsibilidade de falhas dos componentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 5462**: confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro. ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10576**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para supervisão e manutenção. Rio de Janeiro. ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 10082**: Vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de (600 a 12000) rpm - bases para especificação e padrões de avaliação. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.

ALMEIDA, Isac Barbosa de. **Análise de falhas em rolamentos por análise de vibração aplicado a aerogeradores**. Orientador: Prof. Dr. Efrain Pantaleón Matamoros. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica em engenharia. Natal, RN, 2016.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção mecânica Industrial**. Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada. Editora Érica. São Paulo, 2014.

CORONATO, Maurício. **Apostila de treinamento de vibrações**. Editora: GYR. São Paulo, 2003.

DACHERY, Joiris Manoela. **Saiba tudo sobre usinas hidrelétricas**. Energês, 2023. Disponível em: <https://energes.com.br/saiba-tudo-sobre-usinas-hidreletricas>. Acesso em 19 Nov. 2023.

DYNAMOX S.A. **Aplicação e boas práticas de monitoramento para redutores**. Disponível em: <https://support.dynamox.net/pt/articles/aplicacoes-e-boas-praticas-de-monitoramento/redutor>. Acesso em 31 de Out. de 2023).

DYNAMOX S.A. **Datasheet DynaLogger HF+** Disponível em: <https://content.support.dynamox.net/wp-content/uploads/2023/11/DataSheet-HF-112023-02-PT.pdf>. Acessado em 26 de Out. de 2023.

ENGETELES Capacitação Profissional e Consultoria LTDA. **Curso de PCM - Planejamento e Controle de Manutenção 4.0**. Editora: Engeteles. Acessado em 09 de Ago. de 2022.

ELETOBRÁS. **Instruções para Estudos de Viabilidade de aproveitamentos Hidrelétricos**. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acessado em: 12 de Out. de 2023.

E L Galvão e Cia - Qualidade e Eficiência em Materiais para Indústria. **Rolamentos**. Disponível em: <https://www.elgalvao.com.br/rolamentos>. Acessado em 01 de Nov. de 2023.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Editora: Elsevier Ltda. Rio de Janeiro, 2011.

FRANCESCHI Alessandro de. ANTONELLO, Miguel Guilherme. **Elementos de Máquinas**. Editora: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Rede e-tec Brasil. Santa Maria, 2014.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2ª edição. Editora: UFSM. Santa Maria, 2006.

HIDROWHEEL Fabricação de Máquinas e Equipamentos Ltda. **Turbinas kaplan bulbo horizontal**. Disponível em: <https://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/kaplan/kaplan-bulbo>. Acessado em 19 Out. 2023.

HIDROWHEEL Fabricação de Máquinas e Equipamentos Ltda. **Turbinas kaplan saxo vertical**. Disponível em: <https://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/kaplan/kaplan-saxo>. Acessado em 19 Out. 2023.

KARDEC, Alan. NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função estratégica**. 3ª edição. Editora: Qualitymark. Rio de Janeiro, 2012.

MARÇAL, Rui Francisco Martins. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica fuzzy**. Orientador: Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais. Porto Alegre, 2000.

MENNA, Alexandre Ribeiro. **Deteção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibração em banda larga: um caso prático de aplicação em um população de equipamentos rotativos**. Orientador: Prof. Dr. Alberto Tamagna. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre, 2007.

MOURA, Ailson P. MOURA, Adriano Aron F. ROCHA, Ednardo P. da. **Engenharia de Sistemas de Potência - Geração Hidroelétrica e Eólicoelétrica**. Editora UFC. Fortaleza, 2019.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva**. Editora: Edgard Blücher, Volume 1. São Paulo, 1989.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Energia agora carga e geração**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>. Acessado em 12 Out. 2023.

SANTANDER, Elvis Jhoarsy Osorio. **Aplicação de curtose espectral na identificação de falhas em mancais de rolamento**. Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto, Luiz Antônio Vaz Pinto. Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro, 2014.

SANTOS, Marcell Silva Carvalho dos. (Outubro de 2012). **Modelagem Dinâmica de Turbinas Hidráulicas Axiais de Dupla Regulagem para Estudos de Estabilidade**

Angular Transitória em Sistemas Elétricos de Potência. Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo de Carvalho Mendes. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Itajubá. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica. Itajubá, 2012.

TEKNIKAO Indústria e Comércio Ltda. **Manual de operação medidor de vibração NK 300.** Disponível em: <https://www.teknikao.com.br/medidor-nk300>. Acessado em 19 Out. 2023.

TEKNIKAO Indústria e Comércio Ltda. **Manual de operação medidor de vibração NK 400.** Disponível em: <https://www.teknikao.com.br/medidor-nk400>. Acessado em 19 Out. 2023.

WEBER, Abilio José. **Telecurso: profissionalizante de Mecânica.** Editora: Fundação Roberto Marinho. Rio de Janeiro, 2009.

WEG S.A. **Multiplicador de velocidade.** Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Redutores-de-Velocidade/Industriais/Multiplicador-de-velocidade/Multiplicador-de-velocidade/p/MKT_WEN_TGM_MULTIPLIERS. Acessado em 19 Out. 2023.

WEG S.A. **Hidrogeradores Linha S – Verticais sem escovas. Manual de instalação, operação e manutenção.** Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h0a/hbf/WEG-hidrogeradores-sem-escovas-verticais-12723596-manual-portugues.pdf>. Acesso em 19 Out. 2023