

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

REBECA MIRANDA DE ABREU SALUM

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE
INDICADORES DE PRODUTIVIDADE PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO CONTEXTO
DA INDÚSTRIA 4.0.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2021**

REBECA MIRANDA DE ABREU SALUM

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE INDICADORES
DE PRODUTIVIDADE PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA UTILIZANDO ANÁLISE
DE VIBRAÇÃO NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.**

**Methodology to Create Productivity Indicators for Predictive Maintenance
Using Vibration Analysis in The Industry Context 4.0.**

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).
Orientador: Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino.

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Para Rájala *i.m.* e Jéssica *i.m.*, sempre
em meus pensamentos.

Para meu pai, Joás, meu porto seguro.



TERMO DE APROVAÇÃO

PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA CONSTRUÇÃO DE INDICADORES DE PRODUTIVIDADE PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

por

REBECA SALUM

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 14 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino
Orientador

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Certamente estes poucos parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte deste momento crucial da minha jornada, mas podem estar certos de que meu pensamento e de minha gratidão se estende a todos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Rui Tadashi Yoshino, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória. Ao Luciano pelo tema e proposta do projeto.

Ao meu pai, Joás Jorge Salum, sem o qual nada disto seria possível, quem me guiou e auxiliou até a conclusão deste trabalho. Meu amor e eterna gratidão.

À minha família e amigos, pelo apoio e paciência, em especial a Nara, Ricardo e Mike. Sem vocês não teria conseguido.

E agradeço a Deus pela vida e pela jornada que me proporcionou com cada um de vocês. Amém.

A produção deve ser planejada para minimizar a perda da qualidade ou o custo. Sem se controlar o processo, não é possível controlar a qualidade de um produto.

(TAGUCHI, Genichi)

RESUMO

SALUM, Rebeca Miranda de Abreu. **Metodologia Para Construção de Indicadores De Produtividade Para Manutenção Preditiva Utilizando Análise De Vibração No Contexto Da Indústria 4.0.** 2021. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Key Performance Indicator (inglês), ou Indicador-Chave de Desempenho, é o nome dado à ferramenta de gestão que avalia quantitativamente o desempenho e sucesso de um determinado processo ou negócio, determinando e acompanhando metas relevantes para ele. No contexto da Quarta Revolução industrial, a escolha de um sistema de indicadores deve levar em conta a integração entre os ambientes virtual e físico, para entregar uma avaliação confiável e rápida, permitindo tomadas de decisão coerentes com a expectativa das partes envolvidas. A utilização de um sistema confiável de medição de vibrações, com sensores de vibração e software com uma boa base de dados, aliados a um sistema de avaliação de kpis, pode prevenir a falha prematura dos equipamentos de uma planta. O objetivo deste trabalho é demonstrar os passos para obtenção de informações, como são processados e como construir os indicadores de produtividade a serem alcançados para a manutenção preditiva, vinculados aos conceitos da indústria 4.0, para os parâmetros avaliados, a saber: a disponibilidade, o custo da manutenção e o valor médio global de vibração, assim como sua interação. A metodologia utilizada é aplicada, descritiva e quantitativa, na forma de Estudo de Caso por levantamento. Os resultados obtidos apresentam a eficiência desta em reduzir os custos da manutenção e aumentar a disponibilidade dos equipamentos para produção.

Palavras-chave: Indicador-Chave. Manutenção Preventiva. Vibração. Indústria 4.0. Disponibilidade. Custo de Manutenção.

ABSTRACT

SALUM, Rebeca Miranda de Abreu. **Methodology To Create Productivity Indicators For Predictive Maintenance Using Vibration Analysis In The Industry Context 4.0. 2021.** 90 f. Course Conclusion Paper (Bachelor in Mechanical Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Key Performance Indicator (English), or Key Performance Indicator, is the name given to the management tool that quantitatively evaluates the performance and success of a given process or business, determining and monitoring relevant goals for it. In the context of the Fourth Industrial Revolution, the choice of a system of indicators must consider the integration between the virtual and physical environments, to deliver a reliable and rapid assessment, allowing decision making consistent with the expectations of the parties involved. The use of a reliable vibration measurement system, with vibration sensors and software with a good database, combined with a kpis evaluation system, can prevent premature failure of a plant's equipment. This work has the goal to demonstrate the steps to obtain information, how they are processed and how to build the productivity indicators to be achieved for predictive maintenance, linked to the concepts of industry 4.0, for the evaluated parameters, namely: availability, cost of maintenance and the global average value of vibration, as well as its interaction. The methodology used is applied, descriptive and quantitative, in the form of a Case Study by survey. The results obtained show its efficiency in reducing maintenance costs and increasing the availability of equipment for production.

Keywords: Key Indicator. Preventive maintenance. Vibration. Industry 4.0. Availability. Maintenance cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva exemplo de acelerômetro e respectivo espectro de frequência	17
Figura 2 – Relação entre Custo e Disponibilidade para a manutenção	18
Figura 3 – Os Nove Pilares da Indústria 4.0	22
Figura 4 – Fases da Metodologia	30
Figura 5 – Desenho do Dinamômetro com os pontos de coleta	35
Gráfico 1 – Fluxo de Caixa	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estrutura do trabalho	14
Quadro 2 – Definição dos pilares de sustentação da Indústria 4.0	23
Quadro 3 – Modelo de construção de KPIs	26
Quadro 4 – Características da classificação da pesquisa	29
Quadro 5 – Modelo de construção de KPIs	32
Quadro 6 – Apresentação do Indicador - Valor Global de Vibração	37
Quadro 7 – Apresentação do Indicador - Disponibilidade	38
Quadro 8 – Apresentação do Indicador – Disponibilidade	39
Quadro 9 – Premissas financeiras	39
Quadro 10 – Premissas técnicas	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das Ferramentas com os Pilares da Indústria 4.0	33
Tabela 2 – Identificações dos equipamentos	35
Tabela 3 – Disponibilidade Média	38
Tabela 4 – Análise da Viabilidade da Manutenção	41

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

KPI	Key Performance Indicator
LA	Lado acionamento ou Lado Acoplado
LOA	Lado Oposto ao Acionamento
FFT	Fast Fourier Transform

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 IDENTIFICAÇÃO E PREVENÇÃO DE FALHAS	15
2.2 GESTÃO DA MANUTENÇÃO	18
2.3 TIPOS DE MANUTENÇÃO	19
2.4 A MANUTENÇÃO PREDITIVA	20
2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA 4.0	21
2.6 KPIS (INDICADORES DE DESEMPENHO) PARA MANUTENÇÃO	24
2.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	27
3 METODOLOGIA CIENTÍFICA	29
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	29
3.2 FASES DA METODOLOGIA	29
3.2.1 Fase 1: Levantamentos	30
3.2.2 Fase 2: Cadastro De Parâmetros	31
3.2.3 Fase 3: Plano de manutenção	31
3.2.4 Fase 4: Relatórios de Condição	32
3.2.5 Fase 5: KPIs	32
3.2.6 Fase 6: Acompanhamento	33
4 RESULTADOS	34
4.1 LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS	34
4.2 CADASTRO DOS PARÂMETROS	35
4.3 PLANO DE MANUTENÇÃO E RELATÓRIOS DE CONDIÇÃO	36
4.4 RELATÓRIOS DE CONDIÇÃO	36
4.5 CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES E ACOMPANHAMENTO	36

4.5.1 Valor Global de Vibração	37
4.5.2 Disponibilidade	38
4.5.3 Custo da Manutenção	39
4.6 ACOMPANHAMENTO	41
5 CONCLUSÃO	42
APÊNDICE A - Avaliação das condições do Mancal Lado Acionamento do Tambor Norte da Prensa	48
APÊNDICE B - Avaliação das condições da Bomba do Poço de Coleta do Forno de Cal C	54
APÊNDICE C - Avaliação das condições do Monitoramento De Vibração do Transportados de Correia	65
APÊNDICE D - Avaliação das condições Dinamômetro	76

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe-se a responder à pergunta problema: como fazer a avaliação de desempenho da manutenção de uma planta fabril que já apresenta altos níveis de automação e de integração dos sistemas digitais e físicos, inclusive nos monitoramentos de condição e estados de suas máquinas?

Segundo FITZ-GIBBON (1990) Key Performance Indicator (inglês), ou Indicador-Chave de Desempenho, é o nome dado à ferramenta de gestão que avalia quantitativamente o desempenho e sucesso de um determinado processo ou negócio, determinando e acompanhando metas relevantes para ele. No contexto da Quarta Revolução industrial, a escolha de um sistema de indicadores deve levar em conta a integração entre os ambientes virtual e físico, para entregar uma avaliação confiável e rápida, permitindo tomadas de decisão coerentes com a expectativa das partes envolvidas.

A utilização de um sistema confiável de medição de vibrações, com sensores de vibração e software com uma boa base de dados, aliados a um sistema de avaliação de kpis, pode prevenir a falha prematura dos equipamentos de uma planta. Ou seja, permitir que o equipamento atingirá sua vida útil, ou mesmo superá-la, em boas condições de integridade física.

Os dados de vibração revelam informações importantes da operação de um equipamento, já que este vibrará de acordo com as frequências características dos seus componentes. A amplitude de vibração de cada componente é única e permanece constante ao longo do tempo, caso sua integridade não mude, nem a dinâmica operacional do equipamento. Desta forma, as frequências de vibração podem ser isoladas e identificadas, processo conhecido como análise vibracional (WEBER et al, 2009).

Essa técnica, a análise vibracional, pode ser considerada a mais efetiva para diagnosticar possíveis falhas em equipamentos que possuem elemento rotativo, coletando dados sem parada dele. Utilizando-se sensores de vibração, pode-se gerar um espectro do sistema, identificando a vibração característica de seus componentes e acompanhar sua condição, tornando possível diagnosticar o início de uma irregularidade, pois a amplitude da vibração começará a mudar. Neste caso, a

manutenção pode tomar decisões estratégicas, como manter ou reduzir a carga operacional, adquirir um componente para substituição e programar a parada para tal, evitando a avanço do problema e outros danos no equipamento (EMERSON, 2006).

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor uma metodologia para criar indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração no contexto da indústria 4.0.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Revisão da literatura para as grandezas características;
- b) Indicação da relação da manutenção preditiva, com uso de análise de vibrações on-line, e a indústria 4.0;
- c) Propor os passos para criação de indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração; e
- d) Estabelecer e avaliar os indicadores de produtividade para os parâmetros avaliados, a saber: a disponibilidade, o custo da manutenção e o valor médio global de vibração, assim como sua interação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para Kardec & Nascif (2009) a manutenção deve ser vista como uma função estratégica da organização, direcionada à solução de problemas apresentados na produção, auxiliando a empresa atingir patamares competitivos de qualidade e produtividade, diminuindo custos e tempo empregados na manutenção de equipamentos e aumentando a assertividade. Este trabalho aplica os conhecimentos de engenharia, como a construção de indicadores de produtividade, para auxiliar equipes de manutenção neste objetivo.

Também se utiliza de avanços e pesquisas em indústria 4.0, uma vez que esta propõe a integração dos ambientes físico e cibernético para o monitoramento dos processos da fábrica e tomada decisões de forma descentralizada e automatizada (BRETTEL, 2018). Dentro desta proposta, este trabalho tem por objetivo apresentar

uma metodologia de como construir os indicadores de produtividade a serem alcançados para a manutenção preditiva, vinculados aos conceitos da indústria 4.0, com o uso de diagnóstico on-line das condições operacionais de um sistema de equipamentos industriais, a saber, com o uso de sensores de vibração.

A importância da aplicação do sistema proposto, e os ganhos esperados, se dá na diminuição dos períodos de intervenções de manutenção, bem como aumento da vida útil dos componentes rotativos de equipamentos em uma instalação industrial. Ou seja, assegurar a produção, manter a disponibilidade dos componentes monitorados e mitigar os riscos de quebras inesperadas, por prover informações instantâneas das condições operacionais dos elementos avaliados e seu impacto nos indicadores correlatos (EMERSON, 2006).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho em questão está organizado em cinco capítulos, incluindo este. O Quadro 1 expõe esta estrutura e seus respectivos temas.

Quadro 1 – Estrutura do trabalho

Capítulo	Descrição
1. Introdução	Introdução Objetivos (geral e específico) Justificativa Estrutura do trabalho
2. Revisão Bibliográfica	Manutenção industrial, tipos e técnicas de manutenção preditiva; Identificação e prevenção de falhas e análise de vibração Kpis (indicadores de desempenho) para manutenção Manutenção preventiva na indústria 4.0
3. Metodologia Científica	Classificação da pesquisa Metodologia proposta
4. Resultados	Análises dos casos KPIs desenvolvidos
5. Conclusão	Considerações finais

Fonte: Autoria própria

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo encontra-se uma breve revisão da bibliografia existentes sobre manutenção industrial, com ênfase em manutenção preditiva, e a apresentação de algumas técnicas de manutenção preditiva. Também apresentaremos os conceitos de gestão da manutenção e indicadores de produtividade utilizados na construção deste trabalho, além de uma introdução aos conceitos da indústria 4.0 focada na relação desta com a técnica de manutenção proposta, de forma a localizar o leitor com relação ao tema proposto. Ou seja, apresentar as definições e contextos relevantes à compreensão do presente trabalho.

2.1 IDENTIFICAÇÃO E PREVENÇÃO DE FALHAS

Segundo Weber et al. (2009), os elementos rotativos de equipamentos têm um tempo estimado para operar mantendo suas características essenciais. Esse parâmetro é chamado vida útil e é baseado na fadiga do material e no desgaste das superfícies de rolamento. No caso do elemento se deteriorar antes deste tempo, fenômeno conhecido como falha, se deve à fatores como condições de uso, de instalação ou de projeto inadequadas. Através das técnicas de análise de vibração, pode-se identificar falhas que podem ocorrer em máquinas rotativas. Algumas delas são (GRUPO SFK, 2012):

- Desgaste nas superfícies de rolamentos e em engrenagens;
- Afrouxamento de elementos de fixação e buchas;
- Cavitação e queda de pressão em elementos hidráulicos;
- Empenamento de eixos;
- Falhas elétricas e rotores ou estatores;
- Ressonância;
- Lubrificação deficiente;
- Desalinhamento e desbalanceamento.

A Análise de Vibração é o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento são descobertas pela taxa de variação das forças dinâmicas geradas (EMERSON, 2016).

Weber et al. (2009, p.46) descreve que:

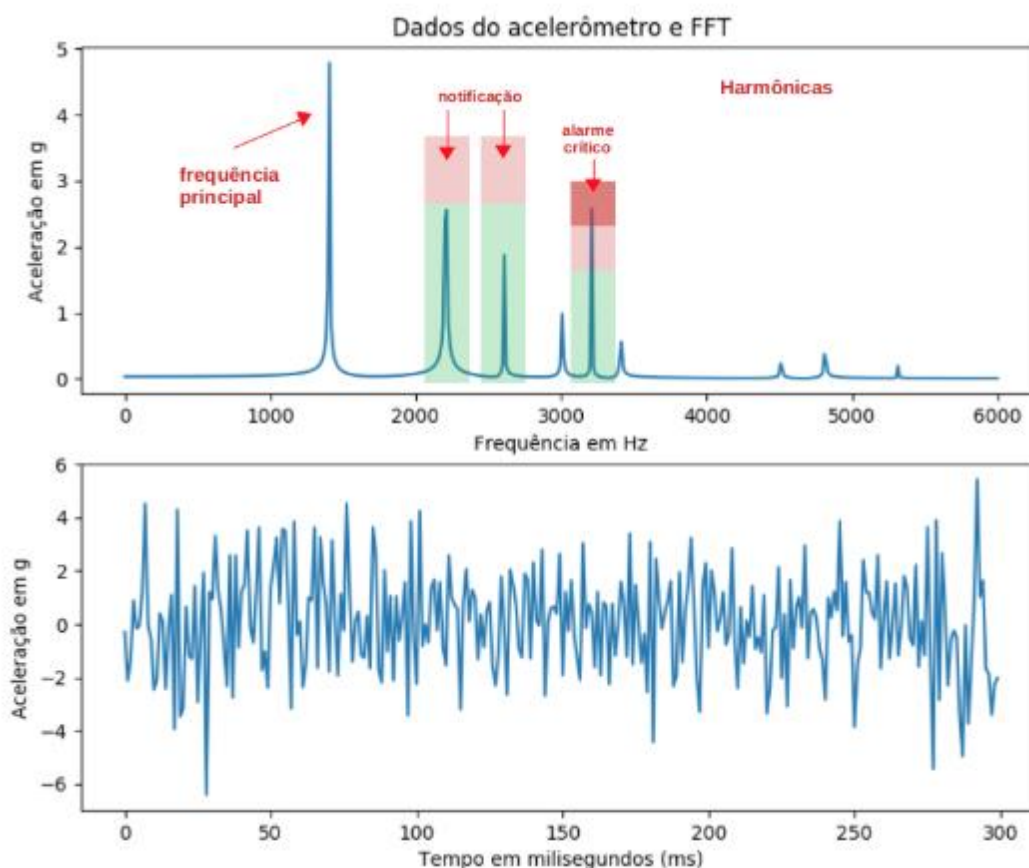
O princípio de análise das vibrações baseia-se na ideia de que as estruturas das máquinas excitadas pelos esforços dinâmicos (ação de forças) dão sinais vibratórios, cuja frequência será igual à frequência dos agentes excitadores[...]Se captadores de vibrações forem colocados em pontos definidos da máquina, eles captarão as vibrações recebidas por toda a estrutura. O registro das vibrações e sua análise permitem identificar a origem dos esforços presentes em uma máquina operando.

Segundo Emerson (2006, p.12) “Todos os sistemas mecânicos possuem massa, rigidez e amortecimento e se comportam de forma semelhante a um sistema massa-mola.” É normal que elementos de máquinas e estruturas submetidos a ações dinâmicas, como forças e momentos atuantes, vibrem, mas “[...] com uma regra, um baixo nível de vibração indica que o equipamento está funcionando corretamente. Quando a vibração começa a aumentar, a máquina provavelmente está caminhando para uma possível falha” (EMERSON, 2006, p. 13).

Os níveis dessa variação podem ser avaliados em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o funcionamento dos equipamentos, com o uso de sensores. Aplica-se a transformada rápida de Fourier (FFT), ou outro método, às amostras do sensor para verificar a amplitude do sinal em um intervalo de tempo. Analisa-se então os dados desses sensores no espectro de frequência, propiciando uma faixa conhecida para o funcionamento do equipamento, sendo que indicadores fora desta faixa apontam para operação ineficiente e possível falha (EMERSON, 2016).

A Figura 1 apresenta como essa análise é feita. O gráfico superior mostra a transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) do sinal recebido do acelerômetro de aceleração por tempo ($g \times ms$), indicado no gráfico inferior, na escala de frequência por amplitude de aceleração ($g \times Hz$). As colunas em cor verde definem os limites de amplitude que o equipamento opera sem problemas. As colunas em vermelho indicam amplitudes em que uma notificação ou alarme devem ser acionados para informar condição anormal de operação. O pico de maior amplitude, conhecido como frequência fundamental ou frequência principal, é onde se dá a maior concentração de energia. Já os outros, de menor amplitude, são conhecidos como harmônicas, e indicam geração de energia em outras faixas de frequência (ALVES, 2019).

Figura 1 – Curva exemplo de acelerômetro e respectivo espectro de frequência



Fonte: ALVES (2019)¹

O monitoramento constante dos equipamentos possibilita estimar o estado futuro de dano, relacionando a probabilidade de falha com o tempo de uso. (GRUPO SKF,2012)

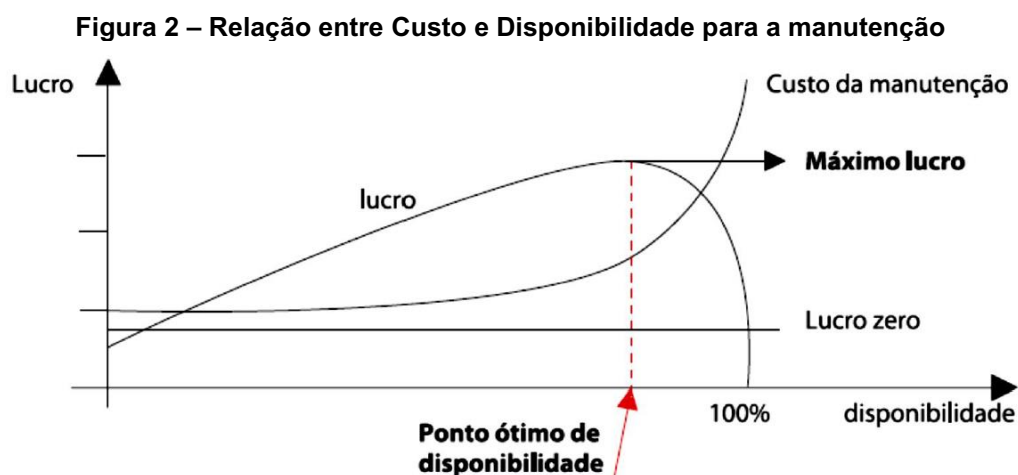
Detectar falhas é uma atividade usual, devido à tecnologia de sensores de vibração e de processamento computacional serem áreas de pesquisa mais maduras. O comportamento não linear das falhas e as incertezas no sistema de predição, devido à falta de medições, tornam o processo de predição mais desafiador, porém, ao criar-se um histórico, pode-se construir a curva PF (do inglês, *potential failure* ou falha potencial) para planejar e controlar a manutenção, a fim de prevenir as falhas (SKF, 2012).

¹ <https://venturus.org.br/analise-de-vibracao-de-maquinas-para-manutencao-preditiva/>

2.2 GESTÃO DA MANUTENÇÃO

A definição técnica de manutenção é “Manter em perfeito estado de conservação e funcionamento: equipamento, acessórios e tudo o que está ligado ao setor fabril de uma indústria” (Santos, 2007, p.13). Segundo Weber et al. (2009, p. 14), “O tipo de manutenção ideal a ser aplicado em uma empresa é aquele que melhora a disponibilidade das máquinas ou equipamentos para a produção a um custo adequado.”

Podemos otimizar essa relação conforme Murty e Naikan (1995) nos mostram através da Figura 2. Considerando o custo ou lucro e disponibilidade do equipamento, onde, para uma disponibilidade total (100%), o custo de manutenção seria inviável ao processo.



Fonte: Murty e Naikan (1995)

Para avaliar esta relação entre custo e lucro nos casos apresentados, foi utilizada a análise de viabilidade, que será descrita em mais detalhes na seção 2.7. Já a Disponibilidade, segundo a norma NBR 5462-1994, é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado intervalo de tempo determinado. Leva-se em conta aspectos como manutenibilidade, confiabilidade e segurança, para garantir que o equipamento estará disponível para desempenhar sua função no processo produtivo.

Manutenibilidade é a probabilidade de uma dada ação de manutenção efetiva, para um item sob dadas condições de uso, poder ser efetuada dentro de um intervalo

de tempo determinado, quando a manutenção é executada sob condições estabelecidas e usando procedimentos e recursos prescritos (NBR 5462-1994).

Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo (NBR 5462-1994). A diferença de confiabilidade e disponibilidade é que nesta temos o equipamento desimpedido para desenvolver sua função e naquela temos certeza de que o equipamento irá desenvolver a atividade.

Por fim, manutenção tem papel importante na avaliação da segurança, proporcionando condições para a detecção e controle de potenciais riscos que os colaboradores e equipamentos estejam sujeitos (Brito, 2003).

2.3 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Os tipos mais comuns de manutenção aplicados na indústria são: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

Segundo Rodrigues (2009, p. 16) “A manutenção corretiva é a intervenção realizada após a ocorrência da falha ou a apresentação de desempenho menor que o esperado.” Esta é a manutenção, mais comumente utilizada nos ambientes fabris.

Já a manutenção preventiva segue um planejamento de paradas periódicas, a fim de se identificar e realizar ajustes necessários como a troca de peças que apresentam desgaste, lubrificação de elementos rotativos, entre outros. As garantias de funcionamento perfeito no período determinado, de certo ritmo de trabalho e de equilíbrio necessário ao bom desenvolvimento das atividades, são proporcionadas pelo método preventivo (WEBER et al. 2009).

A manutenção preditiva, foco deste trabalho, prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para se aproveitar bem este tempo, controlando as condições reais de funcionamento da máquina baseado em dados que informam o seu processo de degradação. Neste caso, a manutenção pode tomar decisões estratégicas, como manter ou reduzir a carga operacional, adquirir um componente para substituição e programar a parada para tal, evitando a avanço do problema e outros danos no equipamento (WEBER et al., 2009).

2.4 A MANUTENÇÃO PREDITIVA

Segundo Nepomuceno (1989) a manutenção preditiva consiste no conhecimento do estado da máquina através de medições periódicas e contínuas de um ou mais parâmetros significativos, e análise dessas variáveis, permitindo intervir no momento adequado, ou seja, antes de uma eventual falha. A coleta de dados gera um histórico que permite o prognóstico desta.

Para Weber et al. (2009) a manutenção preditiva possui os objetivos orientados a finalidades como: a diminuição de custos de manutenção e a aumento da produtividade, determinando, antecipadamente, a necessidade de serviços de manutenção numa peça específica de um equipamento.

Segundo o mesmo autor, é de extrema importância a utilização de aparelhos adequados, capazes de registrar diversos fenômenos, para que a manutenção preditiva possa ser executada, como:

- a) vibrações das máquinas;
- b) pressão;
- c) temperatura, entre outros.

Ainda ressalta que “A manutenção preditiva, após a análise dos fenômenos, adota dois procedimentos para atacar os problemas detectados: estabelece um diagnóstico e efetua uma análise de tendências” (Weber et al., 2009, p.44). O diagnóstico segundo o autor “Detecta a irregularidade [...] referente à origem e à gravidade do defeito constatado. Esse diagnóstico deve ser feito antes de se programar o reparo” (Weber et al., 2009, p.44). Já a etapa da análise da tendência da falha, “[...] consiste em prever com antecedência o defeito ou a falha, por meio de aparelhos que exercem vigilância constante, predizendo a necessidade do reparo” (Weber et al., 2009, p.45).

Atualmente são empregadas diversas técnicas de manutenção preditiva nas indústrias, como: análise de vibração; análise de óleo; balanceamento; análise de circuito de motores; termografia; ultrassom; entre outras (Nepomuceno, 1989).

2.5 MANUTENÇÃO PREDITIVA NA INDÚSTRIA 4.0

A conexão entre a manutenção preditiva e a indústria 4.0 se dá pelos pontos de conexão entre as matérias, como apresentado nesta seção.

Indústria 4.0 é uma expressão criada para explicar as transformações do sistema produtivo atual em sistemas cyber-físicos, que começou como um projeto do governo alemão, com objetivo de voltar a indústria nacional para a inovação tecnológica (HOFMANN & RÜSCH, 2017).

Uma análise sistemática história da evolução da indústria, apresentada por Gobo Jr. (2020), pode ser aliada com a definição de manutenção dada por Nepomuceno na seguinte sequência:

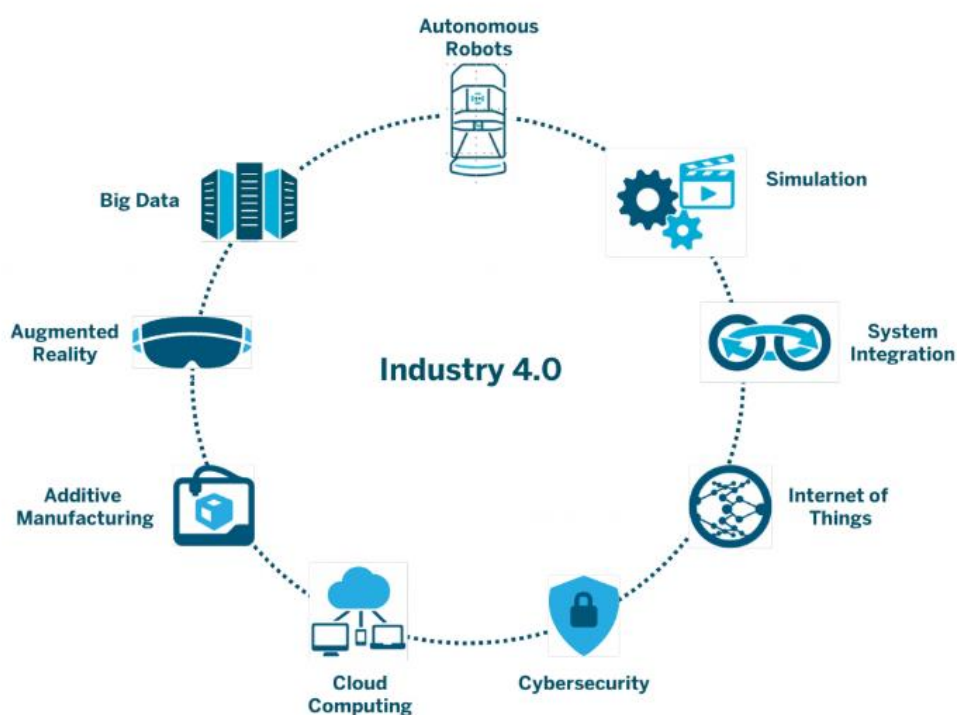
- A primeira revolução industrial foi a das máquinas à vapor que mecanizaram parte do trabalho de produção por volta do século XVIII. Neste período as máquinas requeriam reparos constantes, mas a atividade de manutenção era algo de pouca importância dentro do ambiente fabril e não havia padrão.
- A segunda revolução industrial trouxe a eletricidade, as linhas de montagem e a produção em massa de produtos, os problemas nos equipamentos fabris mais repetitivos, tornando a manutenção menos aleatória e mais padronizada.
- A terceira revolução industrial surgiu com o advento da computação e da automação, que começaram a substituir a mão de obra humana. Neste período surge a manutenção preventiva e dela a filosofia TPM (Manutenção Produtiva Total, do inglês *Total Productive Maintenance*), com o objetivo de eliminar as perdas no processo de produção devido às quebras e falhas.
- A quarta revolução, também chamada de Indústria 4.0, começou com a integração dos ambientes físico e cibernético, introduzindo o conceito de *smart-factory* (fábrica inteligente), em que sistemas ciber-físicos monitoram os processos da fábrica e tomam decisões de forma descentralizada, a linha de produção é automatizada de forma a ser altamente flexível e capaz de tomar decisões sem intervenção humana.

A interoperabilidade permite que máquinas e dispositivos se conectem e comuniquem entre si e com as pessoas, através da internet.

Essas tecnologias propõem aumentar e flexibilizar a produção de bens de consumo, melhorar a experiência dos consumidores desses bens e até mesmo retirar a necessidade de intervenção humana nas tomadas de decisão (RUSSMAN, 2015).

Segundo CISCO IBGS (2012), sensores online são um dos grupos que integram a internet de todas as coisas (IoT). Russom (2011) define Big Data Analytics como o uso de ferramentas estatísticas em conjunto com grandes quantidades de dados para se fazer projeções. Segundo Russman et.al. (2015) estes são pontos de conexão entre as matérias. Os mesmos autores definem Nove Pilares da indústria 4.0, tecnologias reconhecidas como marcos desta revolução industrial, conforme indicado na Figura 3: *Big Data Analytics*; Robôs Autônomos; Simulação E Computador; Integração Horizontal E Vertical; *Internet of Things (IoT)*; *Cybersecurity*; Manufatura Aditiva; Realidade Aumentada; *Cloud Computing* (RUSSMAN, 2015).

Figura 3 – Os Nove Pilares da Indústria 4.0



Fonte: Embalagem Marca²

² <https://www.embalagemmarca.com.br/2017/05/conheca-os-nove-pilares-para-implantacao-da-industria-4-0/>

O Quadro 2 mostra as definições de cada um desses pilares (SANCTIS,2020).

Quadro 2 – Definição dos pilares de sustentação da Indústria 4.0

Pilar	Definição	Fonte
Big data e Analytics	Definido como uma modelagem estatística de conjunto de dados grandes, dinâmicos e diversos, gerados pelos seus usuários e seus rastros digitais. Ele é resumido em termos de 5 V's: volume, variedade, velocidade, veracidade e valor. A Big data e analytics pode ser usado como uma nova maneira de gerenciar a coleta, análise e interpretação dos dados, realizando todo esse procedimento em tempo real.	Müller et al. (2016) Davenport (2014) Luvizan et al. (2015) Abbasi et al. (2016) Boyd & Crawford (2012)
Robôs autônomos	Os robôs são mais autônomos, flexíveis e cooperativos, podendo aprender e trabalhar ao lado de humanos. Isso permitiria um aumento da capacidade produtiva e uma redução de custos.	Rüßmann et al. (2015)
Simulação	São realizadas simulações virtuais dos processos e operações reais, permitindo que ajustes sejam testados para melhorar a produção.	Rüßmann et al. (2015)
Integração de sistemas horizontal e verticalmente	Funciona através de um sistema de produção em rede, permitindo que o CPS proporcione sistemas flexíveis. Todos os setores fabris e todos os envolvidos na produção (fornecedores, empresa e clientes) estão integrados por um sistema através da tecnologia. As cadeias de valor são automatizadas.	Rüßmann et al. (2015) Li e Xu (2017)
Internet of Things (IoT)	Pode ser definido como uma rede de máquinas, sensores e dispositivos, capazes de realizar uma comunicação entre si. A geração de valor proporcionado pela IoT é de que quando os dispositivos da empresa estão em conexão, eles têm a capacidade de interagir-se com inventário de fornecedores, sistemas de suporte ao cliente e aplicativos de inteligência e análise de negócios.	Lee e Lee (2015)
Segurança cibernética	A necessidade de maior proteção com relação aos dados exigirá o desenvolvimento de novas tecnologias de segurança.	Rüßmann et al. (2015)
Cloud computing (Computação em nuvem)	A grande geração de dados exigirá o armazenamento em nuvens, melhorando o desempenho das tecnologias envolvidas e a relação entre companhias. Além disso, a computação em nuvem permite que o cliente possa ter acesso e gerenciamento de todas as etapas do ciclo de vida do produto.	Rüßmann et al. (2015) Li e Xu (2017)
Manufatura aditiva	Produção descentralizada de produtos customizados a partir de impressoras 3D, reduzindo custos com estoque e transporte	Rüßmann et al. (2015)
Realidade aumentada (RA)	Tecnologia capaz trazer ao mundo real objetos virtuais, textos, sons, imagens, através de algum dispositivo tecnológico. Os sistemas baseados em realidade aumentada suportam uma variedade maior de serviços, otimizando a tomada de decisão e outras atividades fabris.	Rüßmann et al. (2015) Nakamoto, Carrijo, Cardoso, Lopes e Lima (2012)

Fonte: Sanctis e Silva (2020)

Este trabalho, então, propõe-se a responder à pergunta problema: como fazer a avaliação de desempenho da manutenção de uma planta fabril que já apresenta altos níveis de automação e de integração dos sistemas digitais e físicos, inclusive nos monitoramentos de condição e estados de suas máquinas, como descrito em sua introdução.

2.6 KPIS (INDICADORES DE DESEMPENHO) PARA MANUTENÇÃO

Kardec et. Al. (2002) propõe um sistema de manutenção baseado em KPIs (*Key Performance Indicator*, em inglês ou Indicador-Chave de Desempenho) que são ferramentas de gestão para avaliar quantitativamente o desempenho e sucesso de um determinado processo ou negócio. São uma forma visual de fácil compreensão que permite aos gestores comunicar ao time o quão eficiente o processo ou negócio está e como foi seu desempenho ao longo de certo período determinado. Esses indicadores devem ser construídos baseados nas metas que se quer atingir e o que é relevante para o processo. Ao se selecionar indicadores de desempenho deve se atentar a alguns pontos, como o impacto que eles terão sobre o desempenho da empresa, com correlação entre si, estabelecendo um método para identificar as variações, suas causas e efeitos (KARDEC E NASCIF, 2002).

Kardec e Nascif (2002) apresentam os principais indicadores da área de manutenção, a saber:

- Taxa de avarias;
- Tempo médio entre falhas;
- Tempo médio para reparo;
- Disponibilidade e confiabilidade do equipamento;
- Custos da manutenção e economias obtidas;
- Distribuição de atividades por tipo de manutenção.

A taxa de avarias é definida como o número de falhas por hora trabalhada da unidade avaliada. O tempo médio entre falhas (MTBF) é dado pela média dos intervalos de tempo entre falhas e é expresso como o inverso da taxa de falhas. Já o tempo médio de reparo (MTTR) é o tempo gasto com a manutenção corretiva, ou seja, a razão entre o número de horas gastas em reparos e a quantidade de falhas (KARDEC E NASCIF, 2002).

Disponibilidade, é tempo em que o equipamento está disponível para produzir, ou seja, quanto maior, maior poderá ser a produção. Já a confiabilidade é o indicativo da certeza de produzir bens dentro das especificações e é função da disponibilidade. A disponibilidade é representada pelo Tempo Médio entre Falhas (MTBF) e pela

manutenibilidade, representada pelo Tempo Médio de Reparo, conforme Equação 1 (KARDEC E NASCIF, 2002).

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \times 100\% \quad (1)$$

Os custos de manutenção são dados por, conforme Equação 2.

$$\% \text{ Custo manutenção} = \frac{\Sigma \text{ custos da manutenção}}{\Sigma \text{ custos da operação/produção}} \times 100\% \quad (2)$$

E deve envolver os seguintes segmentos: Custos de mão de obra; Custos de material; Custos de serviços de terceiros; e Perdas por problemas de manutenção, em relação às perdas totais do processo de produção (KARDEC E NASCIF, 2002).

Outro aspecto relacionado ao acompanhamento de custos na manutenção é a quantificação de economias obtidas, resultados positivos obtidos pela introdução, melhoria ou adoção de técnicas preditivas, análise de falhas etc. Esses resultados positivos, quando bem quantificados e acompanhados, demonstram para a gerência superior o acerto da medida e permite novos investimentos com vistas à melhoria da confiabilidade e disponibilidade da planta, traduzidos pela melhor atuação da manutenção. Todas as ações orientadas para a melhoria dos resultados na utilização dos ativos, desenvolvidas pela devem ser contabilizadas. Idem para a melhor aplicação da tipologia de manutenção que é capaz de ser traduzida em economia mantida a mesma ou aumentada a disponibilidade. É imprescindível que seja analisada a relação custo-benefício para que essa ou aquela decisão, em custos, seja tomada (KARDEC E NASCIF, 2002).

Distribuição de atividades por tipo de manutenção, revela qual o percentual da aplicação de cada tipo de manutenção está sendo desenvolvido. No contexto desse indicador principal, podemos ter vários outros indicadores:

- Paradas de equipamento causadas por falhas não previstas: indica a eficácia do acompanhamento preditivo e a assertividade do plano de manutenção preventiva da empresa. Quanto maior o seu valor, menor o acerto.

- Total de HH gastos em reparos de emergência: É outra maneira de avaliar o acerto da política de preventiva e preditiva da manutenção. Quanto menor esse indicador, maior deverá ser a confiabilidade da instalação.
- Total horas paradas por intervenção da Preventiva: permite uma avaliação do quanto o programa de manutenção preventiva influi nas horas paradas de equipamentos na planta, em função do total de horas paradas ou relacionado as perdas na produção pela necessidade de intervenção para cumprimento do plano de preventiva.

Outro indicador que é usualmente adotado é o valor médio global de vibração de equipamentos da planta. É eficaz para um acompanhamento particularizado, ou seja, equipamento por equipamento, sendo justificado nos componentes que historicamente apresentam maior taxa de falhas, conforme veremos neste trabalho (KARDEC E NASCIF, 2002).

Segundo Kardec e Nascif (2002), os indicadores devem ser construídos numa estrutura lógica, que pode ser resumido no Quadro 3. Os indicadores que serão apresentados neste trabalho são: a disponibilidade, o custo da manutenção e o valor médio global de vibração, para atender o objetivo específico do trabalho.

Quadro 3 – Modelo de construção de KPIs

NOME	Aqui será colocado o nome do indicador, exemplo: Eficiência da Segurança Cibernética.
DEFINIÇÃO	Breve descrição do que está sendo avaliado.
FINALIDADE	Os objetivos e metas avaliados por este indicador
FÓRMULAS DE CÁLCULO	Cálculos utilizados para a quantificação do indicador
UNIDADE	Unidade de medida do indicador, exemplo: horas, watts
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	Itens que influenciam no indicador, sem mudar sua natureza. Exemplo: número de computadores ligados à rede
PERIODICIDADE	Periodicidade da avaliação do indicador
APRESENTAÇÃO	Visualização dos dados, exemplo gráfico de evolução temporal
BENCHMARKING	Avaliação em relação a outros indicadores ou áreas, por exemplo
ÁREAS INTERESSADAS	Áreas da empresa com impacto ou impactadas pelo indicador

Fonte: Kardec e Nascif (2002)

Para tanto, os sensores online irão indicar os tempos e a vibração global. Já os custos serão calculados pelo método de análise de viabilidade (BORDEAUX-REGO *et al.*, 2015) Ou seja, conhecendo-se os valores investidos, comparar o custo da manutenção através dos subindicadores:

- Taxa interna de retorno (TIR): mostrado como percentual e indica a rentabilidade dos investimentos.
- Payback: é o momento a partir do qual o caixa acumulado fica acima de zero.
- Valor presente líquido (VPL): indica o fluxo de caixa previsto, atualizados com a taxa de desconto adequada; e
- VPL/VPI: que é a comparação do valor do fluxo de caixa previsto com o investimento realizado trazido a valor presente com a mesma taxa de desconto (VPI).

2.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A manutenção preditiva deve ser encarada como estratégica dentro da organização, podendo reduzir custos totais no processo de produção, como os gastos com trocas de partes ou conjuntos de equipamentos, e aumentar a disponibilidade de equipamentos para produção. Conclui-se que ela está diretamente ligada à indústria 4.0, não apenas por representar seus pilares, mas por permitir um avanço no sentido de tornar a manutenção cada vez mais automatizada e menos dependente da intervenção humana.

Conclui-se que a análise vibracional, além de ser efetiva para diagnosticar falhas em equipamentos com elemento rotativo sem sua parada, pode e deve ser utilizada para acompanhamento das condições deles, estabelecidos os devidos indicadores.

Com isso, atinge-se os objetivos específicos de (a) revisão da literatura para as grandezas características, a saber: manutenção industrial, tipos e técnicas de manutenção preditiva; identificação e prevenção de falhas e análise de vibração; kpis (indicadores de desempenho);

e (b) indicar a relação da manutenção preditiva com uso de análise de vibrações on-line com a indústria 4.0.

O capítulo 3, a seguir, apresenta a metodologia utilizada neste trabalho para a consolidação dos outros objetivos, a saber, (c) Propor os passos para criação de indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração; e (d) estabelecer esses indicadores de produtividade para os parâmetros avaliados, a saber: a disponibilidade, o custo da manutenção e o valor médio global de vibração, assim como sua interação.

3 METODOLOGIA CIENTÍFICA

Para obter os objetivos deste trabalho de forma confiável e formal foi feita uma pesquisa científica. Segundo Fernandes et.al. (2015, p. 2):

[...] a pesquisa científica é uma busca contínua com a finalidade de definir um processo permanente e inacabado intrinsecamente, por meio de uma atividade de aproximação da realidade, combinando dados e teoria[...] Trata-se da resolução sistemática, metódica e formal de um problema previamente estabelecido por meio da coleta de informações. Para tanto, utiliza-se de procedimentos científicos.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O Quadro 4 mostra a classificação desta pesquisa conforme os critérios de natureza, objetivos, abordagem do problema, método de pesquisa e procedimento de coleta, conforme Cauchick Miguel (2018).

Quadro 4 – Características da classificação da pesquisa

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO	JUSTIFICATIVA
Natureza	Aplicada	Este trabalho objetiva criar indicadores de produtividade para a manutenção, ou seja, um conhecimento com aplicação no contexto da indústria, em especial a indústria 4.0.
Objetivos	Descritiva	A pesquisa descritiva objetiva caracterizar certo fenômeno, estabelecendo relações entre variáveis, o que envolve técnicas de coleta de dados padronizados, neste caso a observação na forma de levantamento.
Abordagem do problema	Quantitativa	O objetivo da pesquisa é analisar fenômenos a partir de quantificações, através de ferramentas estatísticas.
Método da pesquisa	Estudo de Caso	É um estudo, de natureza empírica, que investiga um determinado fenômeno e tenta esclarecer a razão para uma decisão, ou um conjunto de decisões, serem tomadas, e suas consequências. (YIN, 2015)
Procedimento de coleta de dados	Levantamento	Os dados utilizados foram levantados em campo para esta pesquisa.

Fonte: Autoria própria

3.2 FASES DA METODOLOGIA

Para que uma pesquisa se enquadre como estudo de caso, é necessário determinar os limites do objeto da pesquisa e seu contexto devem ser definidos (YIN, 2015). No presente trabalho os objetos de pesquisa são os indicadores-chave de

produtividade (KPI's) para a manutenção, e o contexto é de uma fábrica de celulose, seus equipamentos, e a conexão destes KPIs com a indústria 4.0.

A Figura 4 apresenta o fluxo de informação para a execução da metodologia proposta neste trabalho, subdividida em 6 passos, ou fases.



Primeiramente, deve-se orientar o levantamento, junto aos responsáveis, dos equipamentos a serem classificados para o monitoramento, os dados técnicos dos fabricantes de componentes referentes, a saber as capacidades e os níveis de vibrações esperados ou recomendados, e o valor total investido em cada equipamento. O segundo passo é orientar o cadastramento individualizado dos equipamentos no sistema adquirido, definindo níveis de alarme, faixas de medição, parâmetros utilizados, frequência de coleta de dados etc. Para o presente trabalho, este cadastro já se encontrava realizado. O terceiro passo é elaborar métodos adequados para a implantação do Plano de Manutenção Preditiva com análise de vibrações, acompanhar as rotas de coleta de dados para encontrar os valores esperados durante a vida útil do componente versus os valores on-line medidos. O quarto passo é elaborar relatórios. O quinto é a elaboração dos indicadores de performance. O acompanhamento e sua avaliação é o sexto e último passo. Para melhor compreensão dos passos, segue-se uma explicação em detalhe.

3.2.1 Fase 1: Levantamentos

Descrever os equipamentos, e os pontos de medição. Basicamente é ter certeza da condição ideal, ou condição especificada pelo fabricante do equipamento, de trabalho. Também é necessário estabelecer quais os pontos de medição, ou seja, onde que o sensor estará apontado.

Por indicação do fabricante, os pontos de coleta serão os alojamentos dos rolamentos, por se referirem aos componentes de apoio do eixo e recebem a maior carga de todo o conjunto.

3.2.2 Fase 2: Cadastro De Parâmetros

Os parâmetros avaliados devem ser identificados de acordo com a necessidade da área. No caso deste trabalho os parâmetros cadastrados foram conforme se segue:

- **Velocidade de Vibração:** Indica o quanto o corpo está se movendo por unidade de tempo. A unidade no sistema internacional é metros por segundo (m/s), mas pode se usar milímetros por segundo mm/s. Só é medida quando existe a indicação de falhas em baixa frequência (menores que 10Hz), sendo que sua avaliação é secundária à do parâmetro “Aceleração”.
- **Aceleração:** Indica o aumento da velocidade por unidade de tempo. Sua unidade de medida no sistema internacional é o metro ao quadrado por segundo (m/s^2). Mas neste trabalho se utilizará de sua conversão em unidade de gravidade (g).
- **Envelope de Aceleração:** indica os picos de vibração dentro da faixa do espectro de FFT. Sua unidade de medida é em unidade de gravidade (gE).

3.2.3 Fase 3: Plano de manutenção

Nesta fase deve-se estabelecer os alarmes e os procedimentos no caso de disparo de alarmes. Ou seja, quais os valores máximos que os parâmetros cadastrados podem atingir, antes de se tomar uma ação.

Como para cada equipamento e área o plano de manutenção é específico, fica a critério da equipe de manutenção avaliar a melhor abordagem para o plano de manutenção. No caso deste trabalho, as sugestões e indicações de planos de manutenção são parte dos Relatórios de condição, descritos a seguir.

3.2.4 Fase 4: Relatórios de Condição

O coletor de dados, devidamente instalado, envia um diagnóstico da condição do equipamento em tempo real. Estes dados são armazenados e geram o histórico de operação do equipamento.

Caso aconteça o disparo de um alarme, é gerado um relatório de condição, que deve conter as seguintes informações:

- Equipamento monitorado,
- Condição dos equipamentos após o enquadramento nos seus respectivos alarmes (gráfico de histórico),
- Tipos de defeitos encontrados,
- Recomendações e observações de como eliminar os problemas encontrados. Ou seja, sugestão de plano de manutenção.

3.2.5 Fase 5: KPIs

Os indicadores de produtividade (KPIs) são estabelecidos para acompanhar o desempenho da manutenção dentro da estrutura da empresa. São descritos seguindo o formato do Quadro 5.

Quadro 5 – Modelo de construção de KPIs

INDICADOR DE DESEMPENHO – MANUTENÇÃO 4.0	
NOME	Aqui será colocado o nome do indicador.
DEFINIÇÃO	Breve descrição do que está sendo avaliado.
FINALIDADE	Os objetivos e metas avaliados por este indicador
FÓRMULAS DE CÁLCULO	Cálculos utilizados para a quantificação do indicador
UNIDADE	Unidade de medida do indicador, exemplo: horas, watts
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	Itens que influenciam no indicador, sem mudar sua natureza.
PERIODICIDADE	Periodicidade da avaliação do indicador
APRESENTAÇÃO	Visualização dos dados, exemplo gráfico de evolução temporal
BENCHMARKING	Avaliação em relação a outros indicadores ou áreas, por exemplo
ÁREAS INTERESSADAS	Áreas da empresa com impacto ou impactadas pelo indicador

Fonte: Autoria própria

Neste trabalho os KPIs são construídos para avaliar o desempenho do sistema de monitoramento de vibrações, dadas as condições apresentadas nos relatórios de condição.

3.2.6 Fase 6: Acompanhamento

Nesta fase, é feito o acompanhamento dos valores dos KPIs propostos na fase anterior. Este acompanhamento deve ser feito periodicamente, conforme indicado no item “PERIODICIDADE” do quadro 5.

A tabela 1 indica as tecnologias utilizadas para fazer o acompanhamento e sua relação com os pilares da indústria 4.0.

Tabela 1 - Relação das Ferramentas com os Pilares da Indústria 4.0

FERRAMENTA	PILAR
Acelerômetro enviando leituras online	IoT
Software (cálculo, geração de gráficos...)	Big Data Analytics
Armazenamento de informações em nuvem (histórico de leituras, relatórios...)	Cloud Computing

Fonte: Autoria Própria

4 RESULTADOS

Seguindo a metodologia proposta neste trabalho, obteve-se os resultados que serão resumidos a seguir. As fases de 1 a 4 foram realizadas em uma fábrica de celulose pela equipe de manutenção, mas os dados não tiveram permissão de publicação. Para este trabalho, tais dados foram substituídos por estimativas que mantêm verossimilhança com os dados reais. Os relatórios de análise de vibração, encontram-se nos anexos A à D deste trabalho, tendo os dados identificadores suprimidos.

A apresentação dos resultados será dada na sequência lógica referente à metodologia deste trabalho, ou seja, primeiramente os dados referentes aos levantamentos dos equipamentos, seguidos da especificação dos KPI's e do acompanhamento realizado deles.

4.1 LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos analisados são:

- Uma prensa de papel;
- Uma bomba de água;
- Um dinamômetro, e
- Um transportador de correia.

As identificações dos mancais não correspondem à identificação em campo e foram criadas apenas para facilitar a compreensão deste trabalho.

Os valores investidos nos equipamentos, a saber os “Custos Ativos”, não podem ser divulgados. Este valor é uma estimativa, apenas para o cálculo dos custos da manutenção do presente trabalho.

A Tabela 2 apresenta as identificações dos mancais, junto com os dados de vibração, rotação e custo.

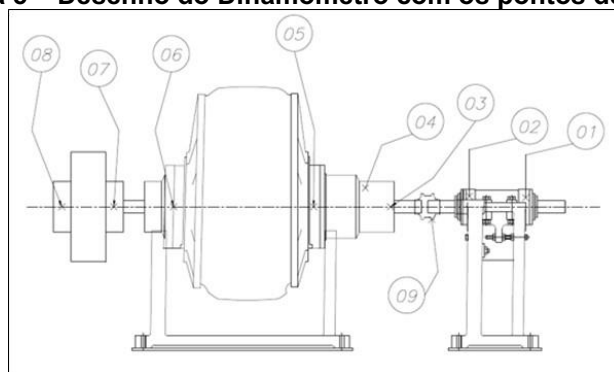
Tabela 2 – Identificações dos equipamentos

Equipamento	Mancal	Identificação	Vibração Indicada	Rotação Indicada	Custo Ativo
Tambor da prensa	LA	1	0,008 gE	5 RPM	R\$ 30000
Motor bomba	LA	2	9 gE	Max. 7000 Hz	R\$ 30000
Motor bomba	LOA	3	9 gE	Max. 2000 Hz	R\$ 30000
Dinamômetro	LA ³	4	0,2 gE	25000 RPM	R\$ 30000
Dinamômetro	LOA	5	1,09 gE	25000 RPM	R\$ 30000
Transportado de Correia	LA	6	18,7gE	1750 RPM	R\$ 30000
Transportado de Correia	LOA	7	11,7 gE	1750 RPM	R\$ 30000

Fonte: Autoria Própria

Por orientação do fabricante, as medidas tiradas serão sempre nos mancais críticos do equipamento, a saber, os do eixo de acionamento. A Figura 5 exemplifica os pontos escolhidos.

Figura 5 – Desenho do Dinamômetro com os pontos de coleta



Fonte: Relatório de condição (Apêndice D)

4.2 CADASTRO DOS PARÂMETROS

Os parâmetros medidos foram a velocidade, aceleração e aceleração envelope. Por motivo de sigilo empresarial, os valores foram omitidos no trabalho.

³ Apesar do relatório (anexo D) apresentar 8 pontos de medição, neste resumo consideraremos apenas os mancais do dinamômetro, a saber os pontos 05 e 06.

4.3 PLANO DE MANUTENÇÃO E RELATÓRIOS DE CONDIÇÃO

Os relatórios utilizados neste trabalho são encontrados nos anexos A à D.

Os planos de manutenção indicados são:

- Manter o acompanhamento das análises espectrais e do plano de manutenção anterior, para o mancal LA1, do tambor da prensa;
- Alterar a carga de trabalho da bomba, abrindo mais a válvula de descarga e incluir o sensoriamento online da mesma (este equipamento teve monitoramento realizado com o coletor de dados offline. Vide anexo B.);
- Para o Transportado de Correia, tanto no motor como no redutor, recomenda-se, substituir os rolamentos e checar os dimensionais e fixações dos componentes acoplados ao eixo. E substituir a carga do lubrificante até que essas intervenções pudessem ser realizadas.
- E para o Dinamômetro, verificar as condições de alinhamento e lubrificação dos mancais.

4.4 RELATÓRIOS DE CONDIÇÃO

Os relatórios se encontram nos anexos A à D.

4.5 CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES E ACOMPANHAMENTO

Os indicadores construídos baseado nos relatórios de análise são:

- Valor global de vibração;
- Disponibilidade, e;
- Custo da manutenção.

Eles serão apresentados em sequência e os valores gerais do acompanhamento estarão resumidos em tabelas, para comparação.

4.5.1 Valor Global de Vibração

O Quadro 6 apresenta a construção do indicador de valor global de vibração, que é uma avaliação do conjunto dos parâmetros velocidade, aceleração e envelope.

Quadro 6 – Apresentação do Indicador - Valor Global de Vibração

NOME	VALOR GLOBAL DE VIBRAÇÃO
DEFINIÇÃO	Amplitude do valor de tendência ou banda larga de frequência de vibração.
FINALIDADE	Indicar as condições de operação e possíveis defeitos
FÓRMULAS DE CÁLCULO	Transformada de Fourier, feita pelo software do sensor
UNIDADE	gE (gravidade envelope). 1 gE equivale a $9,8065\text{m/s}^2$
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	Amplitude e frequência de medição são estabelecidas no software ("canal de medição" ou "faixa de medição").
PERIODICIDADE	O sensor irá medir em tempo real (faixa de milissegundos) e o valor médio é plotado diariamente.
APRESENTAÇÃO	É apresentado na forma de dois gráficos: um de tendência e o outro de espectro da aceleração envelope.
BENCHMARKING	Avaliado em relação à disponibilidade e ao custo de manutenção
ÁREAS INTERESSADAS	PCP, Operação

Fonte: Autoria Própria

Os valores globais de vibração encontrados, em relação aos parâmetros de velocidade, aceleração e envelope, normais, dos rolamentos dos equipamentos analisados foram omitidos por questão de sigilo empresarial. Para os gráficos de apresentação, que são gerados pelo software do sensor, não é necessária nenhuma mudança.

4.5.2 Disponibilidade

Baseado nos valores de vibração e no tempo de análise, foi possível estabelecer a disponibilidade média dos equipamentos, conforme o Quadro 7.

Quadro 7 – Apresentação do Indicador - Disponibilidade

NOME	DISPONIBILIDADE
DEFINIÇÃO	Tempo que o equipamento está operando e produzindo
FINALIDADE	Avaliar o tempo produtivo
FÓRMULAS DE CÁLCULO	Equação 1 (pág. 20)
UNIDADE	%hh
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	O tempo medido pelo sensor
PERIODICIDADE	Valor plotado mensalmente
APRESENTAÇÃO	Tabela de valores
BENCHMARKING	Custo da manutenção.
ÁREAS INTERESSADAS	PCP, Operação

Fonte: Autoria Própria

Os valores de disponibilidade média dos equipamentos, baseados nos valores de disponibilidade dos mancais referentes estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Disponibilidade Média

Equipamento	Tempo total medido (h)	Disponibilidade (%)
Tambor norte da prensa 3070-20-3205-11	3432	99,9%
Motor bomba 3070-26-3531-3	6192	99,9%
Dinamômetro BRAEO44	504	100%
Transportado de Correia 731-TC-010.	9720	97,3%

Fonte: Autoria Própria.

4.5.3 Custo da Manutenção

O Quadro 8 apresenta a construção do indicador Custo da Manutenção.

Quadro 8 – Apresentação do Indicador – Disponibilidade

NOME	CUSTO DA MANUTENÇÃO
DEFINIÇÃO	Viabilidade financeira do sistema de manutenção, dada pelo conjunto de parâmetros de análise
FINALIDADE	Avaliar se a implantação do sistema de manutenção se justifica financeiramente
FÓRMULAS DE CÁLCULO	Análise de Viabilidade (via planilha): VPL, VPL/VPI, Mtir, Payback
UNIDADE	R\$, % e meses.
DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	Ver quadros 5 e 6
PERIODICIDADE	Valor plotado anualmente
APRESENTAÇÃO	Tabela de valores
BENCHMARKING	Indicadores financeiros
ÁREAS INTERESSADAS	PCP, financeiro

Fonte: Autoria Própria

Para o cálculo da viabilidade financeira do sistema de manutenção foram consideradas as premissas financeiras apresentadas no Quadro 9.

Quadro 9 – Premissas financeiras

Descrição	Unidade	Valor
Taxa juros mensal	%	0,7%
Período análise	meses	24
Custo ativo	R\$/pç	30.000,00
Custo investimento sistema monitoramento por equipamento	R\$	193.759,20
Custo de manutenção periódica (base)	R\$/intervenção	5.000,00
Dow Payment do Investimento	%	40%
Levantamento dados – 6 meses	%	35%
Implantação – 2 meses	%	25%
Valor total investimento	R\$	968.796,00

Fonte: Autoria Própria.

E as premissas técnicas apresentadas no Quadro 10.

Quadro 10 – Premissas técnicas

Descrição	Unidade	Valor
Prazo implantação	meses	8
Regime operação	h/dia	24
Dias operacionais ano	d/ano	354
Número de equipamentos em uma unidade fabril	cj	5
Número de sensores por equipamento	pç	1
Parada anual para manutenção	d/ano	11
Custo equipamento parado	R\$/h	1000
Estimativa de vida útil rolamento (base)	h	25488
a cada 3 anos reposição rolamentos	meses	36,0
Aumento de vida útil rolamento (sistema)	%	67%
passará a trocar rolamentos com 5 anos	h	42480
	meses	60,0

Fonte: Autoria Própria.

Calculado fluxo de caixa e plotado no Gráfico 1, podemos resumir a análise de acordo com a Tabela 4.

Gráfico 1 – Fluxo de Caixa



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 – Análise da Viabilidade da Manutenção

RESUMO DA ANÁLISE	
Investimento	R\$ 968.796,00
VPL	R\$223.326,52
VPL/VPI	R\$0,23
Mtir	3,88%
Pay back	22m

Fonte: Aatoria Própria.

Sendo uma estimativa para qualquer um dos rolamentos analisados.

4.6 ACOMPANHAMENTO

No presente trabalho, infelizmente, não foi possível fazer o acompanhamento periódico posterior, sendo que os resultados apresentados no capítulo 4, a seguir, são apenas do período indicado nos relatórios de condição (vide apêndices A à D).

5 CONCLUSÃO

A manutenção, sendo uma função estratégica da organização, deve se acompanhar os avanços da indústria 4.0, pois essa propõe a integração dos ambientes físicos e virtuais para diminuir os tempos de tomada de decisões, seus custos, e aumentar a assertividade destas, ou seja, os objetivos de ambas as matérias estão intrinsecamente alinhados. O uso de indicadores de produtividade permite, neste contexto, quantificar o desempenho da manutenção em relação as metas da organização.

O objetivo principal deste trabalho, “Propor uma metodologia para criar indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração no contexto da indústria 4.0” foi atingido na seção 3.2. A metodologia para criar indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração no contexto da indústria 4.0, foi de fácil utilização e permitiu estabelecer indicadores de produtividade para os parâmetros avaliados, a saber: a disponibilidade, o custo da manutenção e o valor médio global de vibração, assim como sua interação; discriminados na seção 4.4.

Os objetivos específicos foram atingidos conforme listado abaixo:

- a) Revisão da literatura para manutenção industrial, tipos e técnicas de manutenção preditiva, atingido na seção 2.2, 2.3 e 2.4;
- b) Revisão da literatura para identificação e prevenção de falhas e análise de vibração, atingido na seção 2.1;
- c) Revisão da literatura sobre kpis (indicadores de desempenho), atingido na seção 2.6;
- d) Revisão da literatura para indicar a relação da manutenção preditiva com uso de análise de vibrações on-line com a indústria 4.0, atingido na seção 2.5;
- e) Propor os passos para criação de indicadores de produtividade para manutenção preditiva utilizando análise de vibração, atingido na seção 3.2;
- f) Estabelecer e avaliar os indicadores de produtividade para os parâmetros avaliados, a saber: a disponibilidade, o custo da manutenção

e o valor médio global de vibração, assim como sua interação), atingido na seção 4,4.

Algumas dificuldades foram encontradas no desenvolvimento deste trabalho. A maior delas foi a impossibilidade de divulgação de dados pelo sigilo empresarial. Outra foi a quantidade de variáveis dentro do processo, que tornam a criação de indicadores-chave um processo complexo e trabalhoso, apesar de seu acompanhamento ser relativamente simples. E finalmente, a avaliação dos indicadores em relação a produtividade dos equipamentos avaliados não pode ser considerada. Pensando nisso algumas sugestões de trabalhos futuros são:

- Integração da metodologia proposta com o sistema de gestão da qualidade e gestão da produção;
- Estabelecer um indicador-chave de efetividade global, por exemplo OEE (*overall equipment effectiveness*), dentro da metodologia proposta, e, portanto, evitar avaliar os dados em números absolutos e sim em porcentagens (isso permitiria a divulgação de dados sem expor dados sigilosos).

Outros trabalhos sugeridos, não conectados com os objetivos deste trabalho, mas antes a problemas encontrados nos relatórios de condição, dignos de menção são:

- Solução para garantia da lubrificação no rolamento e eliminação de contaminação do lubrificante.

REFERÊNCIAS

- ALEMANHA. BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. **Industrie 4.0**. Disponível em: <<https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>>. Acesso em: 18 set. 2018.
- ALVES, Sylvio. **Análise de Vibração de Máquinas para Manutenção Preditiva**. 2019. Disponível em: <https://venturus.org.br/analise-de-vibracao-de-maquinas-para-manutencao-preditiva/>. Acesso em: 18 mai. 2020
- BANDEIRA, G.; ABREU, G.; GIANELLI, R. **Vibração e ruído em manutenção preditiva**. UNESP, 2010. Disponível em: <https://www.academia.edu/39257740/VIBRA%C3%87%C3%83O_E_RUIDO_EM_MANUTEN%C3%87%C3%83O_PREDITIVA> Acesso em: 18 mai. 2020
- BORDEAUX-REGO, Ricardo *et al.* **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 4. ed. São Paulo: Editora Fgv, 2015.
- BRASIL. ABDI. . **Agenda Brasileira para a Indústria 4.0**. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 18 set. 2018.
- BRETTEL, Malte et al. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **World Academy Of Science, Engineering And Technology International Journal Of Information And Communication Engineering**, [s.i.], v. 8, n. 1, p.37-44, jan. 2014. Disponível em: <<http://waset.org/publications/9997144>>. Acesso em: 04 dez. 2018.
- CISCO. **The Internet of Everything**: How More Relevant and Valuable Connections Will Change the World. 2012. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/dam/global/en_my/assets/ciscoinnovate/pdfs/loE.pdf>. Acesso em: 18 set. 2018.
- CONCEIÇÃO, Maurício Costa da. **Metodologia de análise de falha aplicada à confiabilidade operacional de uma moagem de cimento**. UFS, 2012. Disponível em: <https://nmc.webnode.com.br/_files/200000101-8cb8f8d0e9/TCC_Maur%C3%ADcio%20Costa%20da%20Concei%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 02 nov 2018.
- FAHEEM, M.; GUNGOR, V. C. **Energy efficient and QoS-aware routing protocol for wireless sensor network-based smart grid applications in the context of industry 4.0**. Applied Soft Computing Journal. 2017.
- FERNANDES, Alice Munz; DIETER, Eduardo; UECKER, Juliano; BASSANI, Michel Gehlen; FINIMUNDI, Thiago André; TONDOLO, Vilmar Antonio Gonçalves. Fontes de Evidências em Estudos de Caso Publicados no Enanpad de 2005 a 2014. In: MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, PÓS-GRADUAÇÃO, PESQUISA E EXTENSÃO, 15., 2015, Caxias do Sul. **Paper**. Caxias do Sul: Universidade de

Caxias do Sul, 2015. p. 1-16. Disponível em:
[http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucspgga/xvmostrappga/paper/vi
ewFile/4130/1281](http://www.ucs.br/etc/conferencias/index.php/mostraucspgga/xvmostrappga/paper/vi
ewFile/4130/1281). Acesso em: 18 fev. 2021.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Positivo, 2010.

FITZ-GIBBON, Carol Taylor. **Performance Indicators**. [s.i.]: Multilingual Matters, 1990.

FRANÇA, Lucas G. O. **Desenvolvimento De Um Plano De Manutenção Preventiva Para Um Sistema Eletrônico De Extinção De Faíscas Em Uma Indústria De Beneficiamento De Madeira**. 2017. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.2017.

Gabinete de Segurança Institucional. **Política Nacional de Segurança da Informação**. Disponível em: <<http://www.gsi.gov.br/noticias/2017/politica-nacional-de-seguranca-da-informacao>>. Acesso em: 18 out. 2018.

GOBO JUNIOR, Paulo. **Um modelo de maturidade da indústria 4.0 aplicado na cadeia de suprimentos**. 2020. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de MPGC, Fundação Getúlio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo, São Paulo, 2020.

GRUPO SKF. **Bearing maintenance handbook**. [S.l]: Grupo Skf, 2012. 454 p. Disponível em: https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d1968083afa2-SKF-Bearing-maintenance-handbook---10001_1-PT-BR_tcm_45-463040.pdf. Acesso em: 18 dez. 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica**. Volume 2. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

HOFMANN, Erik; RÜSCH, Marco. **Industry 4.0 and the current status as well as prospects on logistics**. Computers in Industry, v. 89, p. 23-34, 2017. International Data Corporation. 2020. Disponível em <https://www.idc.com/>. Acesso em: 17 out 2020.

INVILUTION. **Comprehensive Solution**. Disponível em: <<http://www.invilution.com/comprehensive-solution>>. Acesso em: 18 set. 2018. I-SCOOP. **Industry 4.0: the fourth industrial revolution – guide to Industrie 4.0**. Disponível em: <<https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>>. Acesso em: 18 out. 2018.

I-SCOOP. **Smart industry and smart manufacturing – industrial transformation**. Disponível em: <<https://www.i-scoop.eu/manufacturing-industry/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

KARDEC, Alan; SEIXAS, Eduardo; FLORES, Joubert. **Gestão estratégica e indicadores de desempenho**. Rio de Janeiro: Abraman, 2002. (Manutenção;6).
LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation and modeling analysis**. [s.i.]: Mcgraw-hill Higher Education, 2006.

MARCORIN, Wilson Roberto; LIMA, Carlos Roberto Camello. **Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos**. Revista de Ciência & Tecnologia, Santa Barbara do Oeste, v. 11, n. 22, p. 35-42, dez. 2003.

MARR, Bernard. **What Everyone Must Know About Industry 4.0**. 2016. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2016/06/20/what-everyone-must-know-about-industry-4-0/#50899deb795f>>. Acesso em: 18 set. 2018.

MICROSOFT AZURE. **O que é a cloud?** Disponível em: <<https://azure.microsoft.com/pt-pt/overview/what-is-the-cloud/>>. Acesso em: 18 out. 2018.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. São Paulo: Poli-Usp, 2007. 17 v. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100015>. Acesso em: 29 mar. 21.

NEPOMUCENO, Lauro Xavier. **Técnicas de manutenção preditiva**. Volumes 1 e 2. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

NIKU, Saeed B. **Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications**. [s.i.]: LTC, 2001.

OLIVEIRA FILHO, Marcus Vinícius Manfrin de. **Identificação Experimental De Trincas Em Vigas Para Monitoramento De Integridade Estrutural**. 2017. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PWC. **Industry 4.0 - Enabling Digital Operations**. Disponível em: <<https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

RAMOS, Alexandre Carlos Rodrigues. **Análises das diferenças de posicionamentos de sensores em instrumentações vibroacústicas automotivas no desenvolvimento de produtos**. 2015. 127 páginas. Dissertação de mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ROMANO, Matheus. **Entenda tudo sobre a integração na indústria 4.0 e conheça as integrações horizontal e vertical.** 2017. Disponível em:

<<https://www.logiquesistemas.com.br/blog/integracao-na-industria-40/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

RUSSOM, P. **Big data analytics.** [s.i.]: Tdwi Best Practices Report, 2011. Fourth quarter. Disponível em: <vivamente.com>. Acesso em: 18 set. 2018.

SALOMÃO FILHO, Luis Felipe. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Gestão de Ativos.** UFRJ, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005471.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

SANCTIS, Anna L. B., SILVA, Luiz F. A. **Identificação das tecnologias digitais nos serviços de visualização de conteúdo para o entretenimento no contexto da Indústria 4.0.** 2020. 74p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

SANTOS, Valdir Aparecido dos. **Manual prático da manutenção industrial.** [s.i.] São Paulo: Ícone, 2007.

SILVA, Danilo A. da; MASSOTI, João G B.; PEREIRA, Marcelo G. **Aumento De Confiabilidade De Ventiladores Industriais Utilizando Técnicas Preditivas E Sistemas Auto Alinháveis.** O Papel, [S.L], v. 77, n. 8, p. 70-76, ago. 2016.

Disponível em: <http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1471997624_fe6b5b976c7bd97844979f48e6b097ec_1677570877.pdf>
Acesso em: 13 ago. 2020.

VENTURELLI, Marcio. **MATURIDADE PARA INDÚSTRIA 4.0:** avaliação quantitativa e qualitativa do nível de tecnologia, gestão e pessoas para implantação da digitalização. Avaliação Quantitativa e Qualitativa do Nível de Tecnologia, Gestão e Pessoas para Implantação da Digitalização. 2019. Disponível em:

<https://marcioventurelli.com/2019/11/13/maturidade-para-industria-4-0/>. Acesso em: 18 mar. 2021.

YIN, Robert K.. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 205 p. (ISBN 9781452242569)

APÊNDICE A - Avaliação das condições do Mancal Lado Acionamento do Tambor Norte da Prensa

Avaliação das condições do Mancal Lado Acionamento do Tambor Norte da Prensa 20-3205-11

Tema	Avaliação do Mancal LA do Tambor Norte da Prensa 11 Fábrica A
Tag	3070-20-3205-11
Data	30/04/2020
Responsável	
Consultores	

1. OBJETIVO

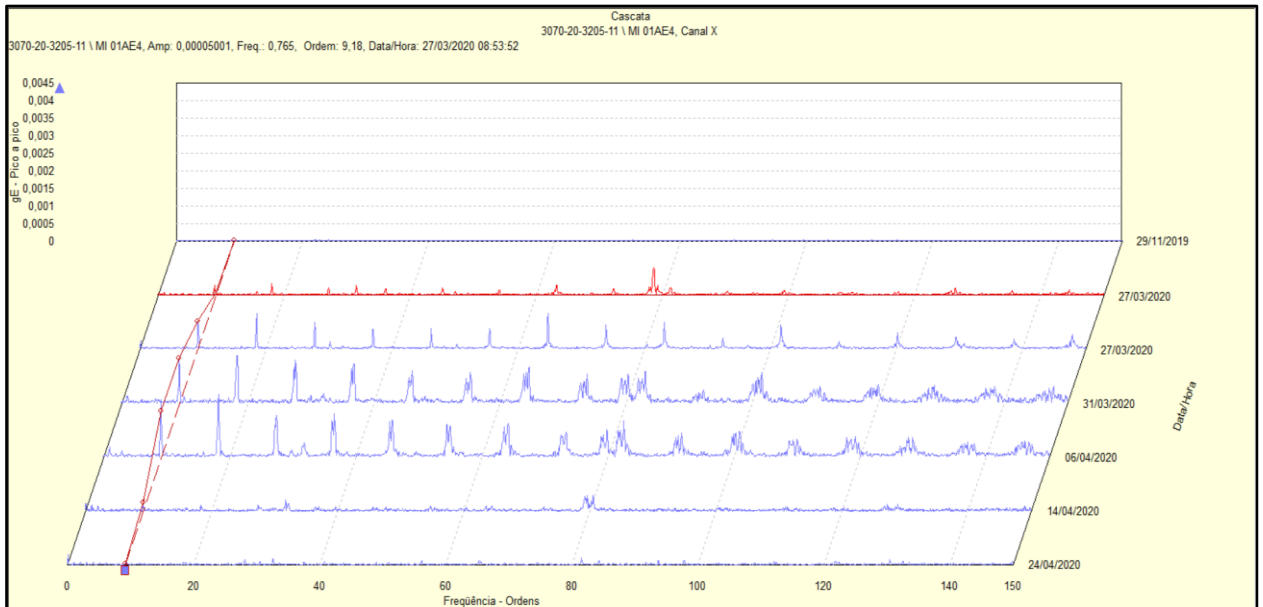
Avaliar as condições atuais do Mancal lado acionamento do Tambor Norte da Prensa da Fábrica A 20-3205-11 através das técnicas preditivas de monitoramento. Em 27/03/2020 foi identificado sinais de defeito na pista externa do rolamento do mancal LA e presença de particulado metálico.

2. AVALIAÇÃO COMPORTAMENTAL DO ROLAMENTO

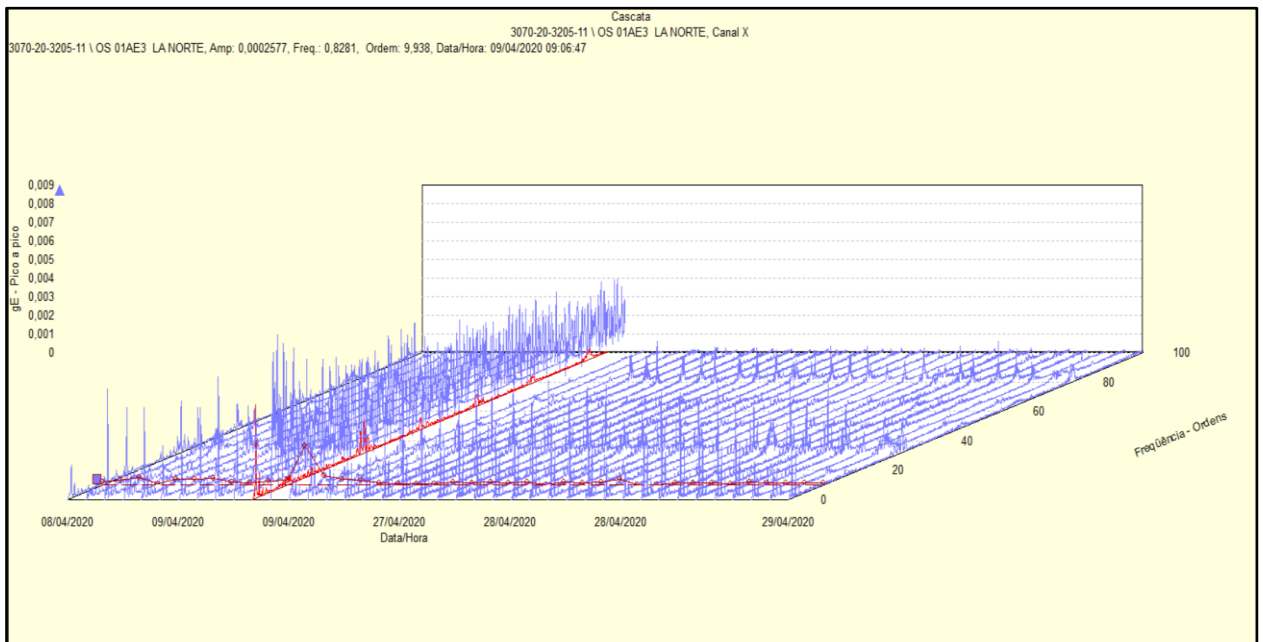
Avaliando as condições apresentadas até o momento pelas técnicas preditivas monitoradas, foram observadas as seguintes condições:

- Observado nas imagens espectrais decréscimo nas amplitudes de vibração das frequências de defeito na pista externa do rolamento tanto no monitoramento online quanto no método offline de medição (gráficos 1 e 2).
- Intermitência nas imagens espectrais em número de amostragens pouco significativo com características de alteração no nível de energia indicativos de variações nas condições operacionais (gráfico 2).
- Apesar do decréscimo nas amplitudes, ainda são observadas as frequências de defeito na pista do anel externo em ambos os métodos de monitoramento: online e offline (gráficos 3 e 4).
- Laudo de análise ferrográfica do óleo com amostra retirada em 02/04/2020 apresenta, embora em baixa quantidade, presença de particulado dos elementos ferro, níquel e também Índice de PQI moderado reforçando o embasamento da presença de defeito (gráfico 5).
- Análise de óleo interna não vem apresentando nas amostras coletadas evolução na quantidade de particulado metálico.
- Inspeções semanais sem a presença significativa de contaminação até o momento.
- Foi retirada em 22/04/2020 uma nova amostra de óleo para análise ferrográfica em laboratório externo a fim de avaliar a condição com maior tempo em operação.

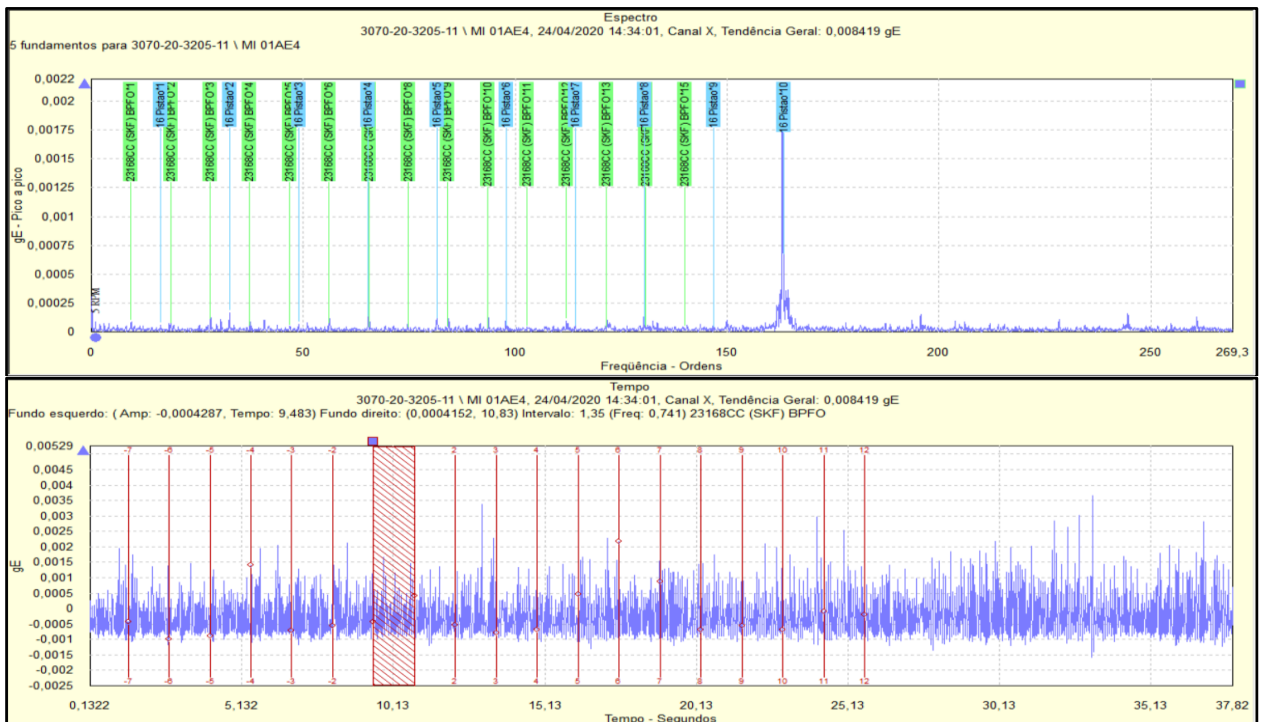
4. GRÁFICOS DE VIBRAÇÃO



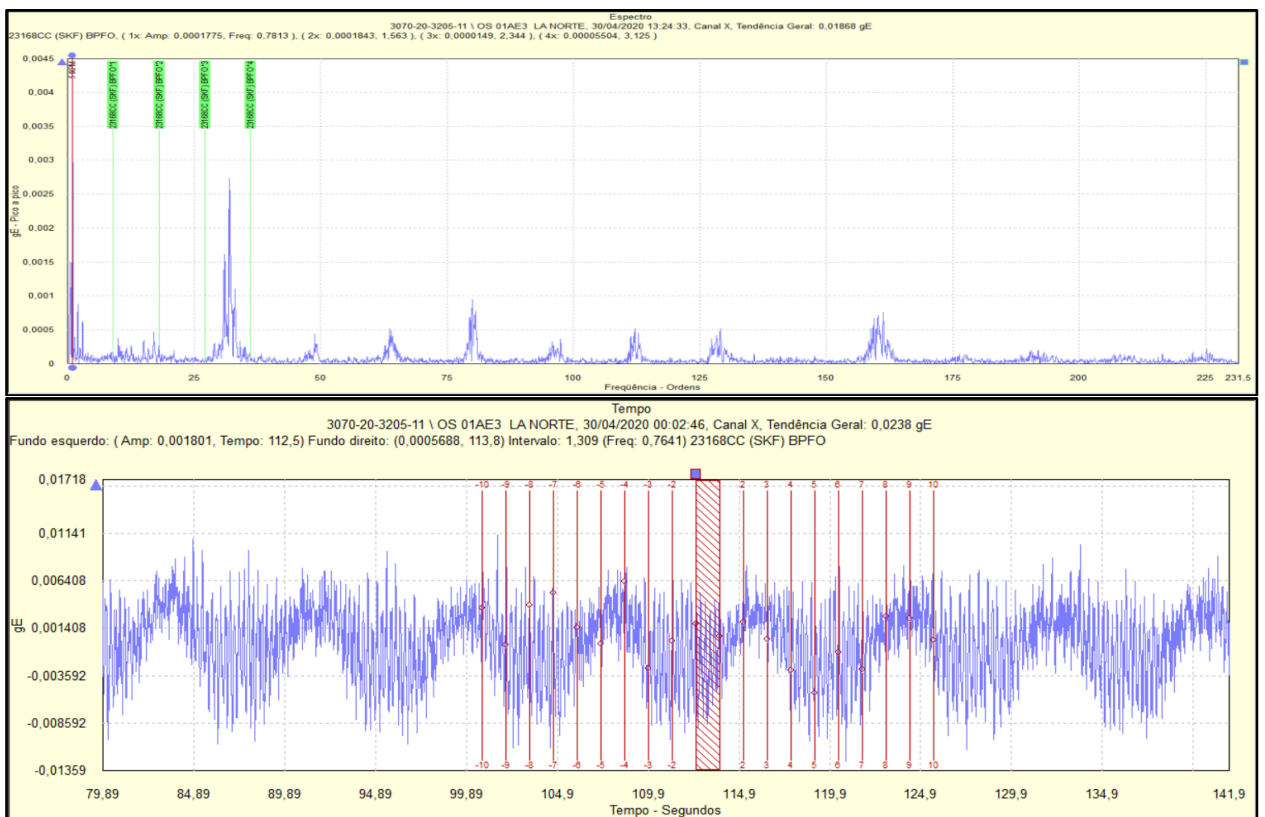
1 – Gráfico de cascata em envelope filtro 4 no mancal LA (offline): decréscimo das amplitudes de vibração das frequências indicativas de defeito.



2 – Gráfico de cascata de envelope filtro 3 no mancal LA (Online): cursor sob a frequência fundamental do defeito de pista externa apresentando evolução e em seguida tendência linear decrescente.



3 – Espectro e tempo em envelope filtro 4(Offline): medição atual permanece com as frequências indicativas de defeito na pista externa do rolamento.



4- Espectro e tempo envelope filtro 3 (Online): medição atual permanecem com as frequências indicativas de defeito na pista externa, porém com amplitudes mais baixas..

Dados da Amostra								Desgaste										Contaminação					Água	
Amostra	Status	Coleta	Resultado	Horímetro	h amostra	Troca?	Adição	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Pb (ppm)	Sn (ppm)	Ni (ppm)	Mn (ppm)	Ti (ppm)	V (ppm)	Mg (ppm)	Ag (ppm)	PQI	P (ppm)	Al (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Kf Vol. (ppm)
200008336	Normal	02/04/2020	23/04/2020		1440	Sim		106	0	1	0	1	2	0	0	0	1	0	52	2	1	3	0	281
1900141931	Anormal	06/05/2019	29/05/2019		11378	Não		85	0	1	0	2	0	1	0	0	0	0	15	1	0	0	1	1057
1800234900	Anormal	22/02/2019	18/03/2019		9576	Não	2.0	251	0	3	0	0	3	1	0	0	2	0	62	3	0	0	2	834
1800307515	Crítico	29/01/2019	13/02/2019			N/A		147	0	2	2	0	0	0	0	0	1	0	85	0	0	0	0	464
1800310208	Anormal	07/11/2018	28/11/2018	85000	9000	N/A		201	1	3	2	0	1	0	0	0	2	0	8	2	0	0	0	717

Amostra	Fluido			Condições do fluido				Carga Aditiva					
	Óleo	Volume	Cor em lubrificante (NA)	Visual	Viscosidade 40°C (cSt)	TAN (mg/KOH/g)	Cor	P (ppm)	Zn (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	B (ppm)	Sr (ppm)
200008336	1500 KLUBER KLUBEROIL UH1 - 1500 N	40,0	Castanho Claro	Normal	1304,45	0,642		651	12	1	0	0	0
1900141931	1500 KLUBER KLUBEROIL UH1 - 1500 N	40,0	Castanho Escuro	LG	1142,30	2,610		138	2	0	0	0	0
1800234900	1500 KLUBER KLUBEROIL UH1 - 1500 N	40,0	Castanho Claro	Normal	1123,69	2,567		466	30	21	14	0	0
1800307515	1500 KLUBER OIL UH1	40,0		IP / Turva	1066,00	2,701	Castanho escuro	267	7	0	0	3	0
1800310208	1500 KLUBER OIL UH1	40,0		Normal	1135,01	0,565		574	24	1	0	8	0

5- Laudo de análise ferrográfica da amostra coletada no dia 02/04/2020: presença de particulado de ferro, níquel e Índice de PQI moderado apesar do pouco tempo em operação.

4. CONCLUSÃO / RECOMENDAÇÕES

Avaliando as técnicas preditivas monitoradas observa-se a presença de sinais indicativos de defeito na pista externa do rolamento do mancal LA do tambor norte da prensa 11 logo ao ser retomada a operação. Esta afirmação tem base na técnica de análise de vibração tanto pelo método online quanto na medição offline. O laudo de análise ferrográfica de óleo da amostra do dia 02/04/2020 apresenta partículas dos elementos ferro, níquel e índice de PQI com valores moderados mesmo apesar do pouco tempo de operação, também características estas da presença de defeito no rolamento.

Ao longo do acompanhamento foi observado um decréscimo nas amplitudes de vibração das frequências de defeito na pista externa. Tal condição geralmente está relacionada ao alongamento da extensão do defeito atenuando os impactos gerados na passagem dos elementos rolantes do rolamento sob a superfície em dano.

Uma hipótese que podemos considerar seria uma corrosão superficial no rolamento devido ao tempo parado que, ao retornar em operação se desprende gerando partículas e impactos nas imagens espectrais, aumentou sua extensão e reduziu as amplitudes de vibração.

A estabilidade neste momento do comportamento vibratório bem como a presença de particulado observado na análise interna nos direciona para a possibilidade de permanência do rolamento em operação. O resultado do laudo de análise ferrográfica com a amostra retirada em 22/04/2020 também nos auxiliará na análise comportamental do defeito e cenário apresentados.

Como recomendações sugerimos manter em curso as ações definidas anteriormente no plano de acompanhamento.

APÊNDICE B - Avaliação das condições da Bomba do Poço de Coleta do Forno de Cal C

Relatório de Análise de Condição

Cliente

Equipamento Bomba do poço de coleta

Área Forno de Cal - C

Data 06/04/2021

Responsável

Consultores

CONTEÚDO

1. Introdução.....	3
2. Ferramentas	3
3. Foto do Equipamento	3
4. Histórico de Manutenção	4
5. Análise de vibração.....	5
6. Comentários Finais	10
7. Recomendações	10

1. Introdução

O objetivo deste relatório é apresentar a condição da bomba do poço de coleta do Forno de Cal C, TAG 3070-26-3531-3, devido a falha do equipamento no dia 24/05/2020. A ideia é verificar o histórico de vibração e avaliar a condição do conjunto para identificar as possíveis causas da ocorrência.

2. Ferramentas

. **Coletor de dados Gx:** Coletor de dados da SKF utilizado para realizar monitoramento de vibração rotineira dos equipamentos.



Coletor GX da SKF.

3. Foto do Equipamento



Foto da bomba do poço de coleta – TAG 3070-26-3531-3

4. Histórico de Manutenção

Abaixo segue o histórico de manutenção da bomba do Poço de coleta. Nos últimos 03 meses já tivemos 04 ocorrências.

- . 01/03/2020: Bomba substituída devido a falha no selo mecânico.
 - . Obs. Na ocasião foi substituído por uma mancal a graxa.
- . 05/04/2020: Bomba substituída devido a falha nos rolamentos.
- . 08/04/2020: Bomba substituída devido a falha nos rolamentos.
 - . Obs. Retorno o mancal lubrificado a óleo.
- . 24/05/2020: Bomba substituída devido a falha nos rolamentos.



- . Fotos da bomba substituída em 24/05/2020

5. Análise de vibração

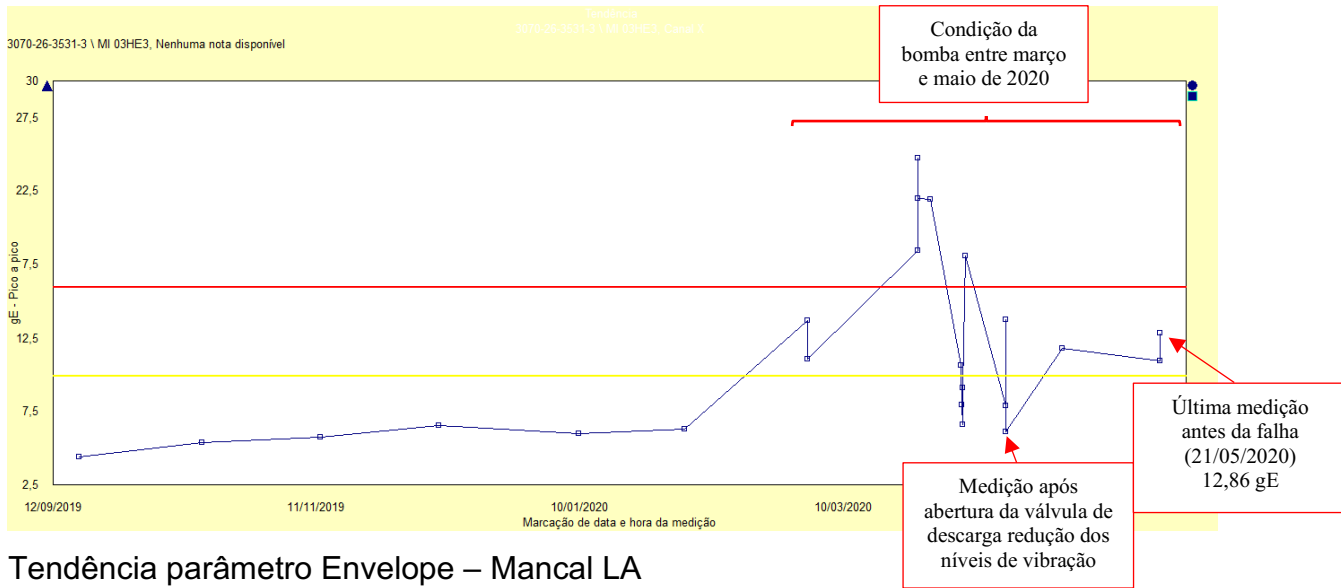
Após a falha ocorrida no dia 08/04/2020 uma das ações foi o monitoramento semanal do conjunto motor bomba 3070-26-3531-3, a coleta de dados é realizada via coletor Gx da SKF, sendo a última data de monitoramento antes da ocorrência do dia 24/05/2020 foi realizada no dia 21/05/2020, ou seja 03 dias antes.

Quando avaliamos o histórico de vibração do conjunto observamos que após o mês de Março de 2020 a bomba trabalha com um nível de energia elevado, principalmente em alta frequência, ou seja, nos parâmetro aceleração e envelope. Quando avaliamos os espectros notamos que o sintoma de **cavitação** é predominante em todo período avaliado, tendo a partir da data de 01/03/2020 um período em que os níveis de vibração estavam patamares superiores ao histórico de trabalho.

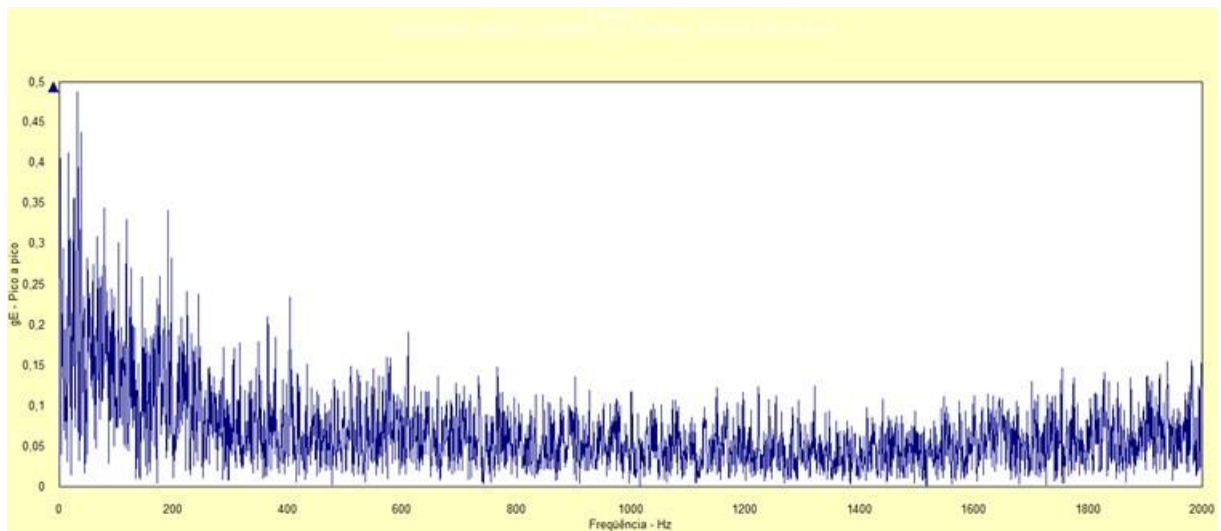
Desde a falha ocorrida em 05/04/2020 a bomba apresenta níveis de vibração acima de 20 gE no parâmetro envelope, sendo que o histórico indica um valor de 8 gE de média. Um fato importante neste período, ocorreu no dia 16/04/2020, quando a operação fez uma manobra abrindo mais a válvula de descarga, na ocasião a vibração que estava na faixa de 25 gE foi reduzida a 9 gE, sendo este o patamar normal de vibração da bomba.

Na última coleta realizada antes da ocorrência o parâmetro aceleração apresentava 4,9 g e envelope estava na faixa de 25 gE, sempre com indicação de cavitação. Este sintoma é caracterizado nos espectros por frequência randômicas, as quais se apresentam aleatoriamente, não indicando frequências específicas de defeito nos componentes da bomba.

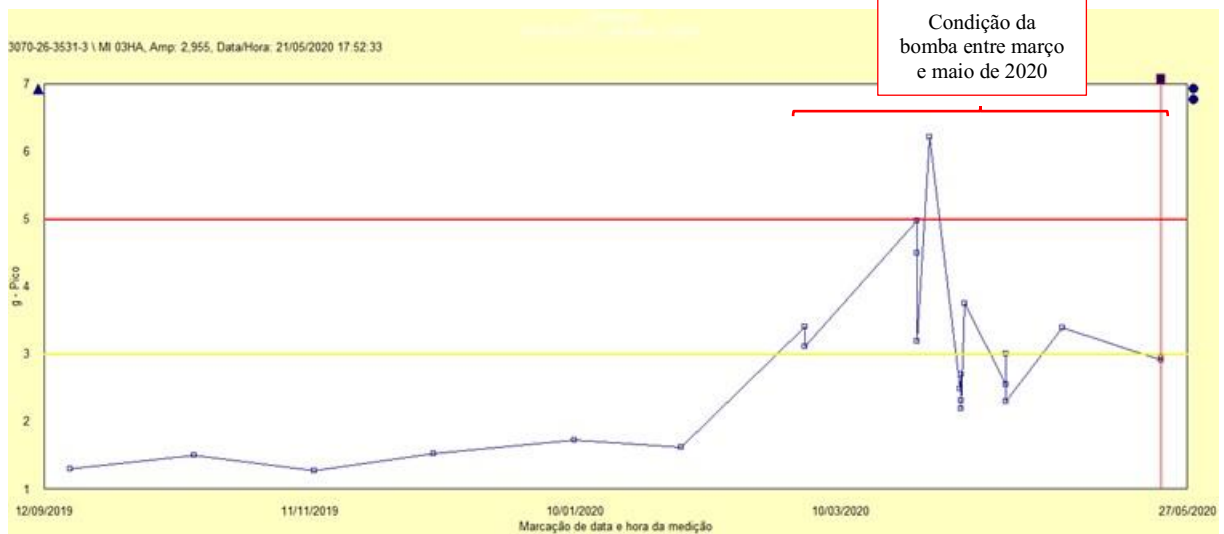
. Tendências e espectros



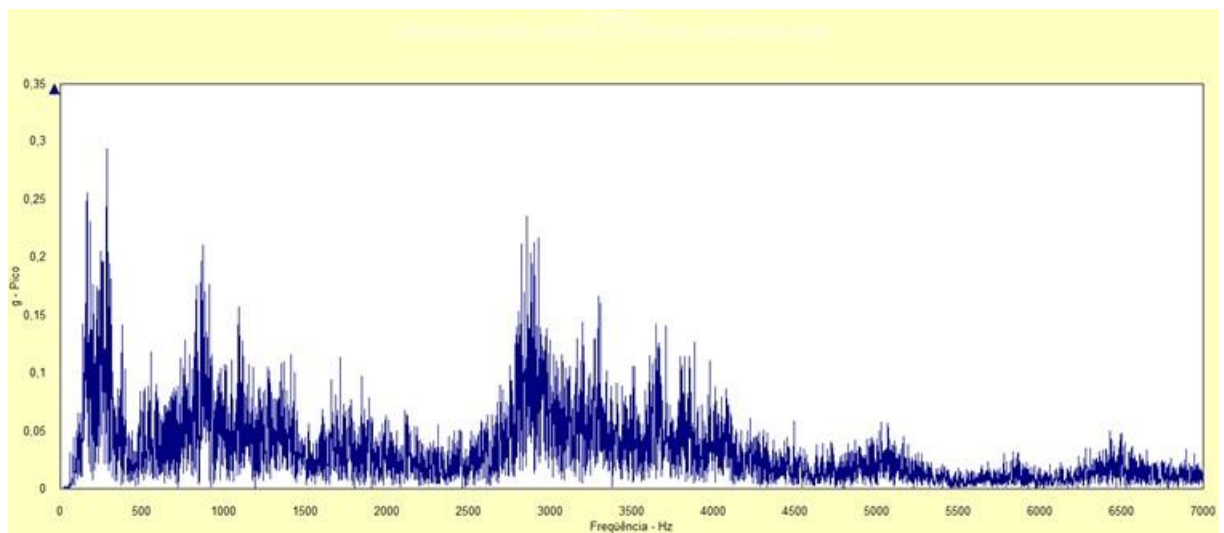
Tendência parâmetro Envelope – Mancal LA



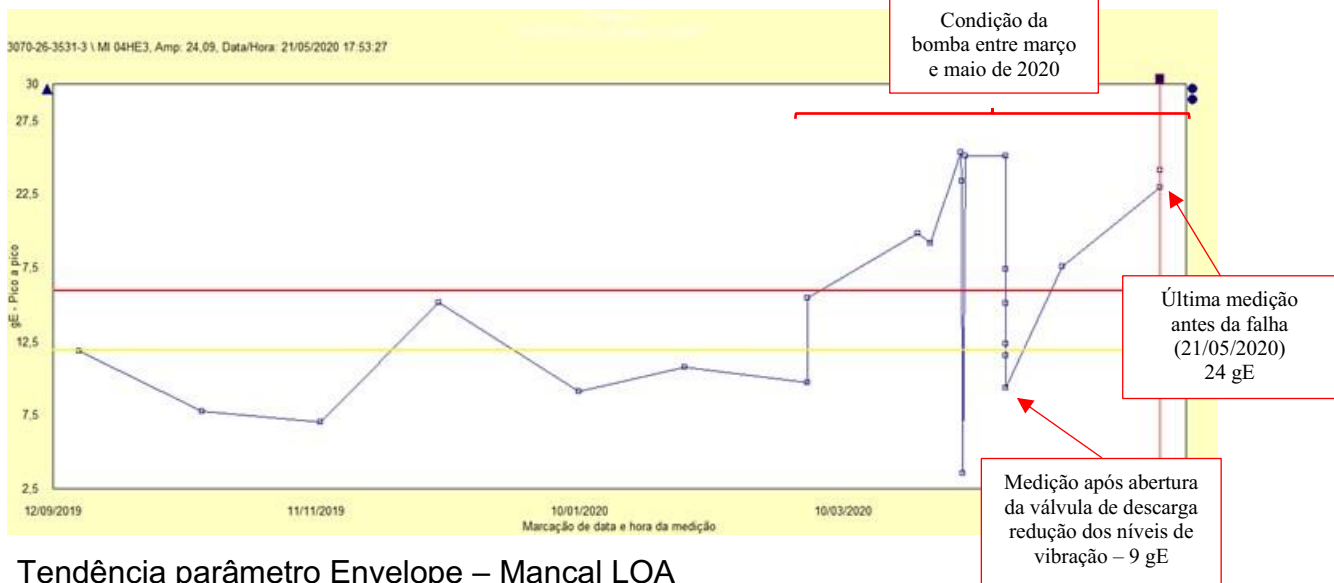
Espectro parâmetro envelope do mancal LA coletado dia 25/05/2020, observa-se “carpete elevado”, sendo que na região de baixa frequência com as maiores amplitudes, características de cavitação.



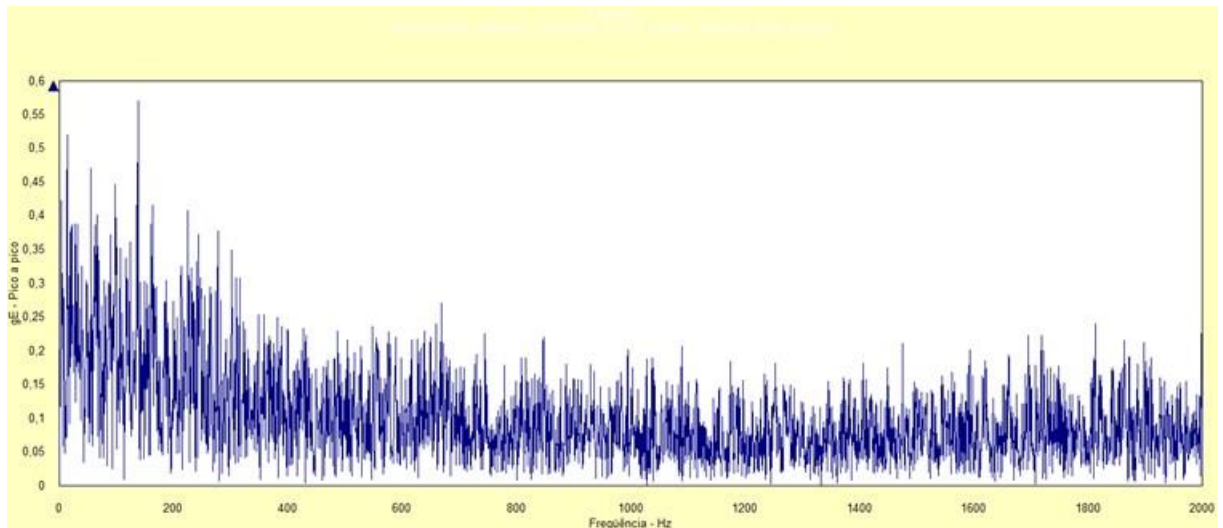
Tendência parâmetro aceleração – Mancal LA



Espectro parâmetro aceleração do mancal LA coletado dia 25/05/2020, Frequência de característica randômica, não observa-se características de defeito nos componentes da bomba.



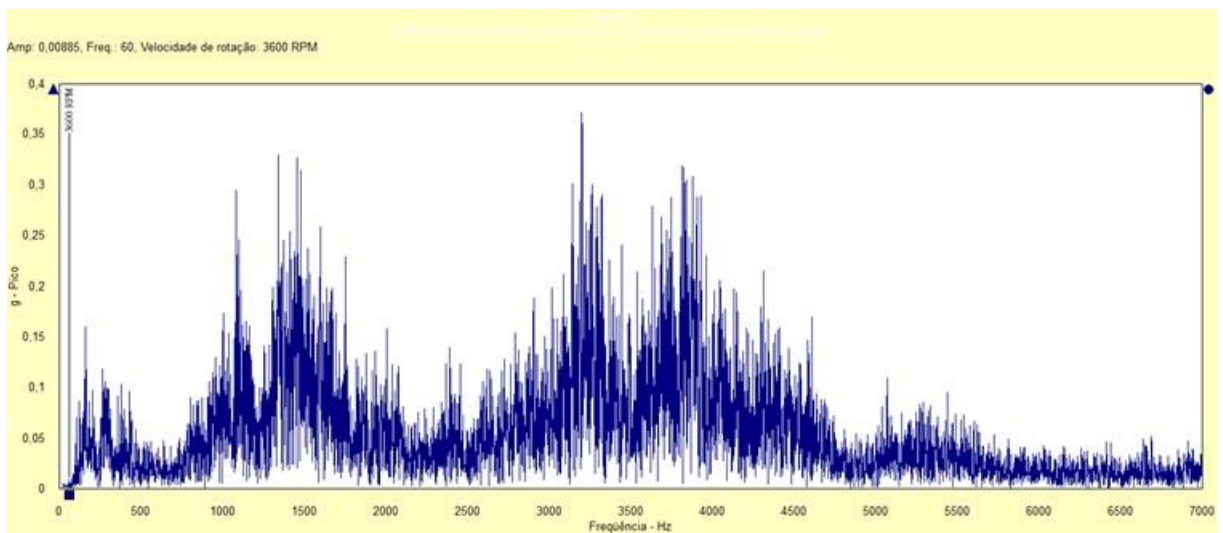
Tendência parâmetro Envelope – Mancal LOA



Espectro parâmetro envelope do mancal LOA coletado dia 25/05/2020, observa-se “carpete elevado”, sendo que na região de baixa frequência com as maiores amplitudes, características de cavitação. É a mesma característica do mancal LA, porém o espectro apresentado acima tem nível de energia bem elevado, acima de 24 gE.



Tendência no parâmetro aceleração mancal LOA.



Espectro parâmetro aceleração do mancal LOA coletado dia 25/05/2020, Frequência de característica randômica, não observa-se características de defeito nos componentes da bomba.

6. Comentários Finais

De acordo com o histórico avaliado da bomba do poço de coleta do Forno de Cal C, 3070-26-3531-3, tendo os níveis de vibração e também as características dos espectros analisados como parâmetros. É possível dizer que o conjunto analisado está sofrendo alteração na condição devido ao processo, este fato é caracterizado pelo sintoma de cavitação observado em todos os parâmetros monitorados da bomba.

No período entre 01/03 e 24/05 é observado que os níveis de vibração alcançaram patamares acima do histórico, sempre apresentando o sintoma de cavitação. Se avaliarmos a condição apenas pelos elevados níveis de vibração, principalmente em alta frequência, já é possível evidenciar que os rolamentos estão sofrendo uma carga acima da permitida.

Devido a variação dos níveis de vibração a coleta de vibração com o coletor de dados portátil pode não se tão eficiente, sendo que neste caso o sistema on line é mais recomendado. Com o on line será possível monitorar o conjunto com a mais variadas condição de processo, sendo possível uma análise mais confiável do equipamento.

7. Recomendações

Já existe análise de falha referente as ocorrências anteriores nesta bomba e pela avaliação realizada após a falha do dia 24/05 observamos que se trata de condições muito semelhantes. A sugestão é realizar as recomendações do relatório AF-3531-10 do dia 05/04/2020, onde as propostas para melhorias são muito pertinentes as falhas ocorridas.

Para maior confiabilidade da análise recomendamos o monitoramento do conjunto motor e bomba com sistema on line da SKF.

**APÊNDICE C - Avaliação das condições do Monitoramento De Vibração do Transportados
de Correia**

MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO 731-TC-010

Cliente

Data

A/C

Responsável

Consultores

1	OBJETIVO	3
2	INSTRUMENTOS UTILIZADOS	3
3	PROCEDIMENTOS UTILIZADOS.....	4
4	DO PONTO DE VISTA VIBRACIONAL	4
5	MOTOR – ANALISE – GRAFICOS DE TENDENCIA E ESPECTRO.....	6
6	REDUTOR – ANALISE – GRAFICOS DE TENDENCIA E ESPECTRO.....	7
7	RECOMENDAÇÃO	10

1 OBJETIVO

Elaborar parecer técnico de vibrações do conjunto Transportado de Correia
731-TC-010.

RPM – 1750

MOTOR: ROL LOA – 6213

ROL LA - 6312

REDUTOR: RPM ENTRADA – 1750

RPM SAIDA - 59,9

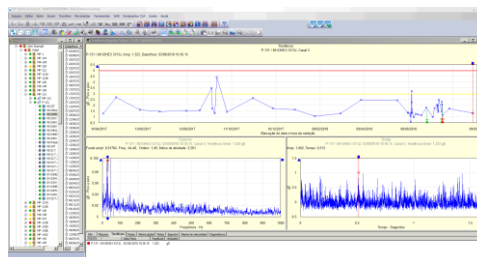
SEW KH 97/AM 160 1:34,23

i	Stages	i1	i2	i3	z1	z2	z3	z4	z5	z6
34.23	3	4.043	1.632	5.188	23	93	19	31	16	83

2 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

A instrumentação e os programas computacionais utilizados nas medições para a análise de vibrações convencional foram as seguintes:

- Coletor/Analisador de Dados: SKF GX 70;
- Sensores Acelerômetros: SKF CMMS2200;
- Programas computacionais/Gerenciamento: SKF Aptitude v9;



3 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Monitoramento realizado conforme disponibilidade dos equipamentos, dados foram analisados pela técnica de vibrações e sensitiva.

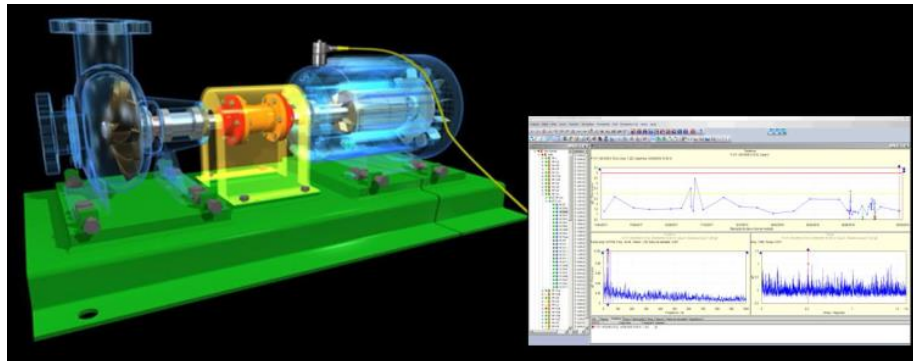


Imagem ilustrativa de coleta de dados

4 DO PONTO DE VISTA VIBRACIONAL

A Análise de vibrações é o processo pelo qual as falhas em componentes móveis de um equipamento são descobertas através da taxa de variação das forças dinâmicas geradas. Tais forças afetam o nível de vibração, que pode ser avaliado em pontos acessíveis das máquinas, sem interromper o funcionamento dos equipamentos.

Uma máquina, caracterizada por suas partes móveis, vibrará de acordo com as frequências características dos seus componentes. Cada tipo de máquina possui uma "ASSINATURA ESPECTRAL ORIGINAL"

Todos os componentes comuns, possuem diferentes e particulares frequências de vibração, que podem ser isoladas e identificadas. A amplitude de cada componente de vibração distinta, deverá permanecer constante ao longo do tempo, caso não ocorram alterações na dinâmica operacional da máquina ou mudança na integridade dos componentes.

No evento de um ou mais componentes começarem a falhar, a amplitude da vibração começará a mudar. O monitoramento de vibração é o processo de descobrir e analisar essas mudanças. Através da análise de espectro aplicado ao sistema inteiro, é

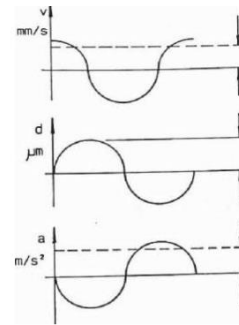
possível identificar as características de vibração de cada componente individual e acompanhar sua condição.

Os parâmetros de vibração são medidos em unidades métricas de acordo com normas, DIN7090, ISO2372, atualmente substituída pela ISO10816, sendo:

Velocidade : mm/s.

Deslocamento : (Mícron).

Aceleração : m/s²



Os **valores globais** têm por finalidade mostrar o grau de severidade de um problema levando-se em conta o histórico de funcionamento, nas **análises de espectros** podemos enxergar a origem do problema e elaborar plano de ação para corrigir as anomalias.

5 MOTOR – ANÁLISE – GRÁFICOS DE TENDÊNCIA E ESPECTRO

Valores de vibrações elevados em componentes característicos de atrito na última coleta, em dados coletados anteriormente presente sintomas de rolamento porem dentro de uma condição aceitáveis, a vibração existente no motor está sendo gerada pelo redutor.

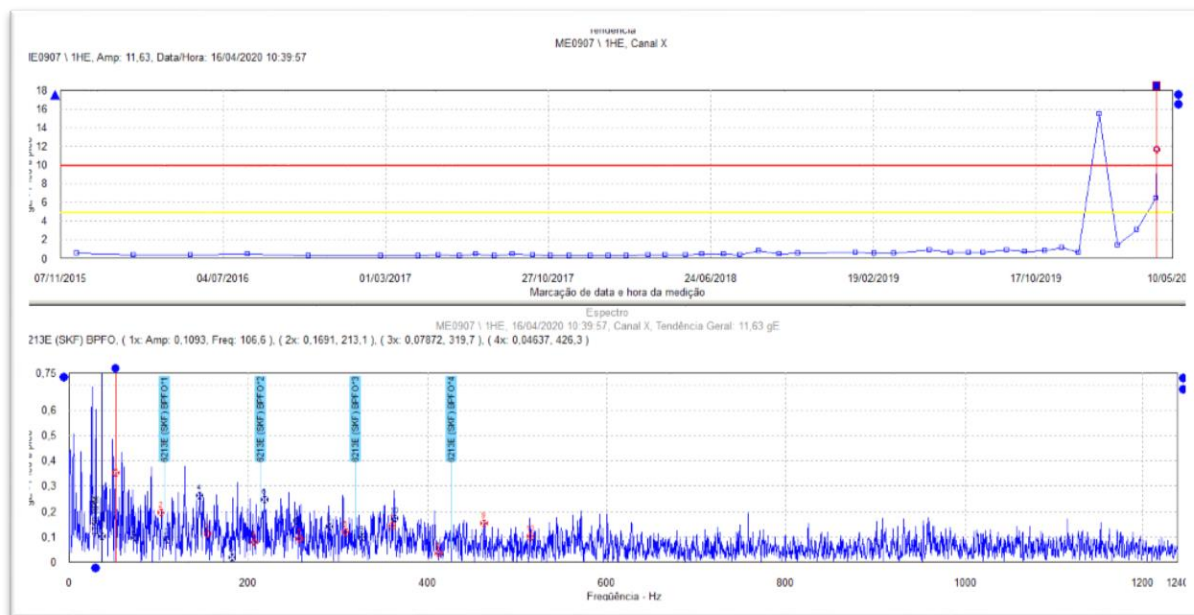


Imagem 01 – mancal LOA parâmetro envelope da aceleração

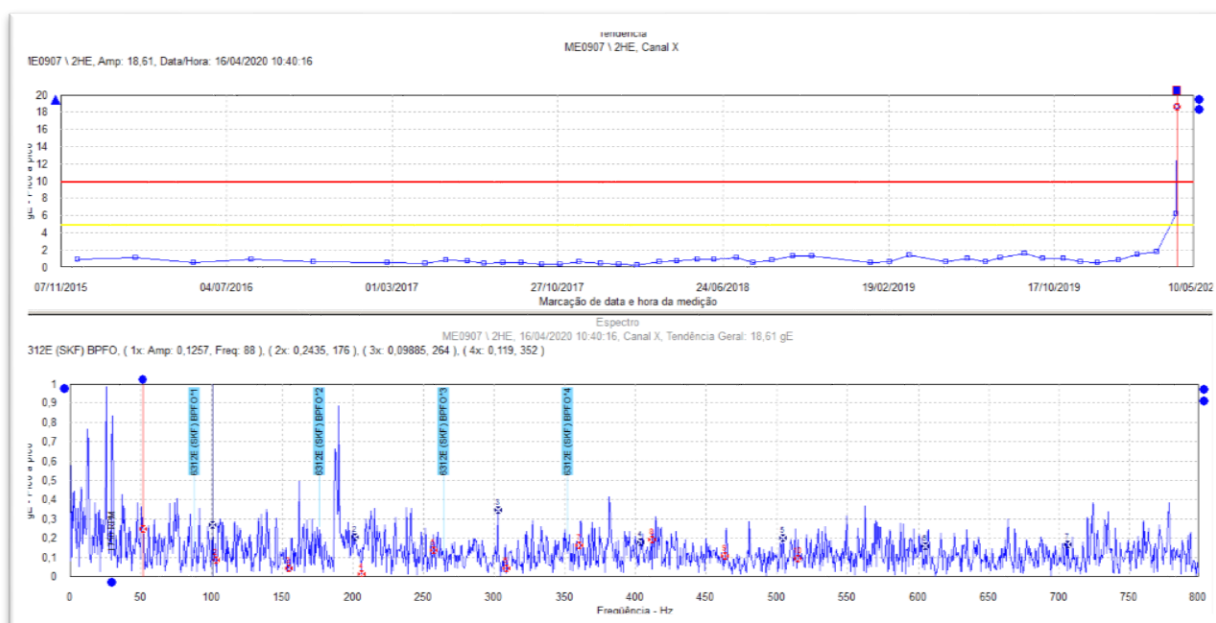


Imagem 02 – mancal LA parâmetro envelope da aceleração

6 REDUTOR – ANÁLISE – GRÁFICOS DE TENDÊNCIA E ESPECTRO

Em todos os mancais os níveis de energia vibracional se exponenciaram a parâmetros acima do comportamento vibracional normal do redutor, média de trabalho normal se encontra abaixo de 4gE, na análise espectral as informações colhidas apontam para problemas de atrito metal, não há destaque para um componentes específico, o ponto de maior energia está no eixo de entrada do redutor conforme imagem abaixo.

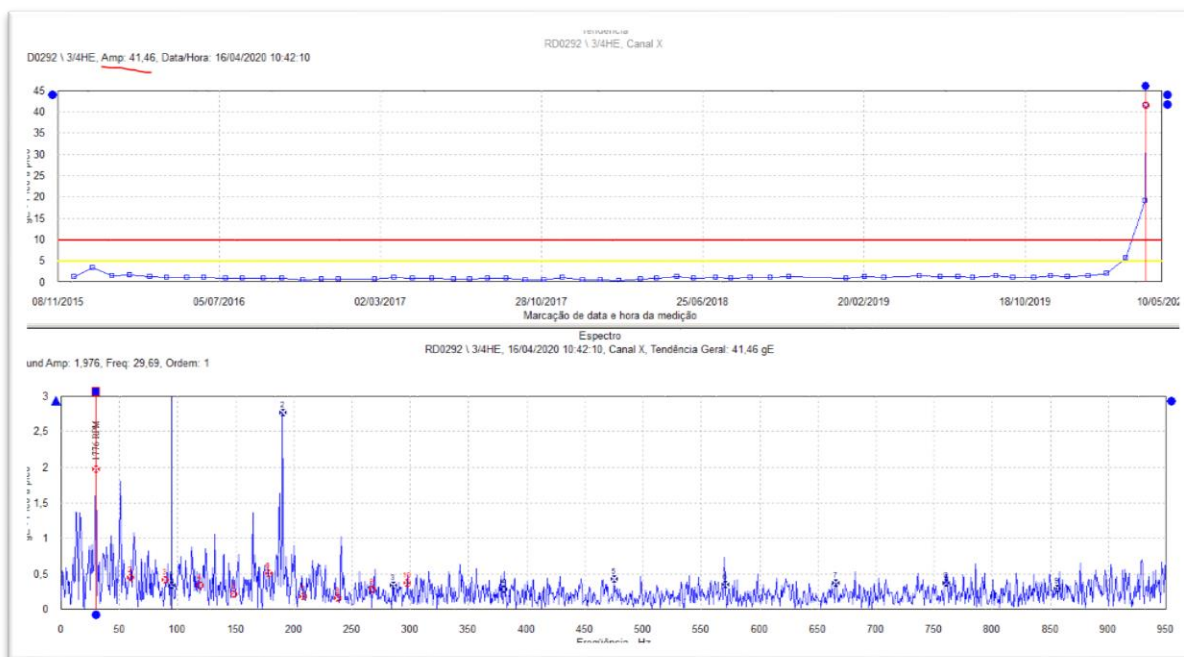


Imagem 03- mancal eixo de entrada pontos 3/4 - envelope da aceleração 41gE

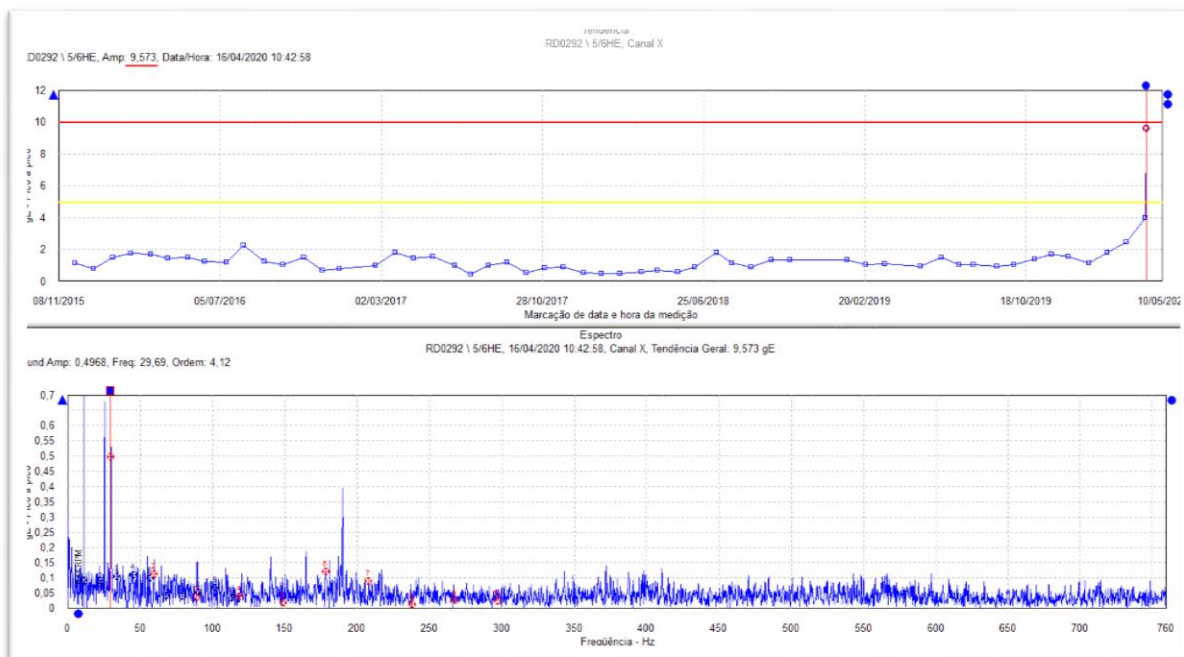


Imagem 04- mancal eixo intermediário pontos 5/6 - envelope da aceleração 9,5gE

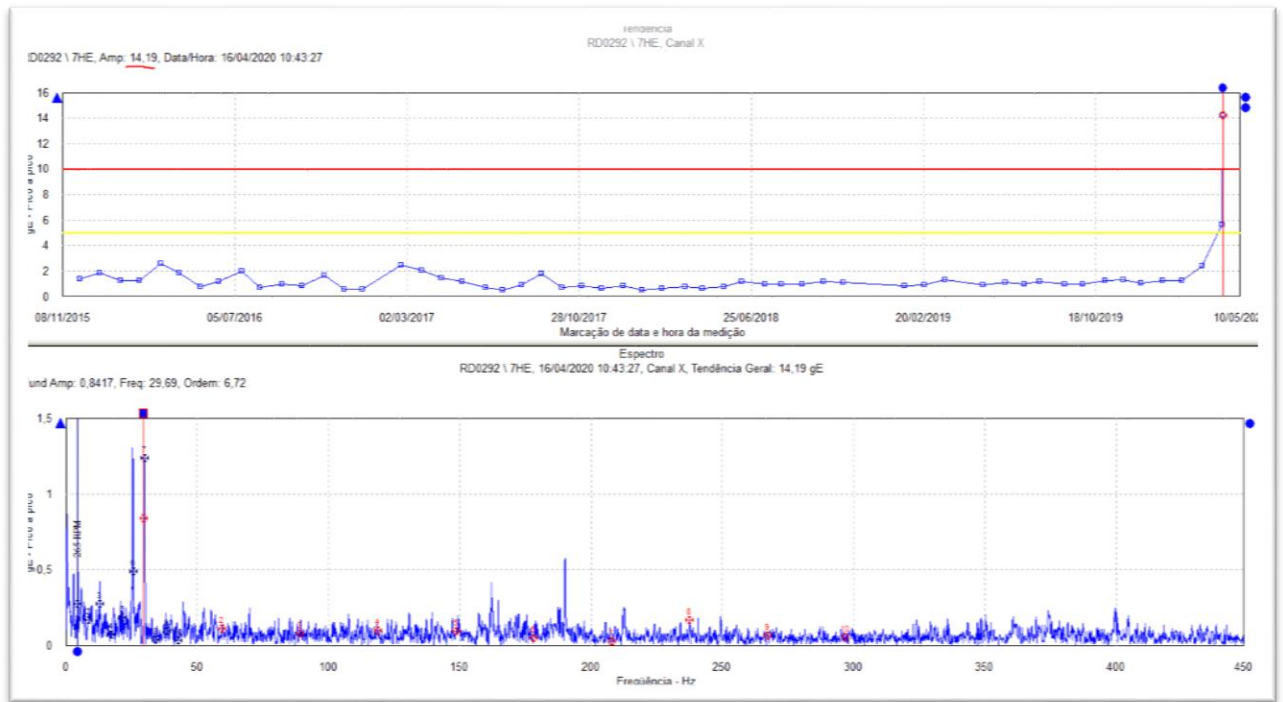


Imagem 05- mancal eixo intermediário ponto 7 - envelope da aceleração 14gE

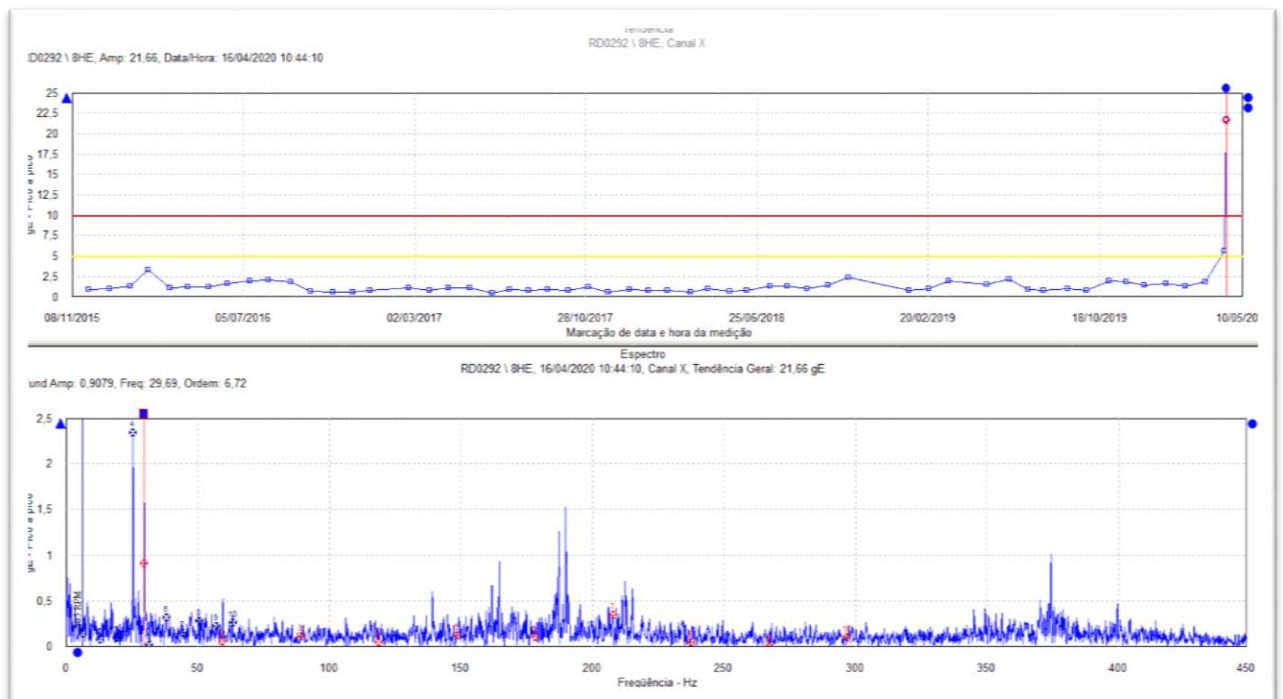


Imagem 06- mancal eixo intermediário ponto 8 - envelope da aceleração 21gE

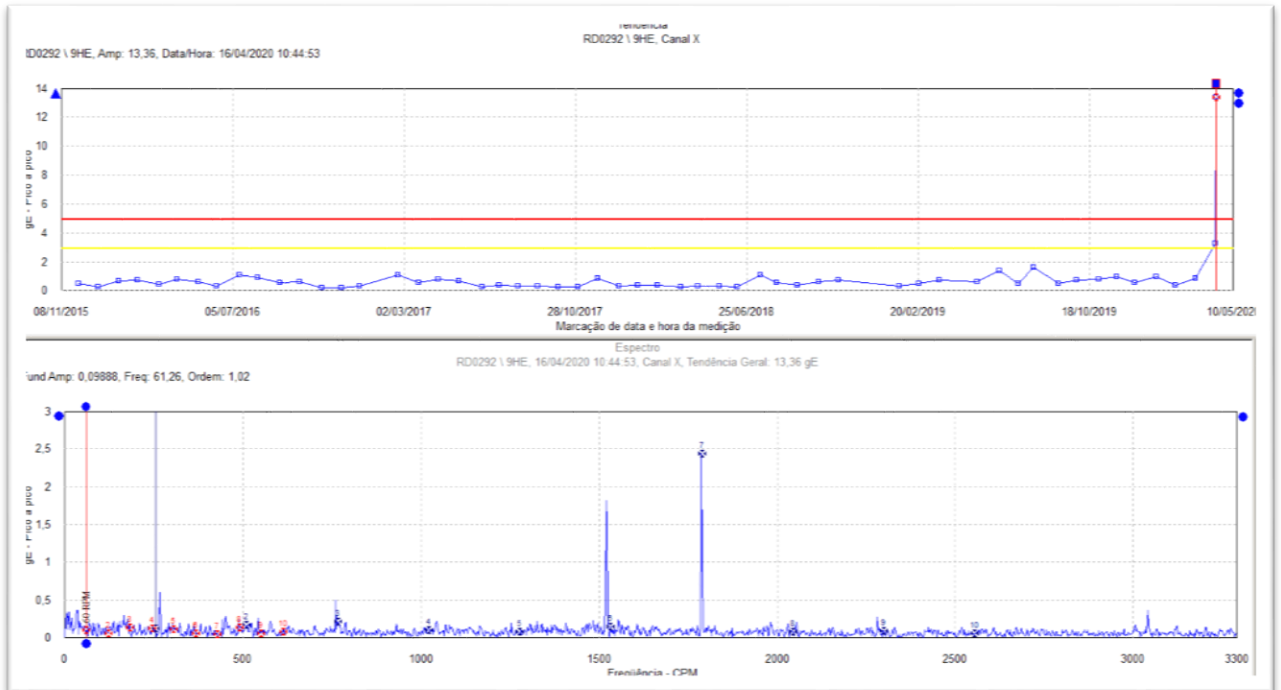


Imagem 07- mancal eixo saída ponto 9 - envelope da aceleração 13gE

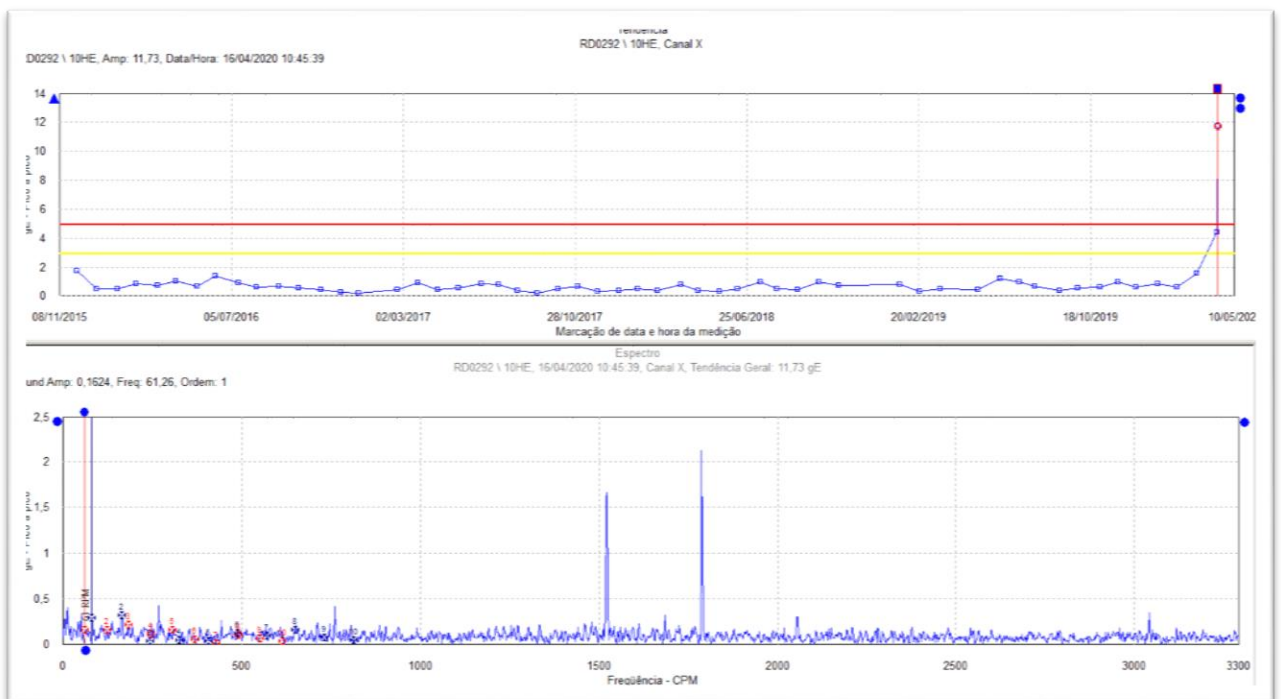


Imagem 08- mancal eixo saída ponto 10 - envelope da aceleração 11gE

7 RECOMENDAÇÃO


Motor – devido a vibração estar sendo transmitida pelo redutor e histórico de rolamento, se faz necessário

- SUBSTITUIR ROLAMENTO DO MOTOR
- CHECAR DIMENSIONAL DE CAIXA E EIXO
- ATENTAR PARA FIXAÇÃO DO PINHAO NO EIXO DO MOTOR

Redutor –

- SUBSTITUIR ROLAMENTOS
- CHECAR DIMENSIONAL DE CAIXA E EIXO
- CHECAR FIXAÇÃO DAS COROAS NOS EIXOS.

Obs; recomendamos substituir a carga do lubrificante em oportunidade, caso não seja possível intervir imediatamente.



APÊNDICE D - Avaliação das condições Dinamômetro

RELATÓRIO DE CONDIÇÃO

Contrato

Data 19/05/2020

Equipamento Dinamômetro

Responsável

INTRODUÇÃO

O Objetivo deste relatório é relatar a condição do Dinamômetro, conjunto este que está sendo monitorado via análise de vibração com o sistema IMX 08 da SKF. Para o monitoramento do conjunto foram configurados 08 pontos de coletas de vibração, a ideia é verificar o histórico de cada ponto, para avaliar se existe alguma componente que caracterize algum sintoma de defeito no equipamento.

PONTOS MONITORADOS

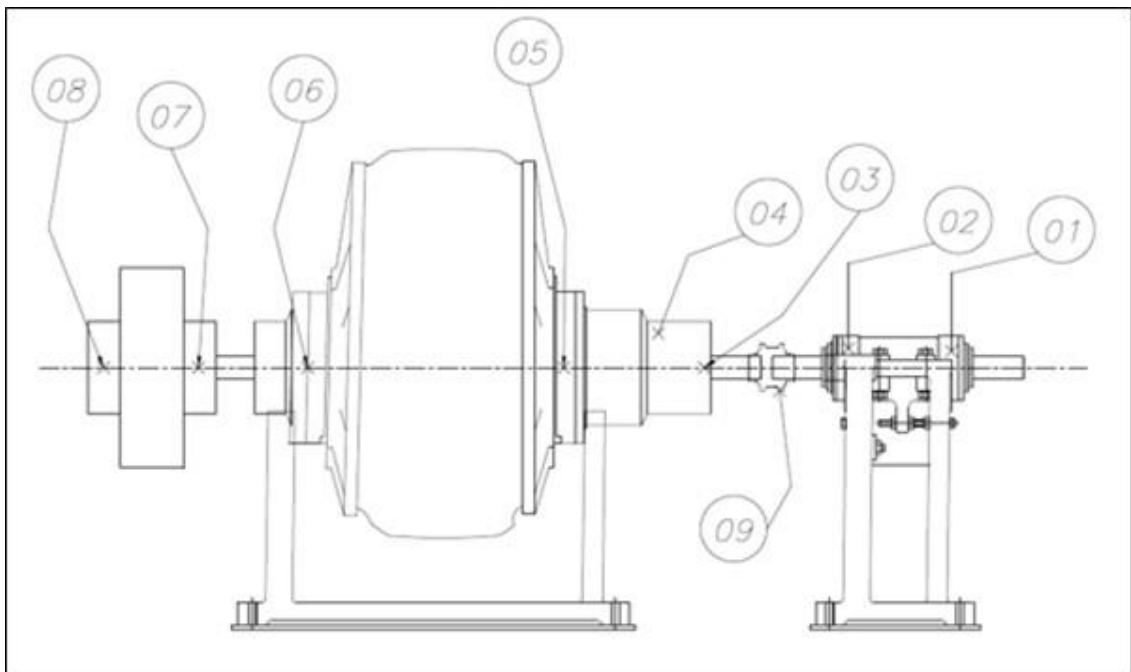


Figura 01: Desenho do Dinamômetro com os pontos de coleta

A referência para determinar os pontos de coleta são os alojamentos dos rolamentos, pois se referem aos componentes de apoio do eixo e são esses sofrerem as cargas de todo o conjunto.

Outro ponto importante é que o Dinamômetro pode trabalhar até com **25000 RPM**, esta condição é muito importante, tendo em vista que a rotação do eixo interfere diretamente nos níveis de vibração do conjunto, sem necessariamente ser um problema para o equipamento.

MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO

Como relatado anteriormente o Dinamômetro é monitorado via sistema on line, da SKF onde são coletados dados de vibração de 08 pontos simultaneamente, abaixo seguem os comentários.

Quando analisamos os espectros em baixa frequência (Parâmetro velocidade) observamos que a frequência que predomina é Primeira harmônica (01 x RPM), nesta condição está frequência caracteriza sintoma de desbalanceamento, observa-se também uma variação considerável de vibração ocasionada pela variação da velocidade.

Em relação aos espectros em alta frequência (Parâmetros Aceleração e Envelope) é a primeira harmônica da rotação (01 x RPM) e suas múltiplas, pela técnica está condição caracteriza que temos sintoma de folga mecânica nos mancais monitorados. Destacamos as maiores amplitudes referente a essas frequências se encontram nos mancais denominados como pontos 01 e 02 **Figura 01**.

Podemos destacar os pontos 01 e 02 da **Figura 01**, como os pontos de atenção no Dinamômetro, os maiores níveis de vibração se concentram nestes mancais. Além dos sintomas de defeitos já apresentados em relatórios anteriores como desbalanceamento e desalinhamento, nas últimas medições destacamos também frequência que caracteriza sintoma de defeito na gaiola do rolamento do mancal 1.

Por conta destas características reforçamos a necessidade de substituição dos rolamentos dos mancais 01 e 02 da **Figura 01**, destacando que além do sintoma de defeito estes mancais apresentam níveis elevados de vibração.

Uma observação importante se refere aos pontos **05, 06 e 07** do desenho da **Figura 01**, quando analisamos no parâmetro aceleração observa-se uma faixa em alta frequência que pode caracterizar deficiência de lubrificação nos rolamentos destes mancais, a recomendação neste caso é verificar se esses componentes estão sendo adequadamente lubrificados.

PONTO	PICO DE VIBRAÇÃO PARÂMETRO VELOCIDADE	PICO DE VIBRAÇÃO PARÂMETRO ACELERAÇÃO
1	20,7 mm/s	7,6 g
2	23,5 mm/s	8,2 g
3	4,1 mm/s	0,8 g
4	3,9 mm/s	0,9 g
5	1,1 mm/s	0,5 g
6	3,9 mm/s	1,4 g
7	8,4 mm/s	1,6 g
8	7,8 mm/s	2,1 g

Figura 02: Tabela com picos de vibração em cada ponto

TENDÊNCIAS E ESPECTROS DO CONJUNTO

Abaixo as tendências e espectros em destaque na análise:

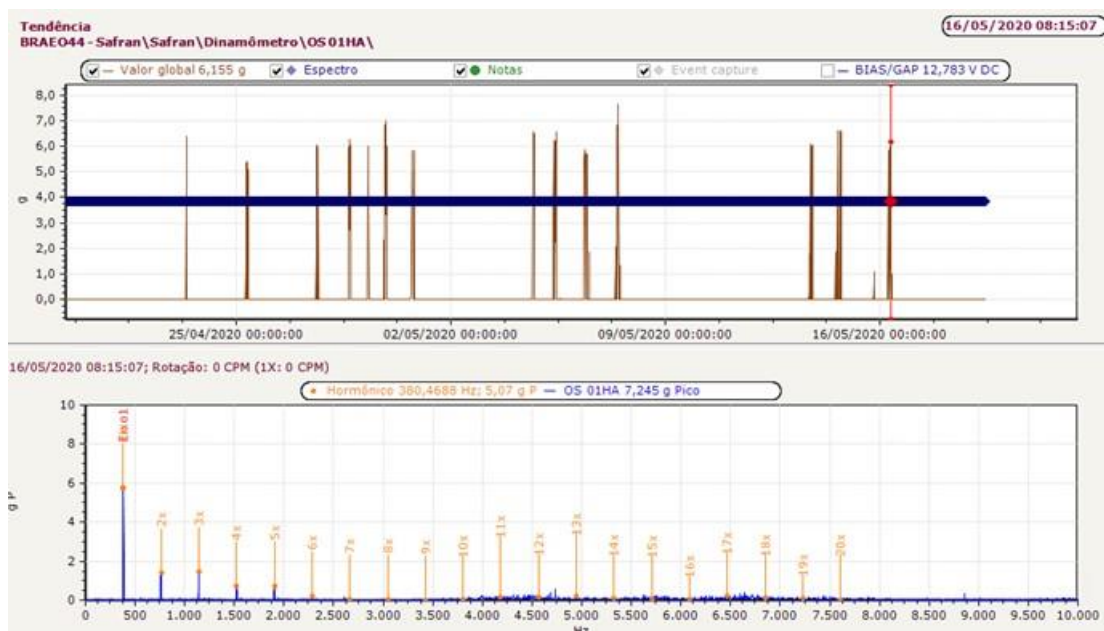


Figura 03: Parâmetro Aceleração do ponto 01 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação, muitas vezes temos coletas com a máquina parada, esta é a razão de termos uma tendência muito oscilatória da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM) e suas múltiplas.

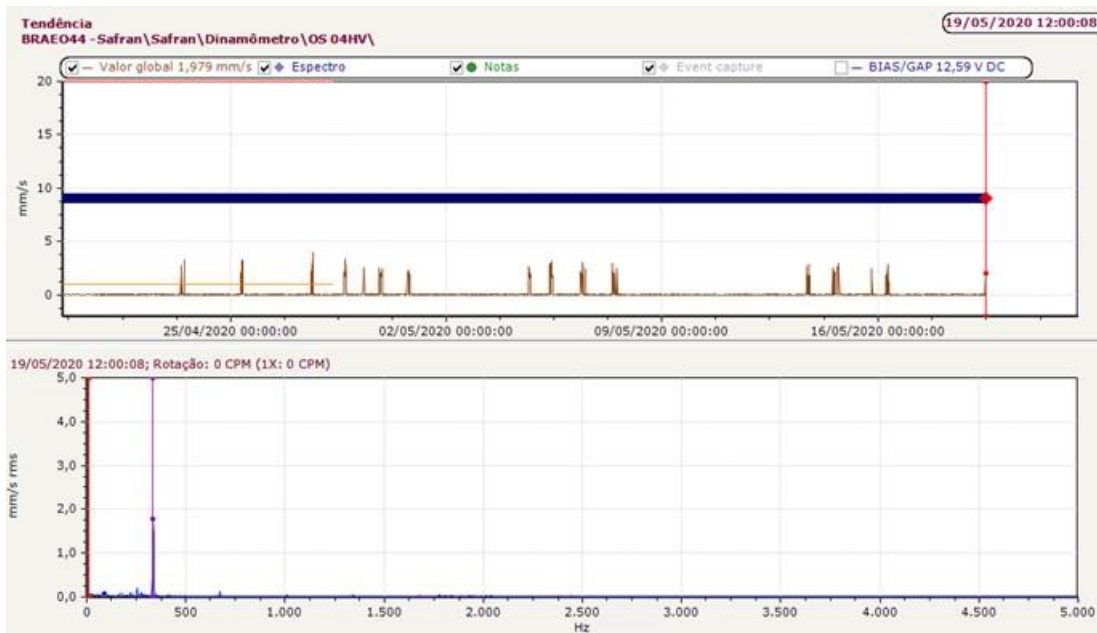


Figura 04: Parâmetro Velocidade do ponto 01 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

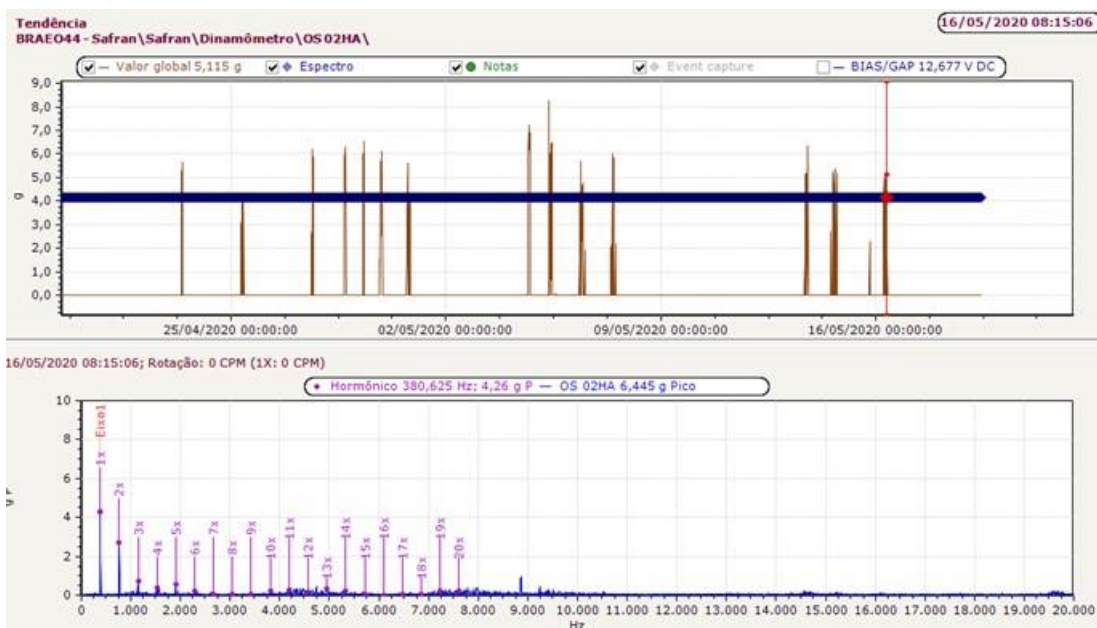


Figura 05: Parâmetro Aceleração do ponto 02 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação, muitas vezes temos coletas com a máquina parada, esta é a razão de termos uma tendência muito oscilatória da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM) e suas múltiplas.

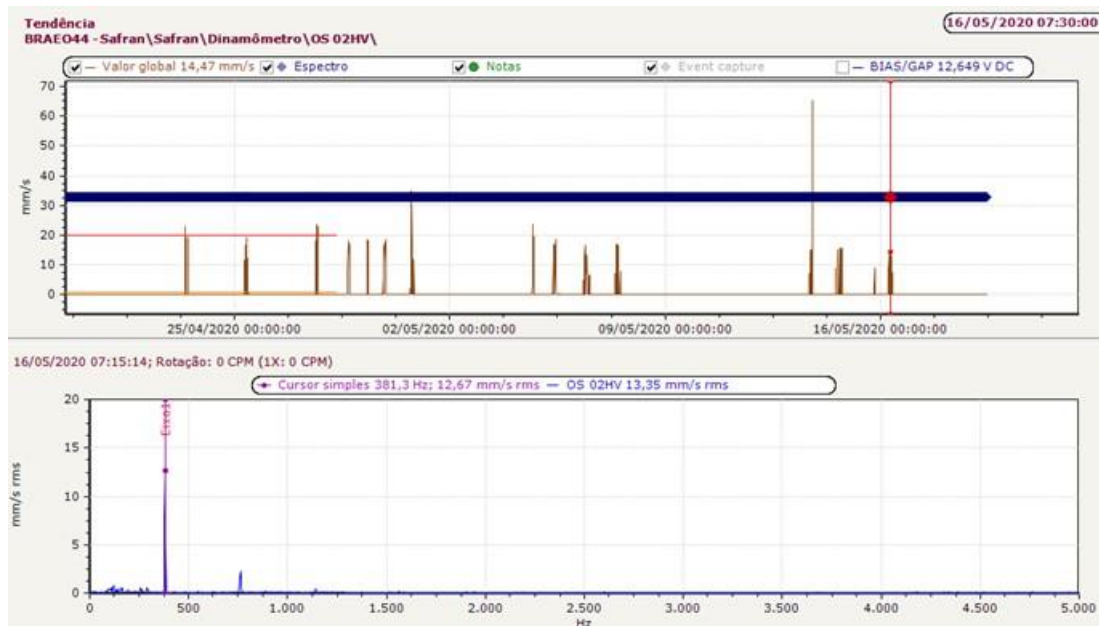


Figura 06: Parâmetro Velocidade do ponto 02 – Na tendência observa-se evolução nos níveis de vibração, com picos com uma faixa maior de vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

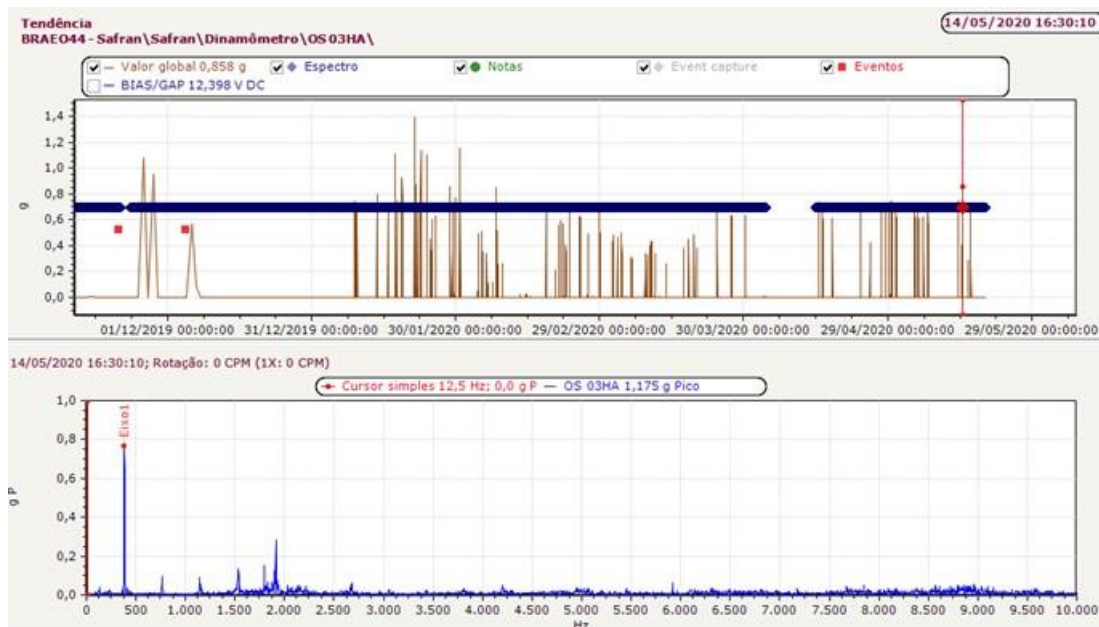


Figura 07: Parâmetro Aceleração do ponto 03 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM) e suas múltiplas.

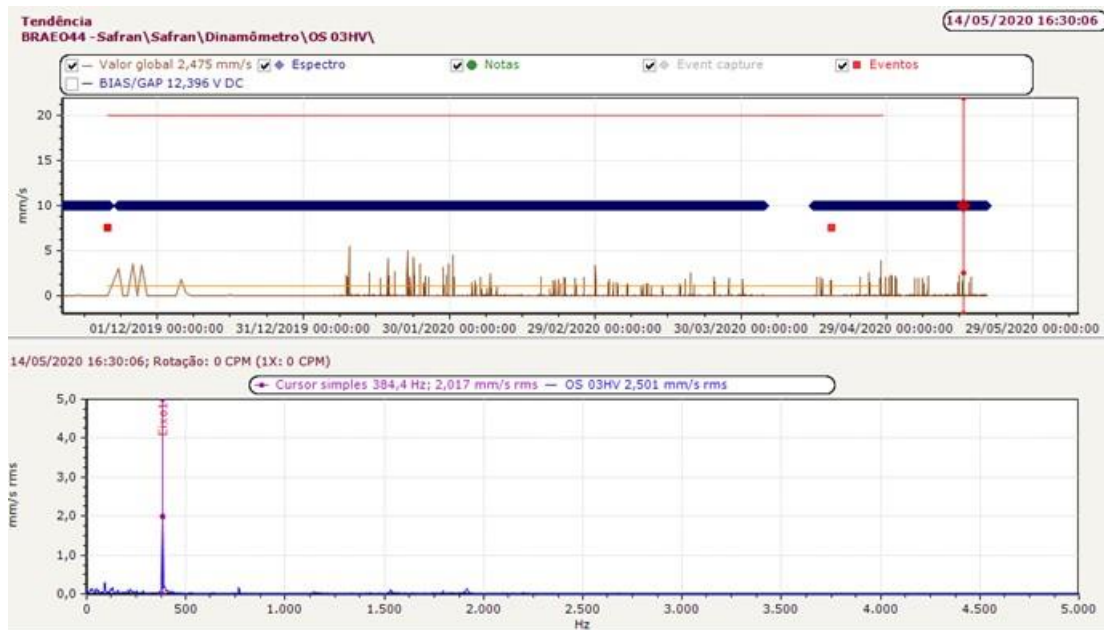


Figura 08: Parâmetro Velocidade do ponto 03 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

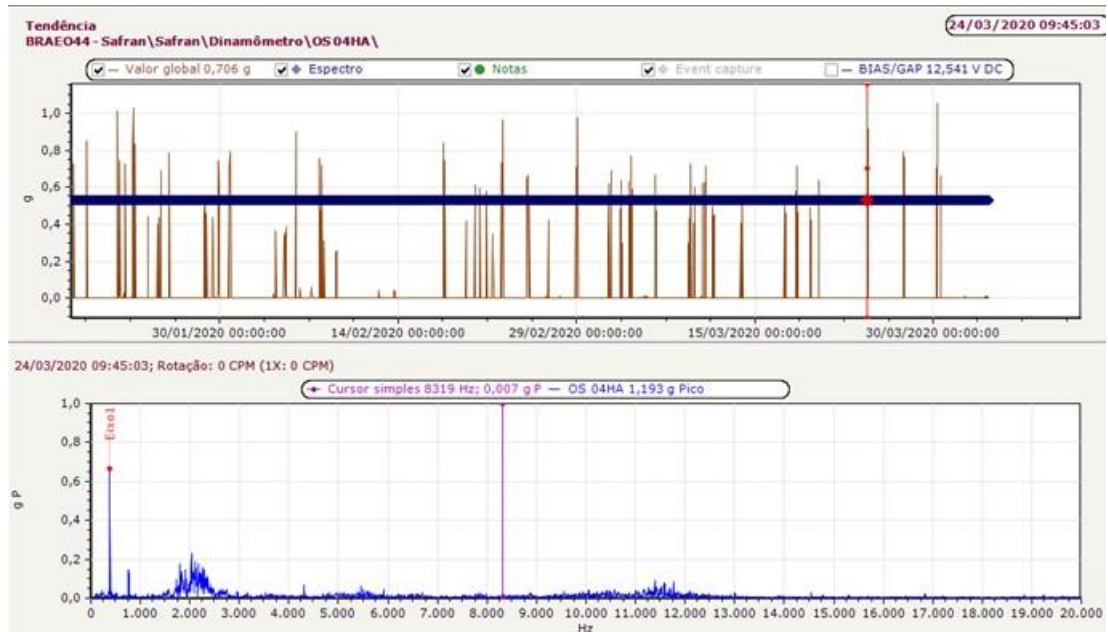


Figura 09: Parâmetro Aceleração do ponto 04 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM) e suas múltiplas.

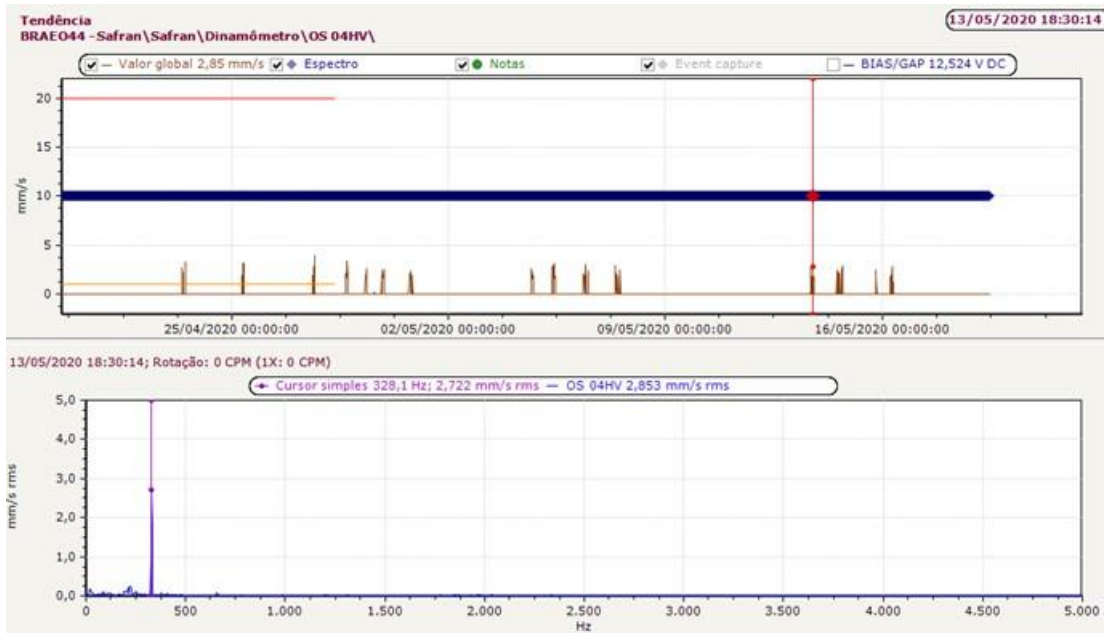


Figura 10: Parâmetro Velocidade do ponto 04 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

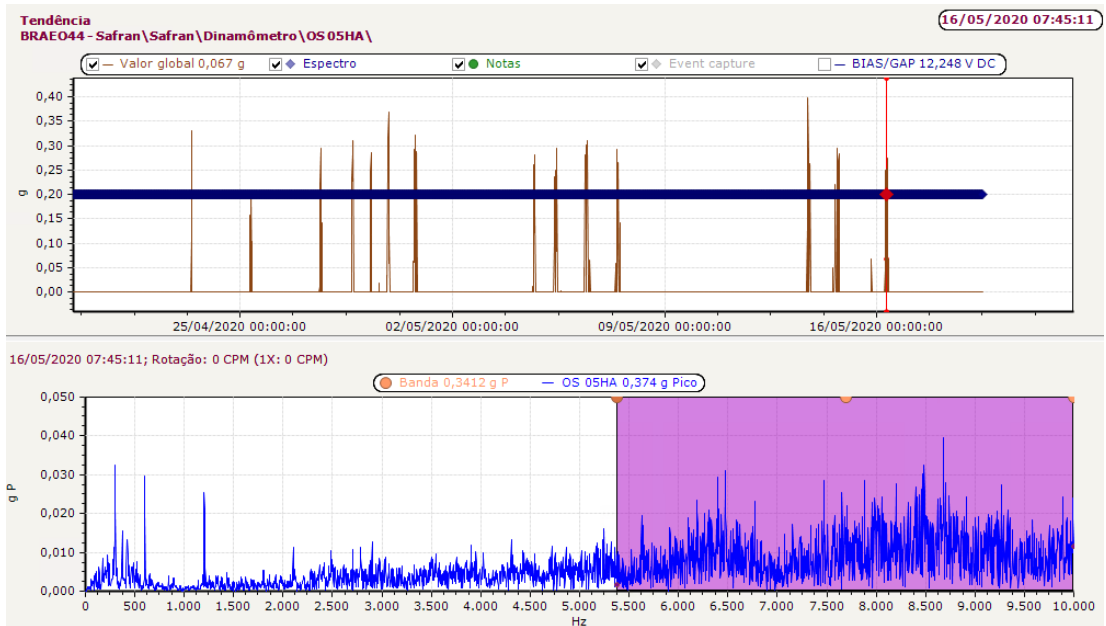


Figura 11: Parâmetro Aceleração do ponto 05 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência onde destacamos faixa em alta frequência que caracteriza atrito metálico nos componentes do rolamento, tendo como possível causa uma deficiência na lubrificação.

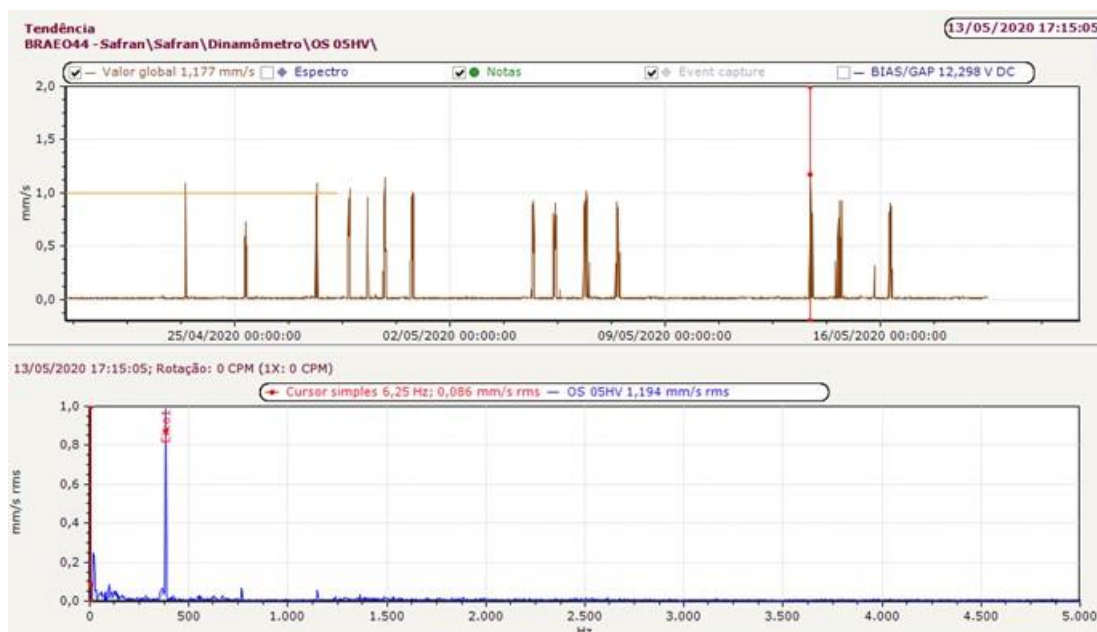


Figura 12: Parâmetro Velocidade do ponto 05 – Temos **acima** a tendência onde se observa a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

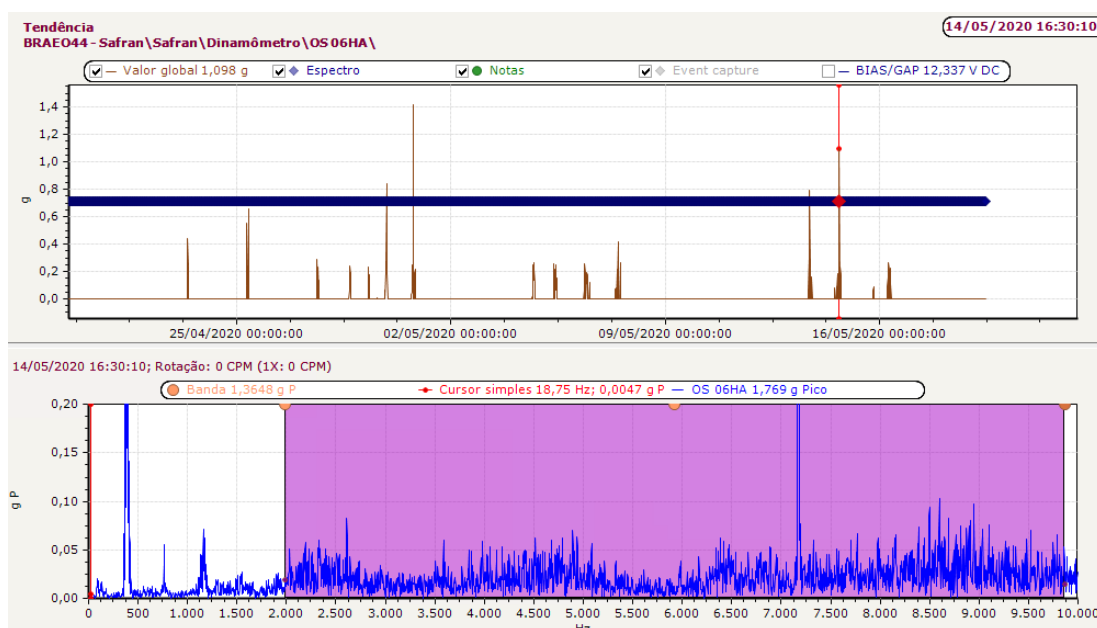


Figura 13: Parâmetro Aceleração do ponto 06 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência onde destacamos faixa em alta frequência que caracteriza atrito metálico nos componentes do rolamento, tendo como possível causa uma deficiência na lubrificação.

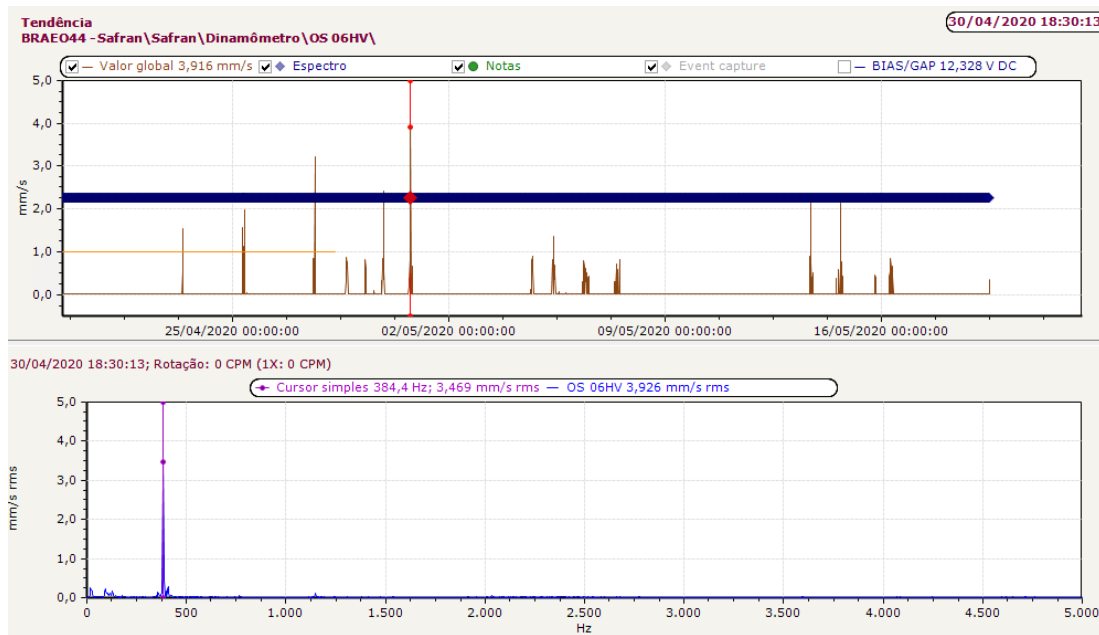


Figura 14: Parâmetro Velocidade do ponto 06 – Temos **acima** a tendência onde se observa a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

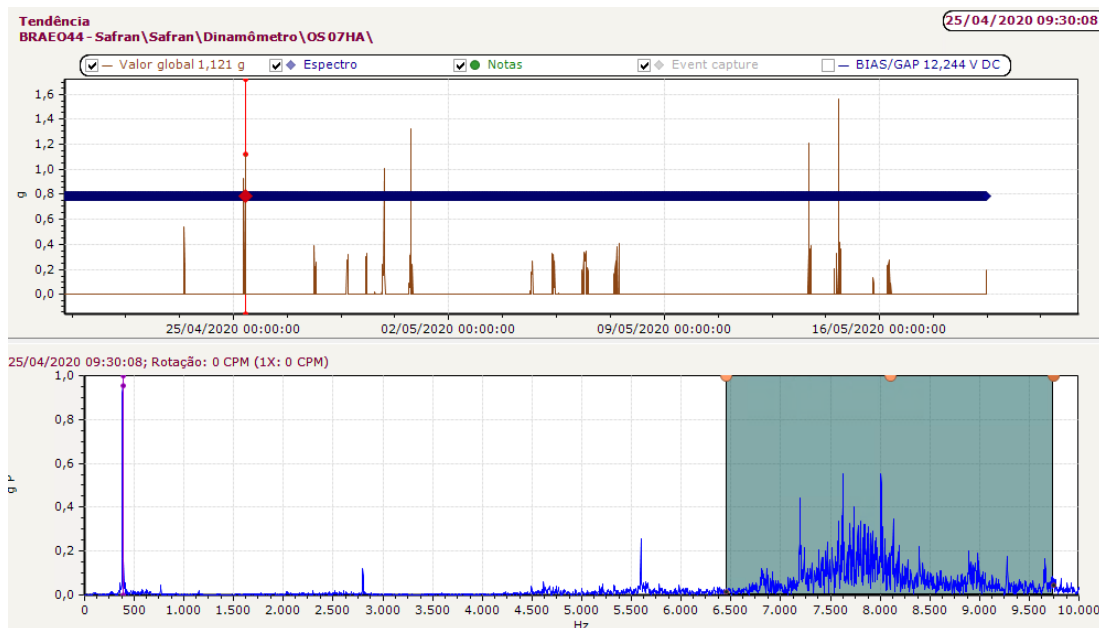


Figura 15: Parâmetro Aceleração do ponto 07 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência onde destacamos faixa em alta frequência que caracteriza atrito metálico nos componentes do rolamento, tendo como possível causa uma deficiência na lubrificação.

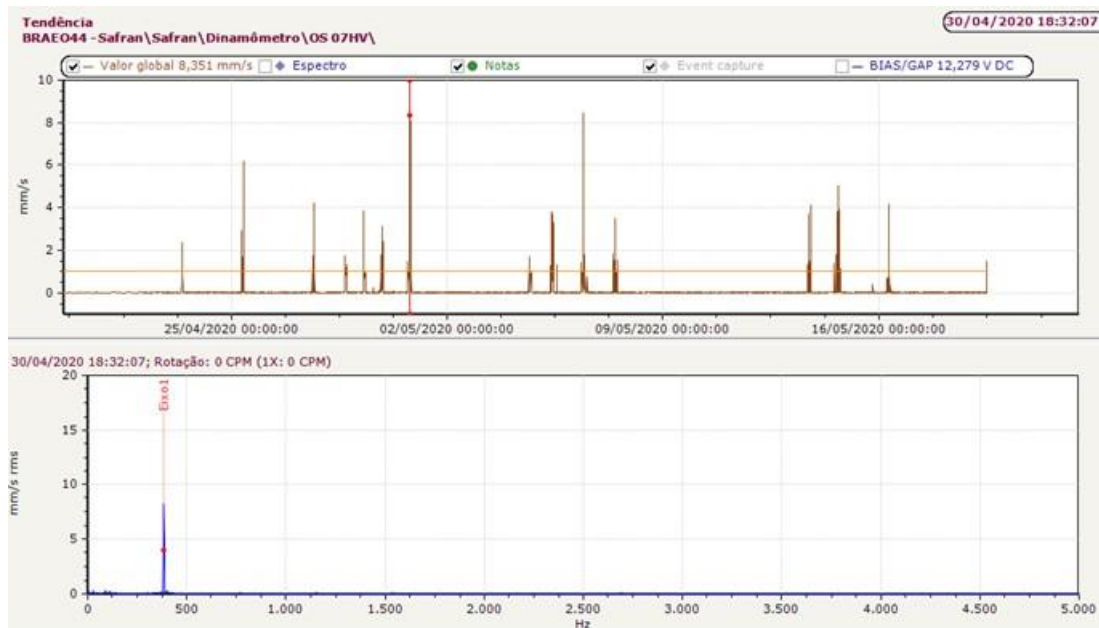


Figura 16: Parâmetro Velocidade do ponto 07 – Temos **acima** a tendência onde se observa a oscilação da vibração. **Abaixo** temos espectro com frequência predominante (01 x RPM)..

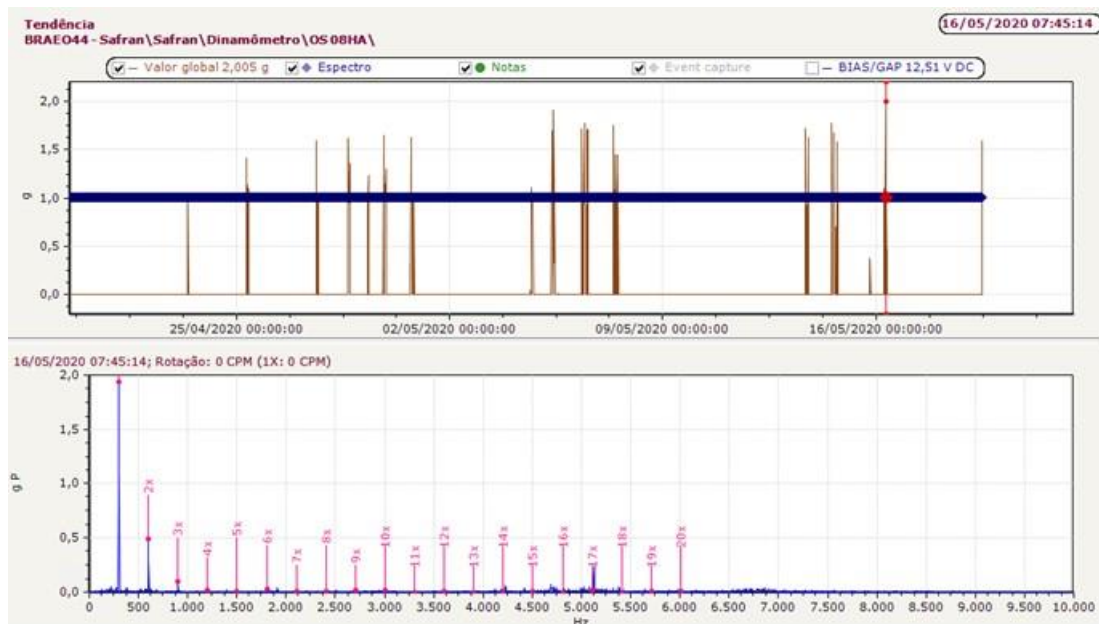


Figura 17: Parâmetro Aceleração do ponto 08 – Temos **acima** a tendência onde observa-se a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).



Figura 18: Parâmetro Velocidade do ponto 08 – Temos **acima** a tendência onde se observa a oscilação da vibração e **abaixo** o espectro com frequência predominante (01 x RPM).

CONCLUSÃO

De acordo com a análise realizada nos dados de vibração coletados no Dinamômetro, destacamos que a maioria dos pontos apresentam as mesmas características, ou seja, predomínio da primeira harmônica da rotação e suas múltiplas, o que indicam sintoma de folga mecânica e desbalanceamento.

Destacamos os pontos 01, 02 da **Figura 01** com os maiores níveis de vibração de acordo com o histórico de monitoramento, estes mancais apresentam características de folga mecânica e defeito na gaiola do rolamento no ponto 01.

Em relação aos pontos **05, 06 e 07** os quais apresentam características de deficiência de lubrificação nos rolamentos, isso porque no parâmetro aceleração se observa faixa em alta frequência que caracteriza este tipo de sintoma Ver Figuras 11, 13 e 15, nesses casos recomendamos verificar se os rolamento estão sendo adequadamente lubrificados.

Para maior confiabilidade na análise destacamos a importância do tacômetro para coleta da rotação do dinamômetro. Com este dispositivo podemos configurar o sistema on line a realizar coletas apenas quando o equipamento estiver trabalhando.

RECOMENDAÇÃO

.Substituir rolamentos referente aos pontos 01 e 02 da **Figura 01** e checar folgas internas em relação a caixa de mancal e eixo.

. Verificar alinhamento entre mancais pontos 02 e 03 da **Figura 01**.

. Verificar condição de lubrificação dos ponto 05, 06 e 07 da **Figura 01**.

. Instalar tacômetro para coleta da rotação do eixo do Dinamômetro.