

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM UM NAVIO: APLICAÇÃO EM UM

AHTS



PRIMEIRO-TENENTE VINÍCIUS DE LEMOS CARDOSO RONDON

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE VINÍCIUS DE LEMOS CARDOSO RONDON

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM UM NAVIO: APLICAÇÃO EM UM
AHTS**

Trabalho de conclusão apresentado ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientador: Prof. Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro, D. Sc.

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE VINÍCIUS DE LEMOS CARDOSO RONDON

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM UM NAVIO: APLICAÇÃO EM UM
AHTS**

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovado em: _____

Banca examinadora:

Prof. Ulisses Admar Monteiro, DSc (UFRJ)

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, PhD (UFRJ)

CC (RM1-EN) Carlos Martins, MSc (CIAA)

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico este trabalho aos meus avós Ely Alves de Lemos e Nesvalda Rangel de Lemos, por terem sido meu firmamento, meu alicerce moral.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por refletir sua graça sobre mim e me conceder a bênção necessária para concluir mais um passo importante na minha vida.

À minha amada esposa Isabelle Rondon, por manter firme meu porto seguro, nosso lar. Pujante e amorosa mantém minha proa.

À minha querida filha Violetta Rondon, meu fôlego diário para sobrepujar qualquer dificuldade, imenso presente de Deus.

À minha honrada mãe Eliane Rondon, que com imensa força moral e afeto desempenhou o sacerdócio de me tornar um homem digno.

Ao meu grande amigo e colega de turma Gilberto Chagas, amigo fiel, por estar sempre ao meu lado nas trincheiras da vida.

Aos meus companheiros da turma Almirante Gastão Motta, em especial Jonas, Esquitino e João Fernando, camaradas que pela convivência tornaram mais leve superar as dificuldades desta derrota.

Aos meus professores orientadores Ulisses e Fernando Castro Pinto, que ao longo desta caminhada, sempre se mostraram dispostos a me auxiliar a resolver os diversos problemas que surgiram, além da paciência, orientação e ensinamentos necessários à elaboração desta dissertação.

Aos professores Emerson Martins de Andrade e Carlos Martins, por também sempre se mostrarem dispostos para tirar todas as dúvidas que surgiram durante a elaboração desta dissertação.

Aos demais docentes e funcionários do LEDAV, pelo acolhimento ao longo do curso. Ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino e sua tripulação, pela estrutura e acolhimento ao longo do curso.

À Marinha do Brasil, pela oportunidade concedida a mim de poder realizar o curso de Pós Graduação em Propulsão Naval pela UFRJ.

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM UM NAVIO: APLICAÇÃO EM UM AHTS

RESUMO

Inicialmente, o objetivo principal desta dissertação foi analisar e avaliar os níveis de vibração a bordo de um navio AHTS, comparando-os com os limites estabelecidos pela sociedade classificadora do navio. Na Figura 1, é apresentada uma vista lateral do navio utilizado como caso de estudo. Para garantir uma abordagem organizada e compreensível, foi estabelecido um fluxo de trabalho, conforme ilustrado na Figura 19.

Foram realizadas 6 análises que se encaixaram perfeitamente no fluxo estabelecido. Nessas medições, foram aplicadas técnicas clássicas de análise, incluindo análise das séries temporais, análise de ordem e análise espectral, seguindo as orientações da norma da sociedade classificadora do navio.

Após a obtenção dos resultados, os comparamos com os limites estabelecidos pelas classificadoras, obtendo, em sua maioria, resultados satisfatórios. Para tornar o procedimento ainda mais prático, foi desenvolvido um web app que permite avaliações rápidas de vibrações e que inclui uma IA de acesso aberto para facilitar a verificação de conformidade com a norma.

Palavras-chave: Vibração; Análise; Procedimento; IA (Inteligência Artificial); Estudo de Caso.

VIBRATION LEVELS EVALUATION ON A SHIP: APPLICATION ON AN AHTS

ABSTRACT

Initially, the main goal of this dissertation was to analyze and evaluate the vibration levels on board an AHTS ship, comparing them with the limits established by the ship's classification society. In Figure 1, a side view of the ship used as a case study is presented. To ensure an organized and comprehensible approach, a workflow was established, as illustrated in Figure 19.

Six analyses were conducted that perfectly fit into the established workflow. In these measurements, classic analysis techniques were applied, including Time Waveform Analysis, Order Analysis, and FFT Spectrum Analysis, following the guidelines of the ship's classification society.

After obtaining the results, they were compared with the limits set by the classification societies, yielding mostly satisfactory outcomes. To make the procedure even more practical, a web app was developed for swift vibration assessments, integrated with an open-access AI to facilitate compliance verification with the standard.

Keywords: Vibration; Analysis; Procedure; AI (Artificial Intelligence); Case Study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – NAVIO AHTS	14
Figura 2 – Pesquisa bibliométrica	17
Figura 3 – Acelerômetro.....	19
Figura 4 – Computador e um software utilizado na medição.....	20
Figura 5 – Série temporal de aceleração.....	21
Figura 6 – Gráfico FFT de uma série temporal de aceleração.....	22
Figura 7 – Série temporal de aceleração, com variações do fator de amortecimento	22
Figura 8 – Plotagem de PSD de uma série temporal de aceleração	25
Figura 9 – Série temporal de aceleração, velocidade e posição	27
Figura 10 – Compartimento medido no tween deck.....	30
Figura 11 – Compartimento medido no main deck	30
Figura 12 – Pontos de medição no bloco dos motores de combustão principal.....	31
Figura 13 – Ponto medido na carcaça do turbocompressor.....	31
Figura 14 – Ponto medido no duto de exaustão.....	32
Figura 15 – Segundo ponto medido no duto de exaustão.....	32
Figura 16 – Ponto medido na caixa redutora.....	33
Figura 17 – Ponto medido no lado não acoplado do motor elétrico dos thrusters	33
Figura 18 – Ponto medido no lado não acoplado do motor elétrico dos thrusters	34
Figura 19 – Fluxo de Trabalho	36
Figura 20 – Arquivos gerados no Python	37
Figura 21 – Linhas de códigos gerados	42
Figura 22 – Série temporal de aceleração do azimuth_bow_mancal_la	43
Figura 23 – Integração da série de aceleração em velocidade.....	43
Figura 24 – Função “cumulative_trapezoid”.....	45
Figura 25 – Gráfico com inclinação“drift”.....	46
Figura 26 – Sinal no domínio da frequência.....	47
Figura 27 – Resposta em frequência.....	48
Figura 28 – Resposta no tempo	48
Figura 29 – Função decimate, biblioteca scipy	49
Figura 30 –Exemplo dos parâmetros de entrada para aplicação da função	50

Figura 31 – Novo resultado em frequência	50
Figura 32 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	51
Figura 33 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	51
Figura 34 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	52
Figura 35 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	52
Figura 36 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	52
Figura 37 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	53
Figura 38 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	53
Figura 39 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	53
Figura 40 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	54
Figura 41 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	54
Figura 42 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	55
Figura 43 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	55
Figura 44 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	55
Figura 45 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	56
Figura 46 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	56
Figura 47 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	56
Figura 48 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	57
Figura 49 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	57
Figura 50 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	58
Figura 51 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	58
Figura 52 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	58
Figura 53 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	59
Figura 54 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	59
Figura 55 – Gráfico cascata	60
Figura 56 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	60
Figura 57 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	61
Figura 58 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	61
Figura 59 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	61
Figura 60 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	62
Figura 61 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	62
Figura 62 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)	63
Figura 63 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)	63

Figura 64 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)	63
Figura 65 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	64
Figura 66 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)	64
Figura 67 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)	64
Figura 68 – Página principal do aplicativo	65
Figura 69 – Filtros e tratamentos dos dados em tempo real	66
Figura 70 – Resposta da AI	66
Figura 71 – Aplicação da “Flattop Window”	67
Figura 72 – Valores de RMS	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de medições	29
Tabela 2 – Medições obtidas pelo LEDAV	34
Tabela 3 – Parâmetros obtidos pelo LEDAV	37
Tabela 4 – Mancais da linha de eixo	38
Tabela 5 – Motores diesel < 200 rpm	38
Tabela 6 – Motores diesel > 200 rpm	38
Tabela 7 – Turbo compressor	38
Tabela 8 – Motor elétrico do thrusters.....	38
Tabela 9 – Turbinas	39
Tabela 10 – Geradores movidos a turbinas	39
Tabela 11 – Engrenagens.....	39
Tabela 12 – Engrenagens.....	39
Tabela 13 – Motores elétricos, separadores, bombas hidráulicas acionadas por motor, ventiladores não instalados em motores alternados.....	39
Tabela 14 – Compressores.....	39
Tabela 15 – Compressores e bombas alternadas	40
Tabela 16 – Boilers	40
Tabela 17 – Redes.....	40
Tabela 18 – Equipamentos eletrônicos	40
Tabela 19 – Valores máximos ponderados em frequência de r.m.s. em milímetros por segundo de 1 Hz a 80 Hz para navios de carga.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 OBJETIVOS.....	16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 Pesquisa bibliométrica	17
4.2 Análise de vibração em equipamentos rotativos.....	18
4.3 Porque analisar a vibração	18
4.4 Método de aferição	19
4.5 Metodologia na análise de vibração	20
4.6 Categorias de aferição	25
4.7 Parâmetros de aferição	26
4.8 Benefícios do monitoramento contínuo	27
5 METODOLOGIA	29
5.1 Banco de dados.....	29
5.2 Medição de vibrações	29
5.3 Processamento e análise dos dados	36
6 DESENVOLVIMENTO	42
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
7.1 Análise Azimuth Bow mancal LA	51

7.2 Compartimento 57	52
7.3 Engine 01 Bottom.....	54
7.4 Engine 01 Top	56
7.5 Turbo Chasing	60
7.6 Tween Deck	62
7.7 Web app	62
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8.1 Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A vibração é algo intrínseco à matéria. Todas as partículas subatômicas, como elétrons, prótons e nêutrons, vibram de uma certa maneira. Essa vibração é responsável por suas propriedades físicas. De acordo com Feynman (2008), “o conceito de vibração é fundamental para a mecânica quântica. As partículas subatômicas, como elétrons, prótons e nêutrons, são descritas por funções de onda que podem vibrar”.

A vibração também é responsável pelas propriedades macroscópicas da matéria, como temperatura, pressão e elasticidade. Importante ressaltar que a vibração é um fenômeno que ocorre dos sólidos simples até mesmo os mais complexos, podendo ser causada por diversos fatores, sendo elas forças externas, mudanças na temperatura e imperfeições no material (Clough, 2003).

No contexto do trabalho em questão a vibração é um fator importante para o conforto e produtividade dos tripulantes a bordo de uma embarcação, seja ela de passageiros ou não. Isto posto, a análise de vibração pode ser usada para quantificar, por meios matemáticos, a resposta de uma estrutura a variadas excitações e forças externas (Shabana, 1996).

As vibrações excessivas dos equipamentos podem causar tanto desconforto quanto desgaste estrutural na embarcação. Segundo muito bem descrito em Shabana, (1996), “a análise de vibração é um ramo da engenharia que estuda o comportamento vibracional de estruturas. A análise de vibração é usada para projetar estruturas que sejam estáveis e confortáveis, e para avaliar o desempenho de estruturas existentes.”

Além disso, a análise de vibrações em equipamentos pode ajudar a identificar e corrigir falhas no próprio equipamento analisado, auxiliando na prevenção de um problema de ordem maior especialmente em operações custosas e de grande necessidade de disponibilidade do equipamento. De acordo com DNV.GL (2017, tradução nossa), “a análise de vibração é uma ferramenta importante para a manutenção preditiva de máquinas e equipamentos. A análise de vibração pode ajudar a identificar problemas que podem causar falhas prematuras, o que pode levar a custos de manutenção e reparos elevados”.

Neste TCC serão apresentadas as respostas de um medição de vibrações aplicado no navio da classe AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*), uma embarcação multipropósito, especializada nas operações *OFFSHORE*, muito empregada em operações de manobras de âncoras e no posicionamento de plataformas, reboques oceânicos de grandes estruturas e embarcações, também empregada como embarcação de socorro e salvamento, combate a

incêndios, transporte de suprimentos e cargas múltiplas (figura 1). Conforme descreve Galante (2012)

“Por todas as funções que consegue desempenhar e por suas características superlativas em termos de embarcação de apoio, o AHTS é visto em quase todos os tipos de serviços relacionados à atividade offshore o que lhe confere o privilégio de ser chamado carinhosamente de Sua Majestade, o AHTS de “Rei dos Mares”” (Galante, 2012).

Figura 1 – NAVIO AHTS



Fonte: LEDAV (2023)

2 JUSTIFICATIVA

Este estudo é motivado pela necessidade crescente da Marinha do Brasil, estimulada pelo Governo Federal, em ser cada dia mais eficiente na manutenção dos recursos financeiros dispostos à força e, consequentemente, dos seus meios navais. Sendo assim, faz-se necessário um acompanhamento refinado do ciclo de vida das embarcações bem como dos seus equipamentos.

Adicionalmente, é fundamental maximizar a disponibilidade dos meios operativos minimizando as intervenções com manutenções corretivas em equipamentos de alto custo, através da análise vibracional dos seus equipamentos seguindo a norma descrita pela DNV.

3 OBJETIVOS

Este estudo possui, dessa forma, dois objetivos centrais: analisar e avaliar os níveis de vibração medidos a bordo de um navio AHTS; e compará-los com os limites estabelecidos pela sociedade classificadora do navio.

Demonstrar que é possível, com o uso de sensores adequados e de custo não tão elevado, monitorar a operação dos equipamentos mais relevantes de bordo com a finalidade de aumentar, não somente a qualidade de trabalho da tripulação, como também a vida útil dos equipamentos.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo demonstrar a importância do tema proposto. Por conta disto, será apresentada a pesquisa bibliométrica para ilustrar a correlação das palavras-chave entre os artigos publicados, seguido da revisão bibliográfica das referências utilizadas como base fundamental desta dissertação.

4.1 Pesquisa bibliométrica

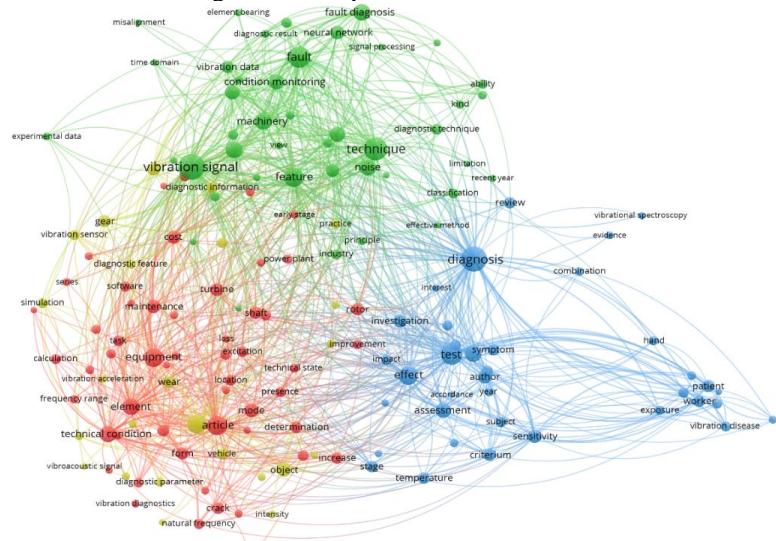
A pesquisa bibliométrica teve como objetivo demonstrar a relevância do tema em questão de acordo com a quantidade de publicações publicadas e suas principais regiões, em um espaço temporal definido de 1980 a 2023, sendo realizada no dia 22 de setembro de 2023, considerando a base de dados do site Lens.org.

Neste caso foi utilizada como palavra-chave “*Vibration Diagnostic*” nos campos título, resumo, palavra-chave e campo de estudo. Para atrelar a busca aos principais tópicos de interesse desta dissertação foram empregados os termos “*Fault Diagnostic*”, “*Vibration Signal*”, “*Diagnostic Technique*” “*Vibration Data*”, considerando os mesmos campos de busca.

Foi levado em consideração apenas produções acadêmicas dos tipos artigos, volumes e edições de periódicos, livros e seus capítulos sobre o tema nos últimos 40 anos.

A figura 2, gerada pelo software de análise de dados bibliométricos VOSViewer, ilustra a correta correlação do tema principal com os assuntos abordados nesta dissertação, além de sua aplicação nos equipamentos que a marinha possui a bordo.

Figura 2 – Pesquisa bibliométrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2 Análise de vibração em equipamentos rotativos

A análise de vibração segue parâmetros estipulados pela norma ABNT NBR 10082 tendo como principal objetivo identificar falhas em máquinas rotativas, principalmente estas causadas por desalinhamento e desbalanceamento dos componentes do equipamento. Dessa forma, Novise (2022) entende que “a partir de medições e testes em equipamentos em diversos estados de operação, são analisados possíveis defeitos no sistema como, por exemplo, desgaste em mancais causados por falta de lubrificação ou com manutenção inadequada, interferências entre componentes, desbalanceamentos e desgaste natural”.

É importante ressaltar a diferença entre detecção e análise de um problema em um equipamento, ou seja, a diferença entre o efeito e a causa do problema. A análise de vibrações está intimamente ligada à causa. De acordo com SKF Reliability Systems (2000, p. 1, tradução nossa)

“É essencial que os problemas de máquinas sejam detectados com antecedência suficiente para planejar ações de reparo e minimizar o tempo de inatividade das máquinas. Uma vez detectados, uma abordagem de causa e efeito deve ser usada para tomar medidas adicionais para analisar o que causou o problema detectado. Só então você evitará que o problema se torne recorrente”.

4.3 Porque analisar a vibração

Analizar a vibração nada mais é do que analisar o comportamento do equipamento em relação aos esforços realizados pelos seus componentes. O equipamento fora de operação tem uma vibração devido ao ambiente em si, porém, quando em operação, o modo como o copo em questão vibra se altera, dessa forma, nada mais é do que observar como esses componentes internos estão interagindo entre si.

Segundo *SKF Reliability Systems* (2000, p. 1, tradução nossa), a análise dos sinais de vibração leva em consideração dois principais componentes:

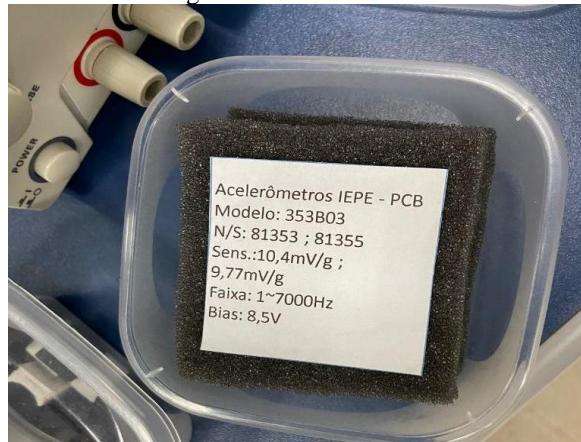
1. Frequência – é definida como o número de vezes que um evento acontece em um dado tempo. Dependendo da frequência que a vibração aconteça pode indicar um tipo específico de falha.

2. Amplitude – amplitude é o tamanho do sinal de vibração. Que determina a relevância daquela ocorrência. Quanto maior a amplitude, maior a vibração, maior o problema.

4.4 Método de aferição

Um acelerômetro é conectado à máquina (figura 3), gerando um sinal de tensão que corresponde à quantidade de vibração (amplitude) e à frequência de vibração que a máquina está produzindo. (Novise,2022). Ainda segundo Novise (2022), essa unidade é mensurada em aceleração (deslocamento por segundo ao quadrado) e analisada em velocidade (deslocamento por segundo).

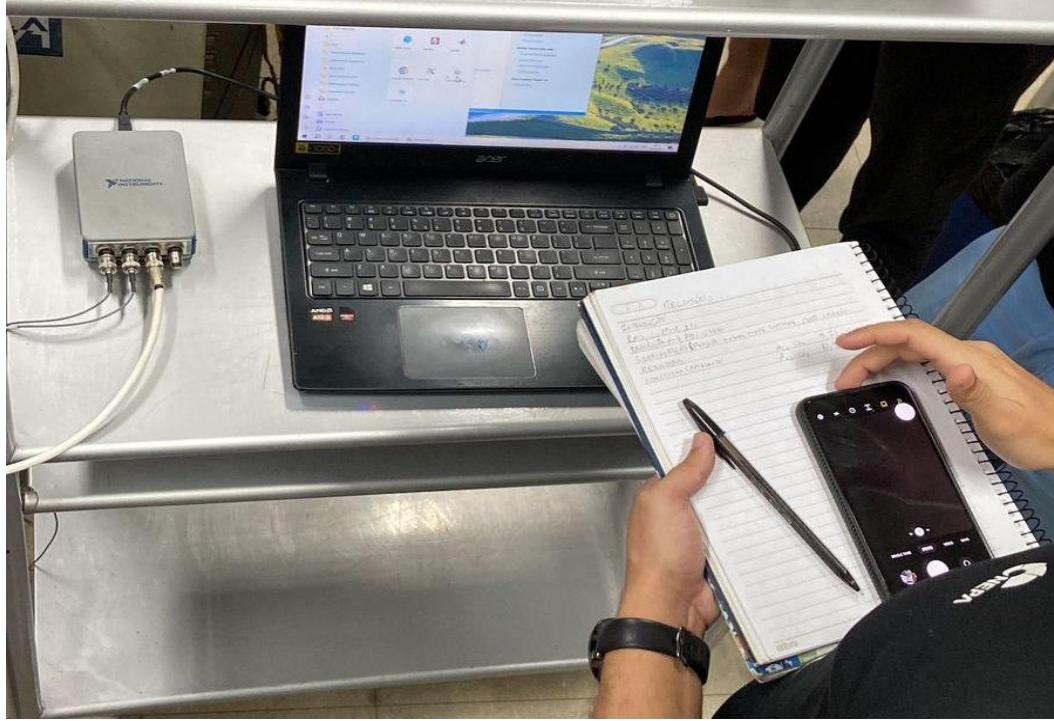
Figura 3 – Acelerômetro



Fonte: Rondon (2023)

O sinal do acelerômetro é interpretado por um coletor de dados (software), que o registra como amplitude pelo tempo (“*Time Waveform*”), amplitude pela frequência (“*FFT Spectrum*”) ou ambos. Todos esses dados são processados por algoritmos de programas computacionais, que, por sua vez, são analisados por engenheiros e analistas de vibração qualificados para determinar a saúde da máquina e identificar possíveis problemas ou a causa do mesmo (figura 4) (Novise, 2022).

Figura 4 – Computador e um software utilizado na medição



Fonte: Rondon (2023)

De acordo com Novise (2022), a análise de vibração pode detectar problemas como:

- Desalinhamentos;
- Desgastes nos rolamentos;
- Folgas mecânica;
- Desalinhamentos;
- Eixos danificados;
- Falhas na caixa de engrenagem;
- Espaço vazio ou bolhas (cavitação) nas bombas;
- Velocidades críticas.

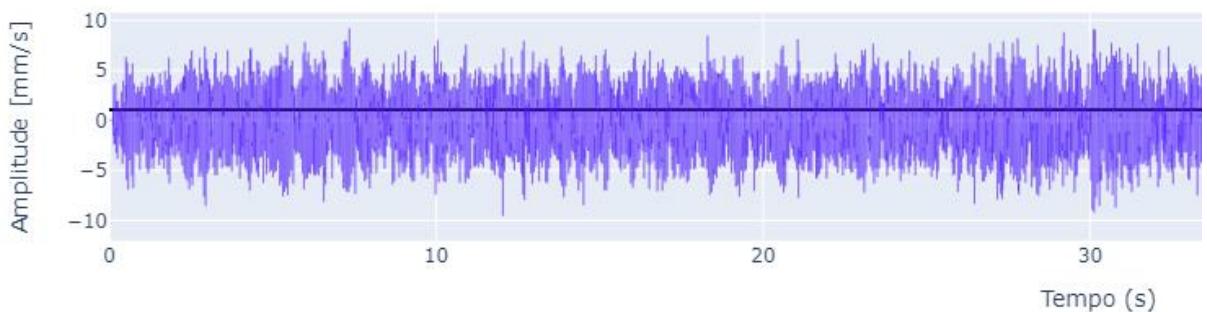
4.5 Metodologia na análise de vibração

Os acelerômetros são uma ferramenta valiosa para a análise de vibração. Eles são relativamente baratos e fáceis de usar, o que os torna uma opção popular para uma ampla gama de aplicações. De acordo com Novise (2022) “a análise de vibração é geralmente dividida em quatro princípios, e cada princípio fornece informações específicas sobre as condições de trabalho e características das peças vibratórias”.

- **Domínio de tempo (“Time Domain Plot or Graph”):** A plotagem do sinal coletado através de um tradutor (dispositivo que converte uma grandeza física em um sinal elétrico), como um acelerômetro, ilustra como a variação de amplitude por tempo, comumente na unidade de deslocamento por tempo, se comporta. Esta plotagem gráfica (figura 5) é chamada de forma de onda (“Waveform”). Segundo SKF Reliability Systems (2000, p. 5, tradução nossa):

“As formas de onda de tempo exibem uma pequena amostra de tempo da vibração bruta. Embora normalmente não sejam tão úteis quanto outros formatos de análise, a análise de formas de onda de tempo pode fornecer pistas sobre a condição da máquina que nem sempre são evidentes no espectro de frequência e, quando disponível, deve ser usada como parte de seu programa de análise”.

Figura 5 – Série temporal de aceleração



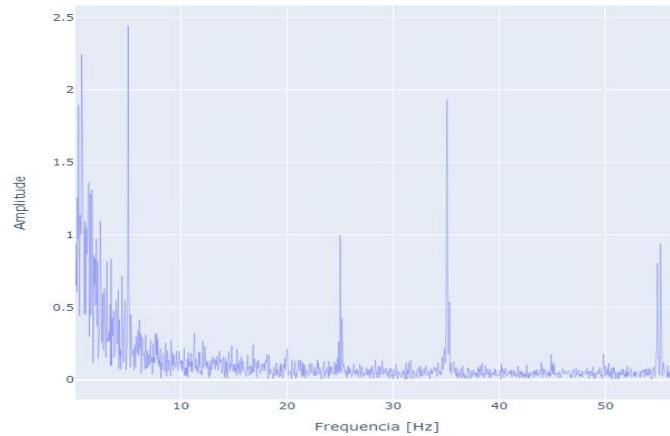
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- **Domínio da frequência:** A análise de espectro é útil para identificar problemas que podem causar falhas prematuras nas máquinas. A análise de espectro é geralmente usada em conjunto com a análise de formas de onda de tempo. Isso permite que os analistas de vibração tenham uma visão mais completa da condição da máquina (figura 6). Conforme descrito no guia SKF Reliability Systems (2000, p. 6, tradução nossa)

“Um espectro FFT é uma ferramenta incrivelmente útil. Se houver um problema com a máquina, os espectros FFT fornecem informações para ajudar a determinar a localização do problema, a causa do problema e, com tendências, quanto tempo até que o problema se torne crítico. Como sabemos que certos problemas de máquinas ocorrem em certas frequências, analisamos o espectro FFT procurando mudanças de amplitude em certas faixas de frequência”.

Figura 6 – Gráfico FFT de uma série temporal de aceleração

fft - Velocidade

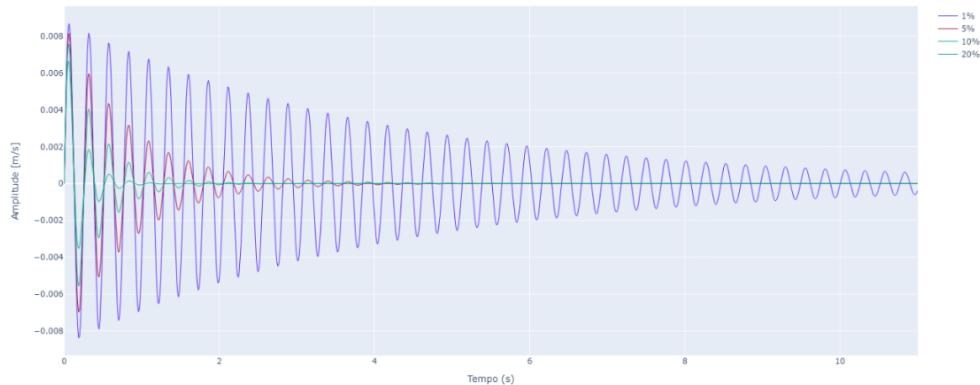


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

- **Análise modal:** A análise modal é um método que usa as funções de resposta de frequência medidas de uma máquina para criar um modelo computacional. Este modelo pode ser usado para visualizar a máquina em diferentes modos de vibração. O modelo também pode ser ajustado para analisar os efeitos de mudanças na massa ou na rigidez da máquina (figura 7).

Figura 7 – Série temporal de aceleração, com variações do fator de amortecimento

Respostas $x(t)$ para variações do fator de amortecimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ademais dos quatro princípios básicos, ainda existem diversas formas de análise, cálculos e algoritmos que são usados para determinar diferentes aspectos da análise de vibração (Novise, 2022):

- **Forma de onda de tempo:** As formas de onda de tempo são gráficos que mostram a aceleração de uma máquina ao longo do tempo. Elas são usadas para avaliar a condição de uma máquina, pois podem revelar problemas como desgaste de rolamentos, desbalanceamento e desalinhamento. Conforme descrito por Novise (2022), “método para usar formas de onda de tempo como uma ferramenta de análise de vibração é usando a transformada rápida de Fourier (FFT). A FFT converte a forma de onda de tempo do domínio do tempo para o domínio da frequência, onde as frequências componentes da vibração são exibidas como pontos em um gráfico”.
- **Fast Fourier Transform (FFT):** FFT é um algoritmo matemático que converte uma forma de onda do domínio do tempo para o domínio da frequência. O domínio do tempo é uma representação da vibração como uma função do tempo, enquanto o domínio da frequência é uma representação da vibração em diferentes frequências. A FFT é mais frequentemente usada para detectar falhas na máquina, como desalinhamento ou desbalanceamento. Isso ocorre porque as falhas na máquina geralmente produzem vibrações em frequências específicas. Por exemplo, um rolamento desgastado pode produzir vibrações em uma frequência de 120Hz, que “comumente” é a frequência natural do rolamento. De acordo com o guia SKF Reliability Systems (2000, p. 6, tradução nossa):

“Um espectro FFT é uma ferramenta incrivelmente útil. Se existir um problema com a máquina, os espectros FFT fornecem informações para ajudar a determinar a localização do problema, a causa do problema e, com tendências, quanto tempo até que o problema se torne crítico. Como sabemos que certos problemas de máquinas ocorrem em certas frequências, analisamos o espectro FFT procurando mudanças de amplitude em certas faixas de frequência”.

A FFT pode ser usada para detectar falhas na máquina de várias maneiras. Uma maneira é procurar por componentes de frequência específicos no espectro de frequência. Outra maneira é procurar por mudanças no espectro de frequência ao longo do tempo. Conforme Bently (2000), “a FFT é uma ferramenta valiosa para a análise de vibração. Ela pode ser usada para detectar falhas na máquina, avaliar a condição de uma máquina e identificar problemas que podem causar falhas prematuras”.

- **Medição de fase:** Na análise de vibração, a fase é a diferença entre os pontos de pico de dois sinais medidos, em unidades de ângulo. Este método só funciona se os dois

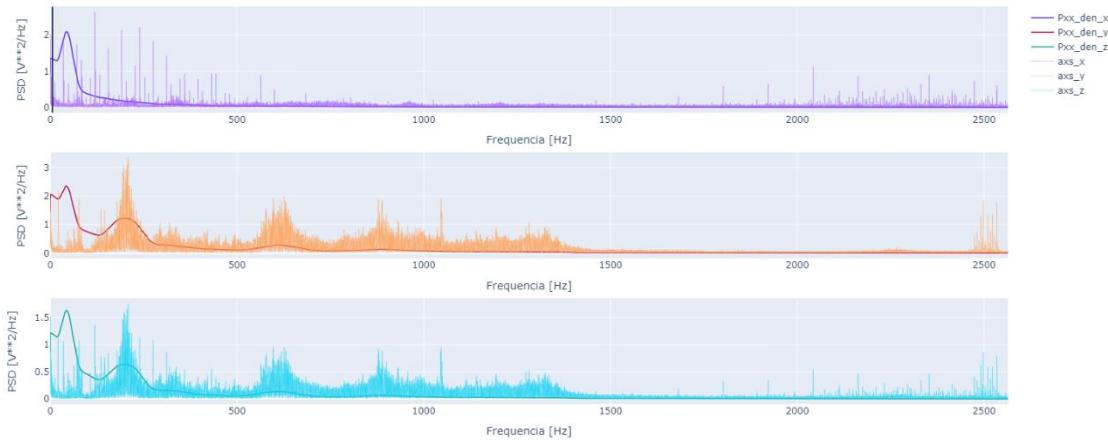
sinais comparados forem da mesma frequência. Novise (2022) descreve tal método da seguinte forma “Este método só funciona se os dois sinais comparados forem da mesma frequência. A medição de fase é usada em conjunto com a transformada rápida de Fourier (FFT) para identificar falhas na máquina, como peças soltas, desalinhamento e desbalanceamento”. Já segundo SKF Reliability Systems (2000, p. 7, tradução nossa),

“A fase mede a diferença angular entre uma marca conhecida em um eixo rotativo e o sinal de vibração do eixo. Essa relação fornece informações valiosas sobre os níveis de amplitude da vibração, a órbita do eixo e a posição do eixo, e é muito útil para fins de balanceamento e análise”.

- **Análise de ordem:** A análise de ordem é uma variação da análise FFT que é usada para quantificar as vibrações de máquinas com rotações por minuto (RPM) variadas. Podemos aqui trazer a descrição de Novise (2022) “Em outras palavras, a análise de ordem é uma análise de frequência em que o eixo de frequência do espectro é mostrado em ordens de RPM, em vez de hertz. O termo "ordens" refere-se a uma frequência que é um múltiplo de uma velocidade rotacional de referência. Por exemplo, se um sinal de vibração é igual a duas vezes a frequência de rotação do motor, a ordem é dois”. Conforme Bently (2000), “a *Power Spectral Density* (PSD) é uma ferramenta poderosa que pode ser usada para analisar vibrações. Ela é usada para identificar falhas na máquina, avaliar a condição de uma máquina e comparar sinais de vibração aleatórios”.
- **Densidade espectral de potência (PSD - Power Spectral Density):** De acordo com Novise (2022), “a densidade espectral de potência (PSD) é calculada multiplicando a amplitude da transformada rápida de Fourier (FFT) por suas diferentes formas para normalizá-la com a largura do compartimento de frequência. A largura do compartimento refere-se aos valores agrupados no eixo x. Para exemplificar, podemos pensar na PSD como uma maneira de olhar para vibrações ou movimentos “aleatórios” em muitas frequências diferentes”. Dessa forma, *Power Spectral Density* compara com acurácia os sinais de vibração aleatórios que possuem diferentes comprimentos de sinal (figura 8).
- **Análise de envelope:** Também segundo Novise (2022), “análise de envelope é uma forma de análise de vibração que pode detectar impactos com energia muito baixa,

muitas vezes ocultos por outros sinais de vibração. É uma ferramenta de diagnóstico popular para dentes de engrenagem e rolamentos de rolos danificados” (figura 8).

Figura 8 – Plotagem de PSD de uma série temporal de aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.6 Categorias de aferição

- **Medição de Curtose:** Neste tipo de medição, Novise, (2022) descreve “A curtose é uma medida do "pico" de um sinal aleatório. Sinais com um valor de curtose mais alto têm mais picos maiores que três vezes o valor da raiz quadrada média (RMS) do sinal. Na análise de vibração, a curtose é usada para monitorar o desenvolvimento da fadiga em rolamentos”.
- **Média do sinal:** A média do sinal é uma operação matemática que remove a tendência do sinal ao longo do tempo. Esta operação é importante na análise de vibração porque determina o nível do sinal em cada frequência. É particularmente importante para medições de baixa frequência porque elas precisam de um tempo médio mais longo para obter uma estimativa estaticamente precisa do espectro. A média do sinal é frequentemente usada no monitoramento de uma engrenagem em relação à sua velocidade de rotação. Neste exemplo, a média do sinal mostrará a ação cíclica de cada dente na engrenagem. Se um dente tiver uma grande rachadura, ela será detectada devido à sua maior flexibilidade (Novise, 2022).
- **Raiz quadrada média (RMS) do sinal -** RMS significa raiz quadrada média. É uma medida da intensidade de um sinal aleatório. É calculado tomando a raiz quadrada da

média dos quadrados dos valores de um sinal. RMS pode ser usado para identificar falhas que causam um aumento na amplitude da vibração. Por exemplo, um rolamento desgastado pode produzir vibrações com um RMS mais alto.

- **Assimetria do sinal** - Assimetria é uma medida da distribuição de um sinal ao redor da média. É calculado como a diferença entre a média e o terceiro quartil, dividido pela amplitude. Assimetria pode ser usada para identificar falhas que causam uma distorção na forma de onda da vibração. Por exemplo, um dente de engrenagem quebrado pode produzir vibrações com uma assimetria mais alta.

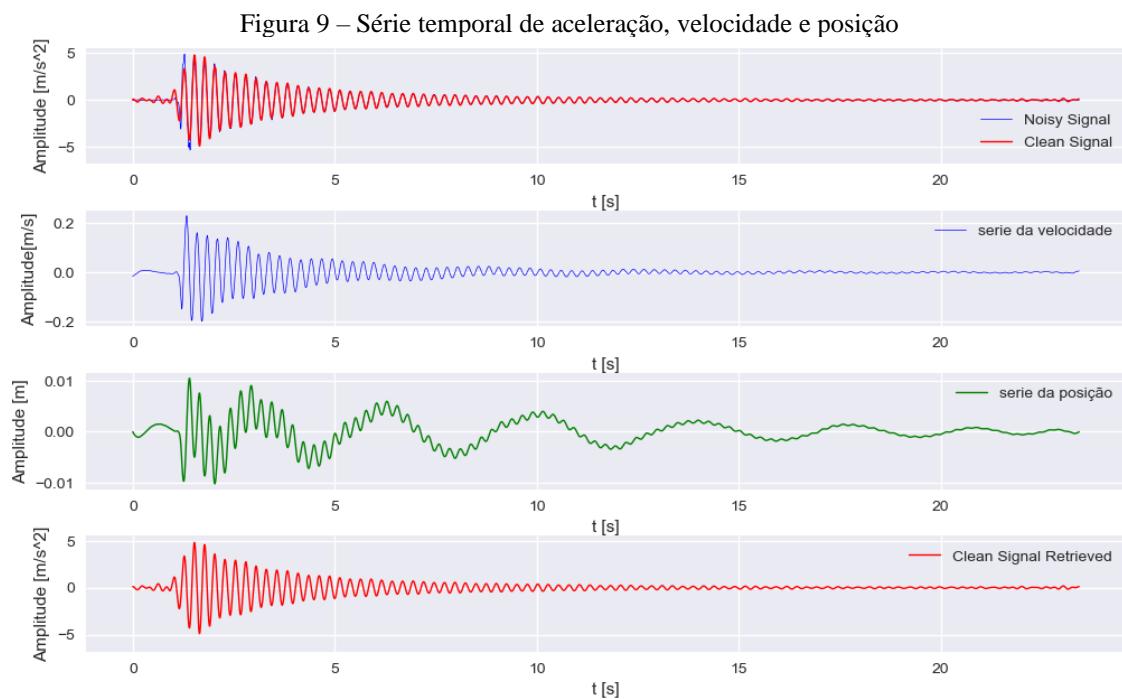
4.7 Parâmetros de aferição

A análise de vibração considera a análise de três parâmetros principais de avaliação: aceleração, velocidade, deslocamento. Cada um desses parâmetros é mais sensível a determinadas faixas de frequência e podem ser analisados em conjunto para diagnosticar problemas (Novise, 2022).

- **Aceleração:** Aceleração é a taxa de alteração da velocidade, medida obtida diretamente por um acelerômetro. Sua análise é mais sensível a altas frequências. Conforme SKF Reliability Systems (2000, p. 5, tradução nossa), “acelerômetros são dispositivos robustos que operam em uma faixa de frequência muito ampla, de quase zero até bem acima de 400 kHz. Essa capacidade de examinar uma ampla faixa de frequência é a principal força do acelerômetro”.
- **Deslocamento:** Assim como a aceleração é mais sensível às vibrações em altas frequências, o deslocamento é mais sensível às vibrações em baixas frequências. Dessa forma, Novise (2022), “As medições de deslocamento geralmente são usadas apenas para examinar o quadro geral de vibrações mecânicas. O deslocamento pode ser usado para descobrir o desequilíbrio em uma peça rotativa, pois causa uma quantidade significativa de deslocamento nas frequências rotacionais do eixo da máquina”. De acordo com SKF Reliability Systems (2000, p. 5, tradução nossa), “deslocamento é a mudança na distância ou posição de um objeto em relação a uma referência. A magnitude do deslocamento é medida como amplitude”.

- **Velocidade:** A amplitude da velocidade está relacionada à quantidade de energia cinética do sinal, e por consequência é possível avaliar a força destrutiva da vibração em determinada frequência, tornando-se um parâmetro de suma importância e por consequência o mais comumente utilizado. O RMS é calculado multiplicando a amplitude do pico por 0,707 e seu valor ilustra o melhor sinal de gravidade. De acordo com SKF Reliability Systems (2000, p. 5, tradução nossa), “velocidade mede a taxa de variação do deslocamento no sinal de vibração. É a medição de vibração de máquina mais comum”.

No próximo gráfico, é apresentado um exemplo de aceleração, deslocamento e velocidade no mesmo sinal, em um corpo recebendo uma resposta a um choque. É possível observar a relevância das baixas frequências na série temporal da posição (figura 9).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.8 Benefícios do monitoramento contínuo

Os métodos e ferramentas apresentados não são apenas indicativos para determinar o que há de errado com um equipamento ou maquinário (reativo), mas também podem ser usados para detectar problemas antes que causem tempo de inatividade significativo (proativo). De acordo com Novise (2022), “A aplicação da análise e monitoramento de vibração permite que

sejam analisadas quantitativamente a fragilidade estrutural, folgas excessivas de componentes rotativos e se a ressonância está presente”.

Se implementado corretamente, o monitoramento contínuo de vibração ajuda a otimizar o desempenho do maquinário. Portanto, Novise (2022), entende “com o uso de tecnologia moderna, é possível realizar leituras contínuas de vibração em diversos equipamentos em tempo real e ter os dados enviados diretamente para o smartphone, tablet ou desktop via nuvem.

- **Monitoramento de equipamentos críticos:** Novise (2022) descreve o monitoramento de equipamentos críticos como “Equipamento crítico é qualquer peça de equipamento ou máquina que possa causar um grande impacto financeiro ou de segurança caso haja alguma falha. O monitoramento contínuo de vibração ajuda a detectar discrepâncias no espectro de vibração, o que pode revelar problemas de lubrificação e defeitos nos rolamentos muito antes que os principais problemas apareçam”;
- **Monitoramento de equipamentos antigos:** Ainda Novise (2022) descreve “Muitas plantas operam 24 horas por dia, 7 dias por semana, parando apenas mensalmente ou trimestralmente para manutenção de rotina. Parar mais do que isso pode custar à planta uma quantia significativa de recursos. O monitoramento contínuo de vibração on-line ajuda a monitorar a condição de máquinas muito usadas ou máquinas com problemas e envia alertas quando essa condição muda”;
- **Monitoramento de equipamentos de difícil acesso:** Neste ponto, Novise (2022) entende “É difícil realizar manutenção em equipamentos localizados em locais de difícil acesso. Máquinas em telhados, torres de resfriamento e aquelas que operam em áreas de altas temperaturas podem ser monitoradas continuamente quanto a anormalidades de vibração, permitindo que a manutenção seja feita em um momento conveniente. Isso evita o tempo de inatividade não planejado e impede que a equipe de manutenção acesse esses locais desnecessariamente”.

5 METODOLOGIA

5.1 Banco de dados

O banco de dados das medições foi adquirido pelo laboratório de ensaios dinâmicos e análise de vibração (LEDAV) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a fim de analisar e avaliar os níveis de vibração medidos a bordo de um navio AHTS, e compará-las com os limites estabelecidos pela sociedade classificadora do navio.

O banco de dados de vibrações foi coletado para registrar informações de aceleração em um arquivo de texto (.txt). Em seguida, as informações foram analisadas com a linguagem de programação *Python*. A análise incluiu o cálculo das acelerações RMS em relação aos locais de medição e a plotagem de gráficos para análise espectral. Para obter resultados mais precisos, os valores das acelerações RMS foram comparados com os critérios estabelecidos na norma DNV.GL de *Rules of classification* de 2017.

As medições foram realizadas utilizando-se acelerômetros triaxiais, uma placa de aquisição da *National Instruments* e um notebook. Os arquivos de medição estão de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 – Lista de medições

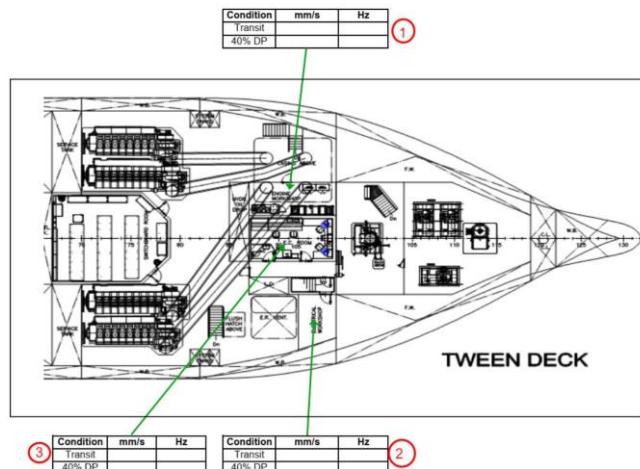
Ponto	Arquivos (.txt)
2	Compartimento_57
6	Engine_01_Top_LA
7	Engine_01_Bottom_LA
8	M01_Turbo_Casing
9	Motor_1_Tubulação_Tween Deck
12	Azimuth_Bow_Motor Elétrico_Mancal_LNA
13	Azimuth_Bow_Mancal_LA

Fonte: LEDAV (2021)

5.2 Medição de vibrações

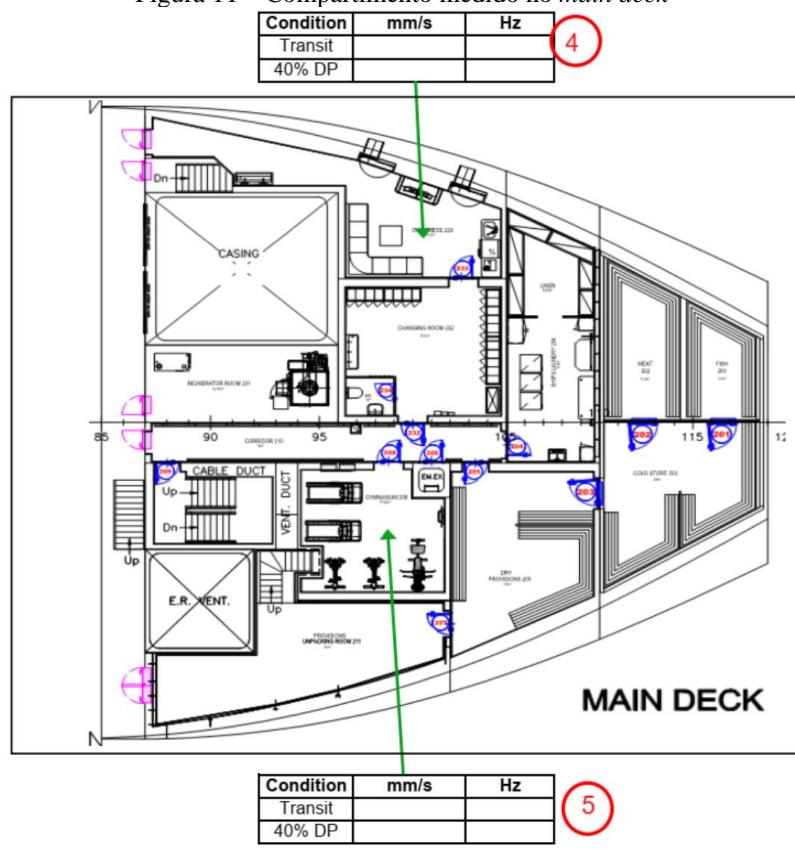
As medições de vibração foram realizadas nas acomodações, na estrutura local da praça de máquinas e nos equipamentos da propulsão principal, conforme mostram as figuras 10 à figura 18 do arranjo geral do navio, fornecido pelo LEDAV.

Figura 10 – Compartimento medido no *tween deck*



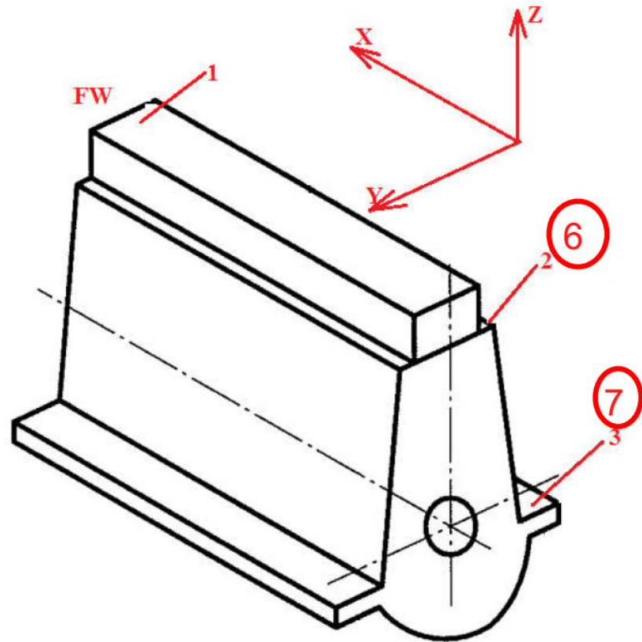
Fonte: LEDAV (2021)

Figura 11 – Compartimento medido no *main deck*



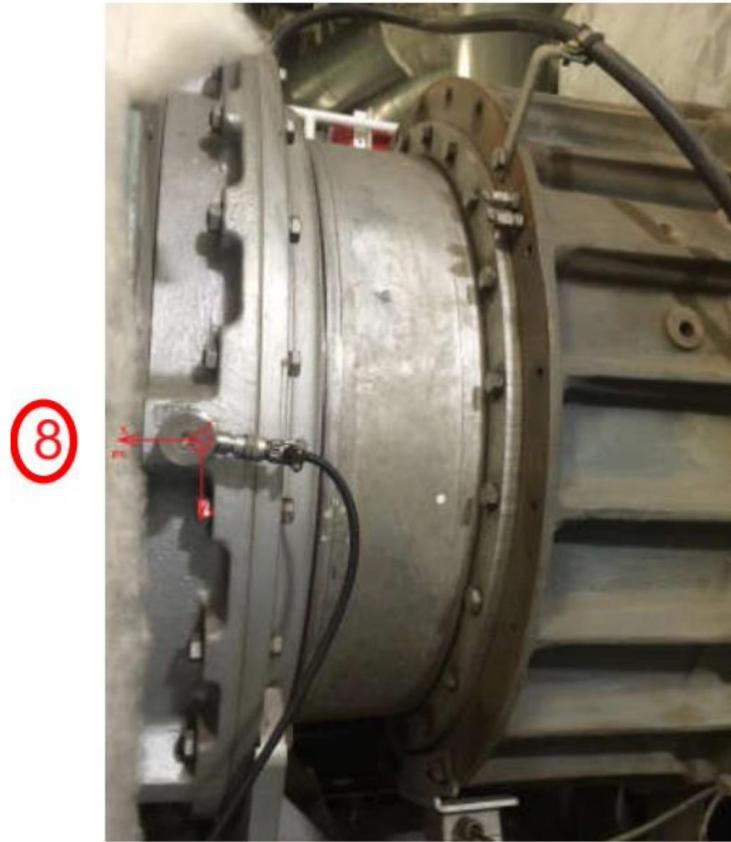
Fonte: LEDAV (2021)

Figura 12 – Pontos de medição no bloco dos motores de combustão principal



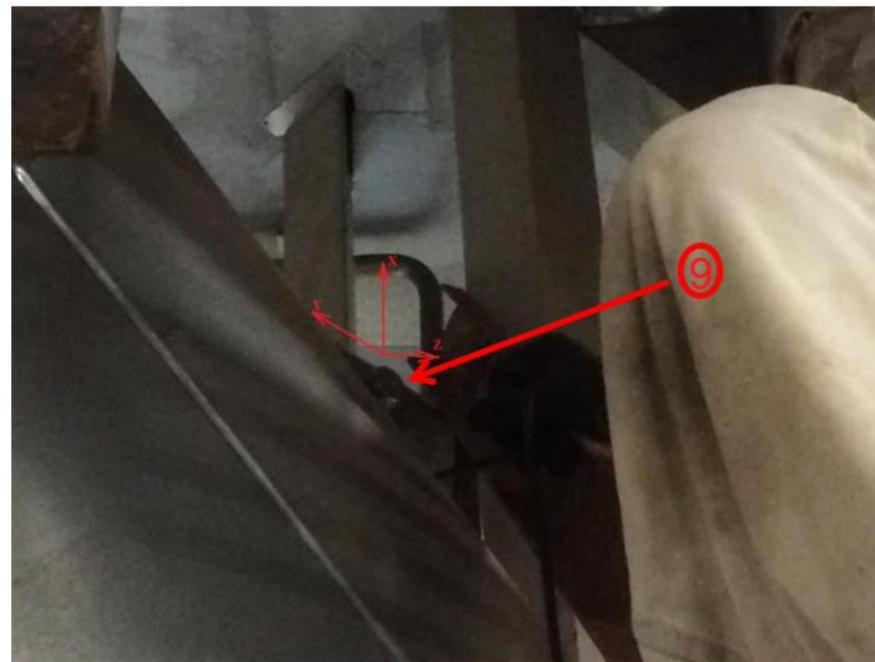
Fonte: LEDAV (2021)

Figura 13 – Ponto medido na carcaça do turbocompressor



Fonte: LEDAV (2021)

Figura 14 – Ponto medido no duto de exaustão



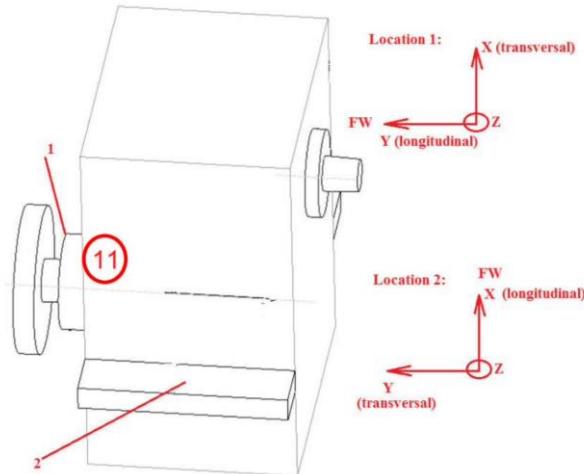
Fonte: LEDAV (2021)

Figura 15 – Segundo ponto medido no duto de exaustão



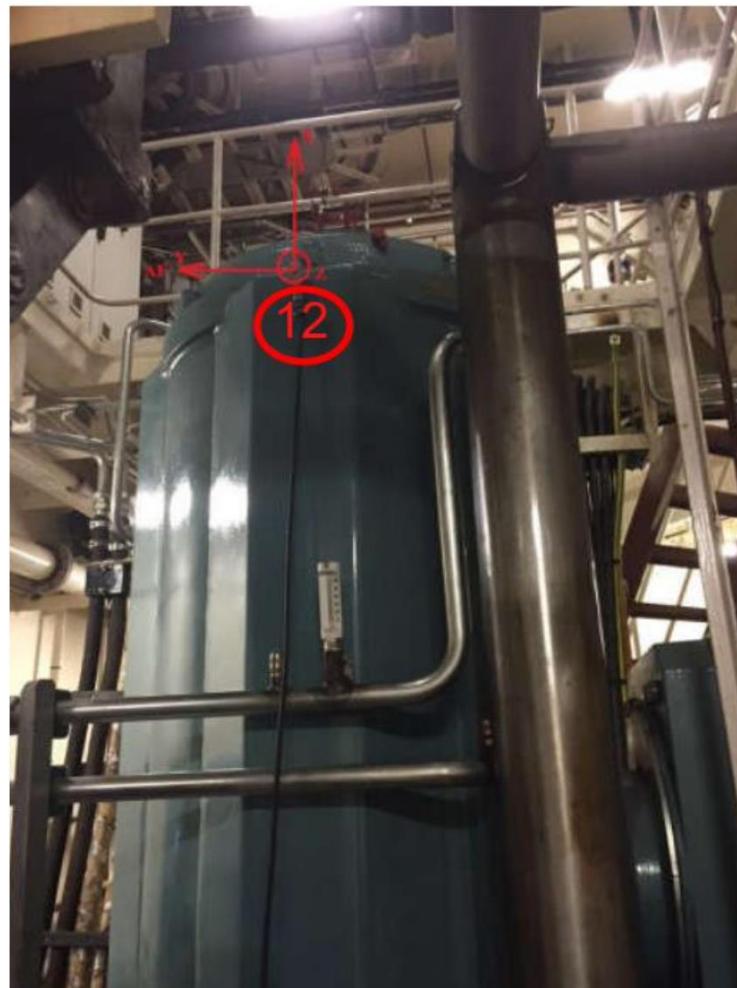
Fonte: LEDAV (2021)

Figura 16 – Ponto medido na caixa redutora



Fonte: LEDAV (2021)

Figura 17 – Ponto medido no lado não acoplado do motor elétrico dos thrusters



Fonte: LEDAV (2021)

Figura 18 – Ponto medido no lado não acoplado do motor elétrico dos thursters



Fonte: LEDAV (2021)

Os acelerômetros foram dispostos em pontos correspondentes e ilustrados nas figuras 10 a 18, foram realizadas 07 (sete) medições em 07 (sete) equipamentos, conforme descrito na tabela 1.

No software de aquisição de dados foi determinada a frequência de aquisição em cada equipamento, e a unidade de medida dos dados obtidos em “g” m/s² de acordo com a tabela 2. Ao final das medições, os dados obtidos foram exportados, através do software de aquisição de dados, em 07 arquivos no formato de texto (.txt), disponibilizados pelo LEDAV.

Tabela 2 – Medições obtidas pelo LEDAV

Arquivos (.txt)	Amostras: eixo X	Amostras: eixo Y	Amostras: eixo Z	data	Frequência de aquisição (fs): HZ
Compartimento _57	64000	64000	64000	24/04/16	2049,18
Engine_01_To p_LA	124000	124000	124000	22/03/16	2049,18
Engine_01_Bot tom_LA	124000	124000	124000	22/03/21	2049,18

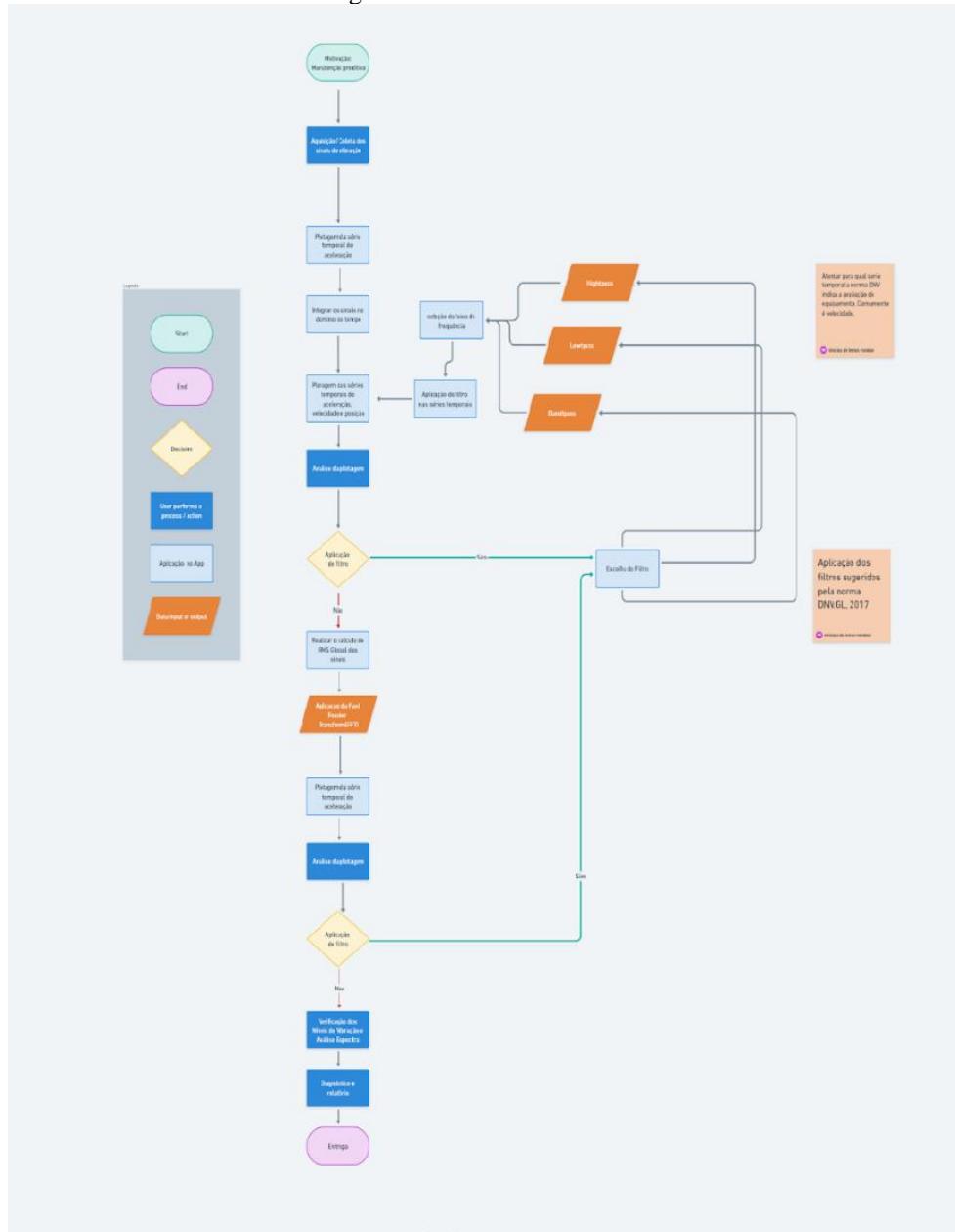
M01_Turbo_C asing	124000	124000	124000	24/04/16	2049,18
Motor_1_Tubu lação_Tween	70000	70000	70000	22/03/16	2049,18
Deck					
Azimuth_Bow _Motor	124000	124000	124000	22/03/16	2049,18
Elétrico_Manc al_LNA					
Azimuth_Bow _Mancal_LA	124000	124000	124000	22/03/16	2049,18

Fonte: LEDAV (2021)

5.2 Fluxo de trabalho

Foi estabelecido o seguinte fluxo de trabalho como procedimento desde a motivação até a conclusão do trabalho.

Figura 19 – Fluxo de Trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

5.3 Processamento e análise dos dados

Dada a frequência de aquisição em cerca de 2.000 HZ e ao tempo de medição, foram gerados bancos de dados com mais de 80.000 linhas. Portanto, seu processamento foi dado através da linguagem de programação *Python*.

Os arquivos de texto gerados pelo software de aquisição de dados continham um cabeçalho em suas primeiras linhas, com informações a respeito dos canais de medição, data e hora de início das medições e período de medição. Desta forma, no momento de importação dos dados para Python, foram retirados os dados de aquisição, deixando apenas as linhas com

dados referentes às medições de vibração. Além disso, os valores do arquivo eram separados por “,” e foi alterado por “.” Para efetuar a leitura e tratamento dos dados, conforme ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Arquivos gerados no Python

Header Data	Processed Data (X, Y, Z)
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda LabVIEW Measurement Writer_Version 2 Reader_Version 2 Separator Tab Decimal_Separator . Multi_Headings No X_Colours No Time_Pref Absolute Operator Ricardo Date 2016/04/24 Time 12:35:11.0380905812498510812 ***End_of_Header***	
Channels 3 Samples 64000 64000 Date 2016/04/24 2016/04/24 2016/04/24 Time 12:35:11.0380905812498510812 12:35:11.0380905812498510812 12:35:11.0380905812498510812 Y_Unit_Label g X_Dimension Time Time Time X0 0.00000000000000E+0 0.00000000000000E+0 0.00000000000000E+0 Delta_X 0.000488 0.000488 0.000488 ***End_of_Header***	
X_Value_B0 (Collected) Canal_Y (Collected) Canal_Z (Collected) Comment	
0.016474 0.013953 -0.024637 0.020397 0.011319 -0.031930 0.026024 0.008869 -0.043025 0.029576 0.011124 -0.051264 0.026588 0.011886 -0.052333 0.024234 0.012545 -0.054456 0.022279 0.009911 -0.059711 0.001947 0.001627 -0.032992 -0.007068 -0.006667 -0.025845 -0.011883 -0.000812 -0.023850 -0.015362 0.010393 -0.021596 -0.017272 0.010490 -0.019690 -0.025537 0.001383 -0.006358 -0.029412 0.002614 -0.002899 -0.022188 0.024932 -0.011149 -0.014294 0.031260 -0.017167 -0.016067 0.010302 -0.010390 -0.013001 -0.000205 -0.000595 -0.025323 -0.012327 0.006665 -0.024645 -0.019790 0.014862 -0.026592 -0.019051 0.026488 -0.021917 0.002669 0.026494 -0.015106 0.010700 0.010700 -0.016454 0.023975 0.023962 0.004558 0.005711 0.020769 0.015026 -0.008664 0.013421 0.023198 -0.013029 0.005677 0.026836 -0.011059 0.007465 0.020588 -0.008333 0.012113 0.017535 0.001889 0.020043 0.014111 -0.008581 0.023473 0.017437 0.004412 0.017462	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

É salutar observar outros parâmetros de funcionamento do equipamento antes de empregar qualquer metodologia computacional, a fim de determinar certos parâmetros de funcionamento e comportamentos característicos já esperados nos gráficos, principalmente na análise espectral e análise de ordem. Tais valores foram obtidos pelo LEDAV durante a aquisição, ilustrados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros obtidos pelo LEDAV

Componente	Rotação (RPM)	Rotação (HZ)	Principais ordens de excitação (HZ)			
			0,5°	1°	1,5°	2°
Máquinas rotativas	750	12,5	6,25	12,5	18,75	25
Linha de Eixo	135,14	2,25	-	2,25	-	4,5
Propulsor			-	9,01	-	18,02

Fonte: LEDAV (2016)

É esperado amplitudes relevantes no espectro para esses valores em frequência descritos na tabela 2, pois são características intrínsecas ao equipamento e a operação do mesmo. Para a avaliação das análises foi utilizada a série temporal de velocidade, devido ao fato da norma DNV.GL cap. 2.3.2.1 , utilizá-la como parâmetro principal contida nas tabelas 4 a 18.

Tabela 4 – Mancais da linha de eixo

Velocidade
1 – 200 HZ
5 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 5 – Motores diesel < 200 rpm

1 – 200 HZ		
	Deslocamento	velocidade
vertical	1 mm	10 mm/s
longitudinal	1 mm	10 mm/s
transversal	1.5 mm	25 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 6 – Motores diesel > 200 rpm

Velocidade	
	4 – 200 HZ
Montagem firme	Montagem resiliente
15 mm/s	25 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 7 – Turbo compressor

4 – 200 HZ		
Potência total combinada	Velocidade	Aceleração
Abaixo de 5 MW	45 mm/s	2,5g
5 – 10 MW	50 mm/s	2,0 g
Acima de 10 MW	55 mm/s	1,5g

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 8 - Motor elétrico do thrusters

Velocidade
4 – 200 HZ
18 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 9 – Turbinas

Velocidade

4 – 1000 HZ

7 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 10 – Geradores movidos a turbinas

Velocidade

4 – 1000 HZ

7 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 11 – Engrenagens

Velocidade

4 – 1000 HZ

7 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 12 – Engrenagens

Velocidade

4 – 1000 HZ

7 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 13 – Motores elétricos, separadores, bombas hidráulicas acionadas por motor, ventiladores não instalados em motores alternados

velocidade**4 – 200 HZ**

Excitação interna 7 mm/s

Excitação externa 12 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 14 – Compressores

velocidade**4 – 200 HZ**

Montagem elástica 10 mm/s

Montagem fixa 7 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 15 – Compressores e bombas alternadas

Velocidade
4 – 200 HZ
30 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 16 – Boilers

Velocidade
4 – 200 HZ
45 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 17 – Redes

Velocidade
4 – 200 HZ
45 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 18 – Equipamentos eletrônicos

Velocidade	
4 – 200 HZ	
Montado em anteparas	12 mm/s
Montado em mastros	20 mm/s
Montado em máquinas	25 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Tabela 19 – Valores máximos ponderados em frequência de r.m.s. em milímetros por segundo de 1 Hz a 80 Hz para navios de carga

Locais	Comfort rating number (crn) 1 – 80 HZ		
	1	2	3
Cabines	2 mm/s	2.7 mm/s	3,5 mm/s
Salões de recreio	2 mm/s	2.7 mm/s	3,5 mm/s
Escritórios	2 mm/s	2.7 mm/s	3,5 mm/s
Manobra	2 mm/s	2.7 mm/s	3,5 mm/s
Sala de controle	2 mm/s	2.7 mm/s	3,5 mm/s
Espaços de trabalho diferentes de espaços de máquinas e espaços de trabalho em convés aberto	3,5 mm/s	3,5 mm/s	4 mm/s

Fonte: DNV.GL (2017)

Para condução de uma correta comparação com a norma DNV.GL, é preciso seguir rigorosamente os requisitos impostos na publicação, assim como os valores das tabelas 3 a 18 não devem ser excedidos, desta forma podendo ser utilizados para todas as máquinas relevantes, independentemente de a vibração ser causada por fatores internos ou externos

Os níveis de vibração das máquinas podem ser usados para avaliar a qualidade da montagem, do balanceamento e do alinhamento de novas máquinas, bem como o desempenho operacional de máquinas em operação. Os critérios para os níveis de vibração devem ser aplicados a todas as velocidades e cargas operacionais permitidas, desde que a máquina esteja funcionando de forma estável. Além disso, a norma exige que os intervalos operacionais restritos, se houver, sejam claramente definidos (DNV.GL, 2017).

6 DESENVOLVIMENTO

Para prosseguir com o *workflow*, definido no item capítulo 2.1, após a aquisição/ Coleta dos sinais de vibração, o próximo passo é a plotagem da série temporal em aceleração para checagem inicial do sinal, conforme da linha de código da figura 21, onde são definidas no eixo x um lista contendo os valores em segundo correspondentes aos das medições que estarão definidas no eixo y, gerando uma figura 22 com 3 gráficos correspondentes aos eixos das dimensões de aquisição do acelerômetro.

Figura 21 – Linhas de códigos gerados

```
# figura 1: raw signal

fig = make_subplots(rows=3, cols=1)

fig.add_trace(go.Scatter(x=lista_sample,y=lista_data_x, mode="lines",
name="axs_x", line_width=0.4), row=1, col=1)
fig.add_trace(go.Scatter(x=lista_sample,y=lista_data_y, mode="lines",
name="axs_y", line_width=0.4), row=2, col=1)
fig.add_trace(go.Scatter(x=lista_sample,y=lista_data_z, mode="lines",
name="axs_z", line_width=0.4), row=3, col=1)

fig.update_layout(title_text="Raw signal", title_x=0.5,
title_font_size=30, height=700,
xaxis_title="Tempo (s)",
yaxis_title="Amplitude [m/s^2]")

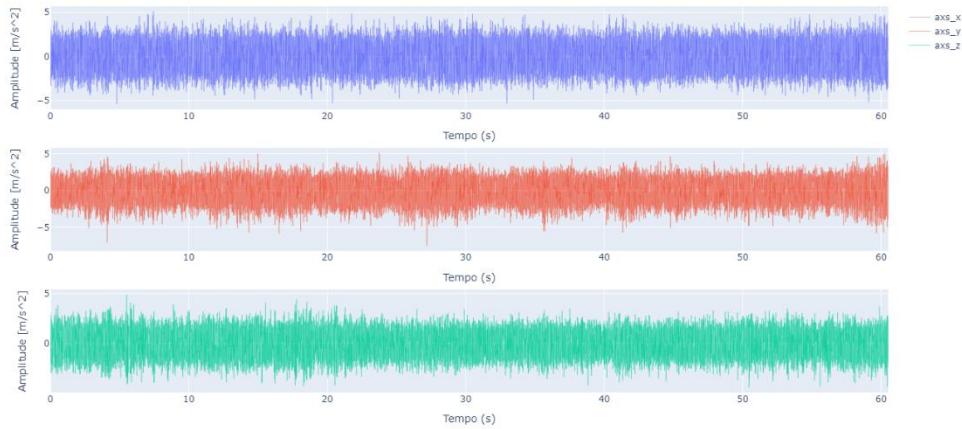
# Definir o título do eixo Y do subplot na linha 2, coluna 1
fig.update_yaxes(title="Amplitude [m/s^2]", row=2, col=1)
fig.update_xaxes(title="Tempo (s)", row=2, col=1)

# Definir o título do eixo Y do subplot na linha 2, coluna 1
fig.update_yaxes(title="Amplitude [m/s^2]", row=3, col=1)
fig.update_xaxes(title="Tempo (s)", row=3, col=1)

fig.show()
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 22 – Série temporal de aceleração do *azimuth_bow_mancal_la*
Raw signal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Dado resultado satisfatório, segue-se para o próximo *step* que é integrar o sinal de aceleração no domínio do tempo para encontrar a série temporal da velocidade e posteriormente integrar a velocidade para gerar a posição, utilizando o script da figura 23.

Figura 23 – Integração da série de aceleração em velocidade

```
# Função que integra a série de aceleração em velocidade 'X'

serie_data_x = []

for i in range(len(lista_data_x)):

    serie_data_x.append([lista_sample[i], lista_data_x[i]])

lista_v_x = integrate.cumulative_trapezoid(lista_data_x, lista_sample,
initial=0)
lista_v_x = polynomial(lista_v_x, order=8, plot=False)
)

# função necessária para remover a tendência após a integração
#len(lista_v)

# Função que integra a série de aceleração em velocidade 'Y'

serie_data_y = []

for i in range(len(lista_data_y)):

    serie_data_y.append([lista_sample[i], lista_data_y[i]])

lista_v_y = integrate.cumulative_trapezoid(lista_data_y, lista_sample,
initial=0)
lista_v_y = polynomial(lista_v_y, order=10, plot=False)
)

# função necessária para remover a tendência após a integração
#len(lista_v)

# Função que integra a série de aceleração em velocidade 'z'

serie_data_z = []

for i in range(len(lista_data_z)):

    serie_data_z.append([lista_sample[i], lista_data_z[i]])

lista_v_z = integrate.cumulative_trapezoid(lista_data_z, lista_sample,
initial=0)
lista_v_z = polynomial(lista_v_z, order=10, plot=False)
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

É possível observar que foram realizados 02(dois) processos principais, o primeiro de integração utilizando o método “*cumulative Trapezoid*”.

O método de trapézios convencional é um método numérico para aproximar o valor de uma integral definida dividindo a área sob a curva de uma função integrada em trapézios e em seguida, somando as áreas destes (Burden, 2002). Porém, como o intervalo de iterações desta integração é extremamente grande, o erro acumulado devido às aproximações é expressivo, uma estratégia para reduzir este erro é discretizar o intervalo de integração em diversos subintervalos menores.

A regra do trapézio composto (JUSTO, 2020) assume a seguinte forma

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx \\ &\approx \sum_{i=1}^n \frac{x_{i+1} - x_i}{2} [f(x_i) + f(x_{i+1})]. \end{aligned}$$

Como $h = x_{i+1} - x_i$, temos:

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &\approx \frac{h}{2} \sum_{k=1}^{N_i} [f(x_k) + f(x_{k+1})] \\ &= \frac{h}{2} [f(x_1) + 2f(x_2) + 2f(x_3) + \dots + 2f(x_{N_i}) + f(x_{N_{i+1}})] \\ &= \frac{h}{2} [f(x_1) + f(x_{N_{i+1}})] + \sum_{i=2}^{N_i} f(x_i) \end{aligned}$$

A função “*cumulative_trapezoid*” utilizada na figura 24 aceita os parâmetros de entrada advindos da biblioteca matemática *scipy*, disponível para utilização.

Figura 24 – Função “*cumulative_trapezoid*”

```

def cumulative_trapezoid(y, x=None, dx=1.0, axis=-1, initial=None):
    """
    Cumulatively integrate y(x) using the composite trapezoidal rule.

    Parameters
    -----
    y : array_like
        Values to integrate.
    x : array_like, optional
        The coordinate to integrate along. If None (default), use spacing
        `dx` between consecutive elements in `y`.
    dx : float, optional
        Spacing between elements of `y`. Only used if `x` is None.
    axis : int, optional
        Specifies the axis to cumulate. Default is -1 (last axis).
    initial : scalar, optional
        If given, insert this value at the beginning of the returned result.
        Typically this value should be 0. Default is None, which means no
        value at ``x[0]`` is returned and `res` has one element less than
        `y` along the axis of integration.

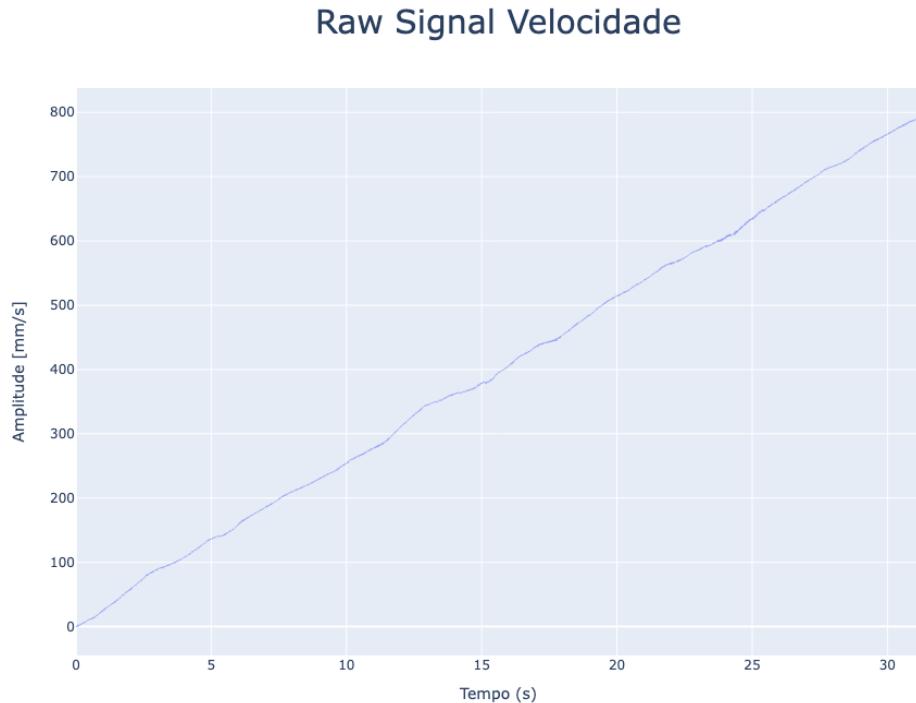
    Returns
    -----
    res : ndarray
        The result of cumulative integration of `y` along `axis`.
        If `initial` is None, the shape is such that the axis of integration
        has one less value than `y`. If `initial` is given, the shape is equal
        to that of `y`.

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ainda assim, mesmo que o utilize uma função para reduzir o erro de aproximação devido o método de integração, a função resultante com um grau polinomial muito grande continua a apresentar forte tendência, indicando uma inclinação, “*drift*”, em relação ao eixo das abscissas conforme a figura 25.

Figura 25 – Gráfico com inclinação “drift”



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Esta inclinação indica uma forte presença de um erro sistemático. Geralmente ocorrem erros de vários tipos numa mesma medição. Estes erros podem ser agrupados em dois grandes grupos que são: os erros sistemáticos e erros estatísticos (ou aleatórios).

Considerando o conjunto de x_i determinações ($i = 3, 2, 1, \dots, n$) de um mensurando, os erros estatísticos e erros sistemáticos podem ser distinguidos como segue:

a) Erro sistemático: é um erro que afeta igualmente todas as n medições x_i . Isto é, o conjunto completo das n medições x_i apresenta-se igualmente deslocada com relação ao valor verdadeiro x_v . Erros sistemáticos podem ser de vários tipos como:

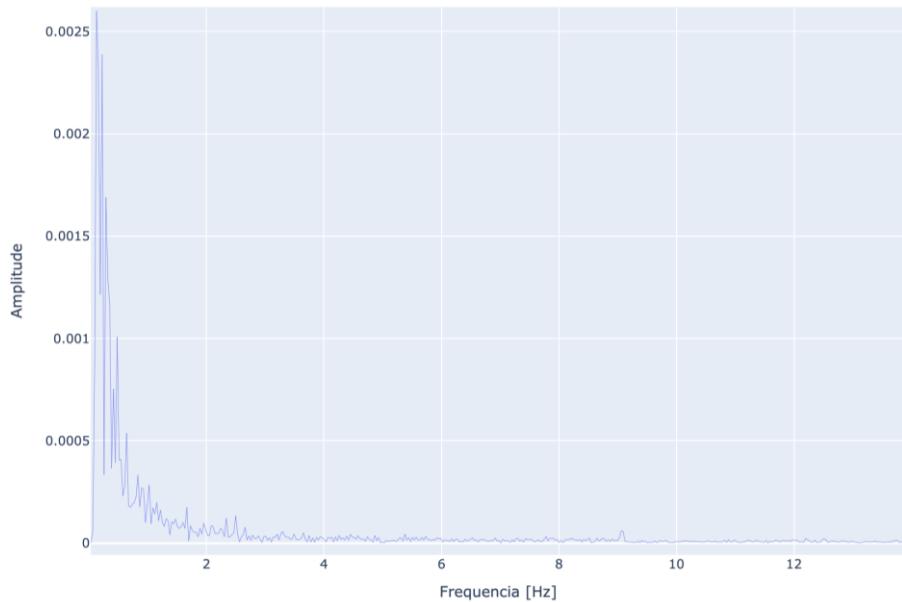
- Erro sistemático instrumental: erro que resulta da calibração do instrumento de medição.
- Erro sistemático ambiental: erro devido a efeito do ambiente sobre a experiência. Fatores ambientais como temperatura, pressão, umidade e outros podem introduzir erros no resultado das medições.

- Erro sistemático observacional: erro devido a pequenas falhas de procedimentos ou limitações do observador. Por exemplo, o efeito de paralaxe na leitura de escala de instrumentos.

Para resolver essa questão foi utilizado um filtro “*highpass*” para remover a constante presente no 0hz, conforme a figura 26, onde é possível verificar o sinal no domínio da frequência obtido através da transformada rápida de Fourrier, a qual causa este efeito de “*drift*”.

Figura 26 – Sinal no domínio da frequência

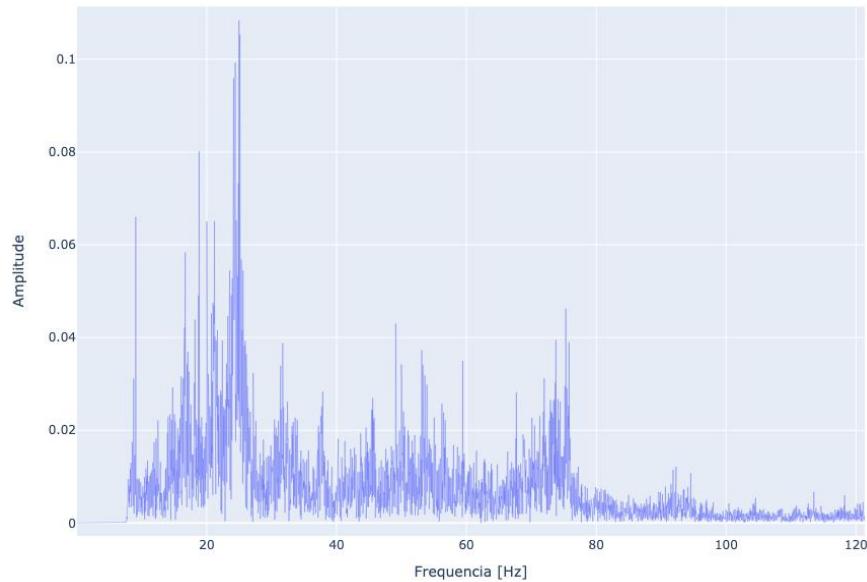
fft - Velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

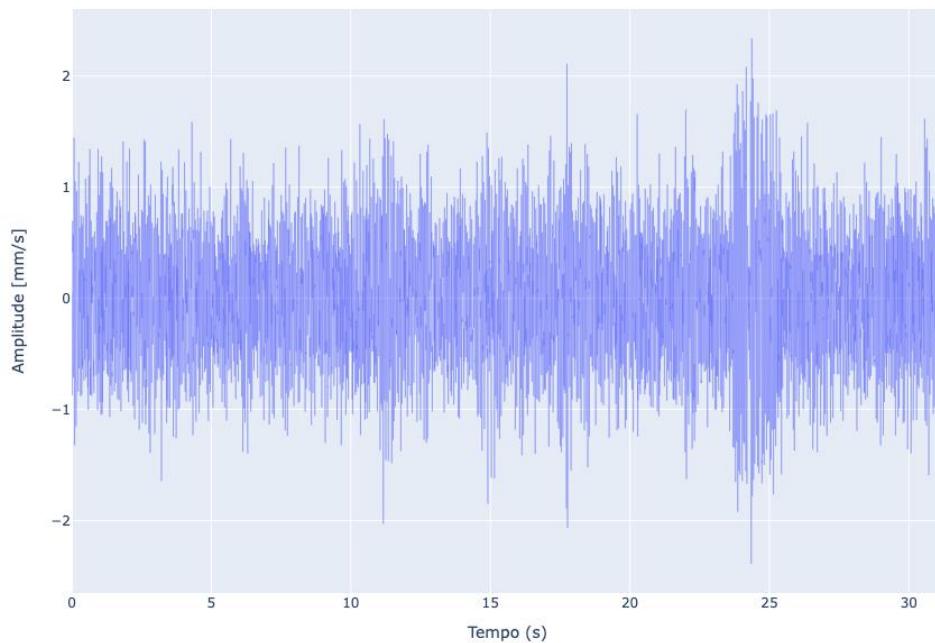
Sendo assim, foi utilizado o filtro “*butter*”, “*highpass*” de ordem 30 para frequências acima de 3hz. Obtendo o resultado da figura 27 e 28 para resposta em frequência e no tempo, respectivamente.

**Figura 27 – Resposta em frequência
fft - Velocidade**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

**Figura 28 – Resposta no tempo
Raw Signal Velocidade**



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A fim de melhorar visualização dos dados na plotagem do sinal no domínio da frequência é importante fazer um processo de decimação dos dados, diminuindo a taxa de amostragem e, desta forma, o número de amostras, porém mantendo a duração do sinal para isso utilizamos a função “*decimate*” da biblioteca “*scipy*”.

Figura 29 – Função *decimate*, biblioteca *scipy*

```

def decimate(x, q, n=None, ftype='iir', axis=-1, zero_phase=True):
    """
    Downsample the signal after applying an anti-aliasing filter.

    By default, an order 8 Chebyshev type I filter is used.
    A 30 point FIR filter with Hamming window is used if `ftype` is 'fir'.

    Parameters
    -----
    x : array_like
        The signal to be downsampled, as an N-dimensional array.
    q : int
        The downsampling factor. When using IIR downsampling,
        it is recommended to call `decimate` multiple times for downsampling
        factors higher than 13.
    n : int, optional
        The order of the filter (1 less than the length for
        'fir'). Defaults to 8 for 'iir' and 20 times the downsampling factor
        for 'fir'.
    ftype : str {'iir', 'fir'} or ``dlti`` instance, optional
        If 'iir' or 'fir', specifies the type of lowpass filter. If an instance
        of an `dlti` object, uses that object to filter before downampling.
    axis : int, optional
        The axis along which to decimate.
    zero_phase : bool, optional
        Prevent phase shift by filtering with 'filtfilt' instead of 'lfilter'
        when using an IIR filter, and shifting the outputs back by the filter's
        group delay when using an FIR filter. The default value of ``True`` is
        recommended, since a phase shift is generally not desired.

    .. versionadded:: 0.18.0

    Returns
    -----
    y : ndarray
        The down-sampled signal.
    
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Antes de aplicar esta função “*decimate*” é extremamente importante aplicar um filtro *anti-aliasing* no sinal. E como a própria norma DNV.GL. (2017) determina a avaliação em

faixas específicas de frequência, aplica-se um filtro passa banda na indicação de norma, desta forma para redimensionar o sinal utiliza-se a nova frequência de aquisição como sendo 2,5 vezes a frequência de corte do filtro passa banda. como ilustrado na figura 30, e obtendo um novo resultado em frequência ilustrado na figura 31, respectivamente.

Figura 30 –Exemplo dos parâmetros de entrada para aplicação da função

```

fs_novo = 500
delta_novo = 1/fs_novo
sample_novo = T/delta_novo
q = int(sample/sample_novo)

sos_x=signal.butter(30,[4,200], 'bandpass', analog=False, fs=fs,
output='sos')
# N (2**n), Wn(frequencia critica), btype=lowpass', 'highpas
s', 'bandpass', 'bandstop, analog=False, output='sos', fs=1/d
elta
lista_v_x = signal.sosfiltfilt(sos_x, lista_v_x)

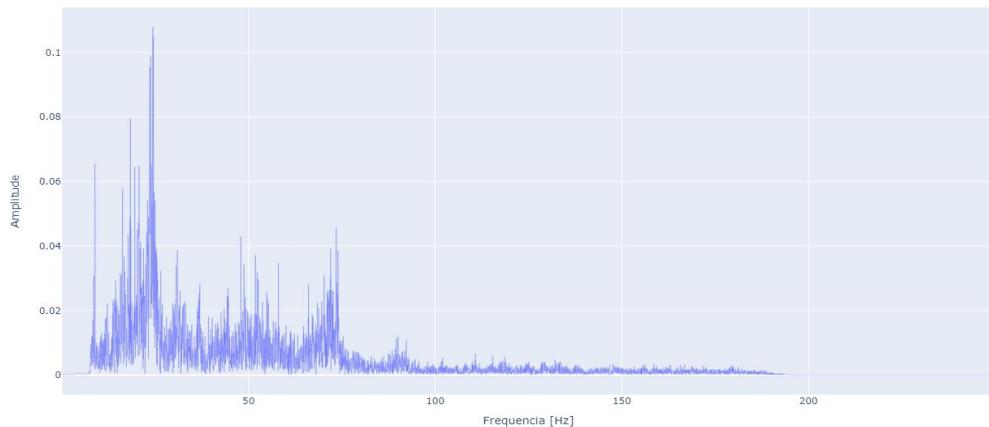
lista_v_x_decimate = signal.decimate(lista_v_x, q, n=None,
ftype='iir', axis=-1, zero_phase=True)
sample_time_novo = np.linspace(0, T, int(sample_novo))

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 31 – Novo resultado em frequência

fft - Velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

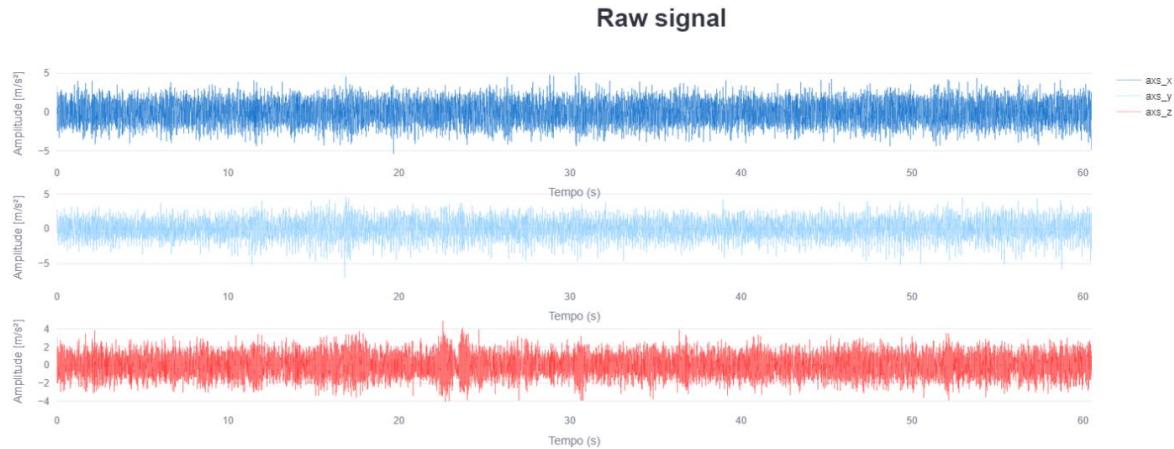
Após todo este processo de tratamento do sinal, é possível ingressar na fase final do *workflow* verificando os níveis de vibração e análise espectral, comparando os valores de rms globais obtidos com os valores de rms estipulados pela norma dnv.gl e desta maneira avançar para um possível diagnóstico seguido a elaboração de relatório.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Análise Azimuth Bow mancal LA

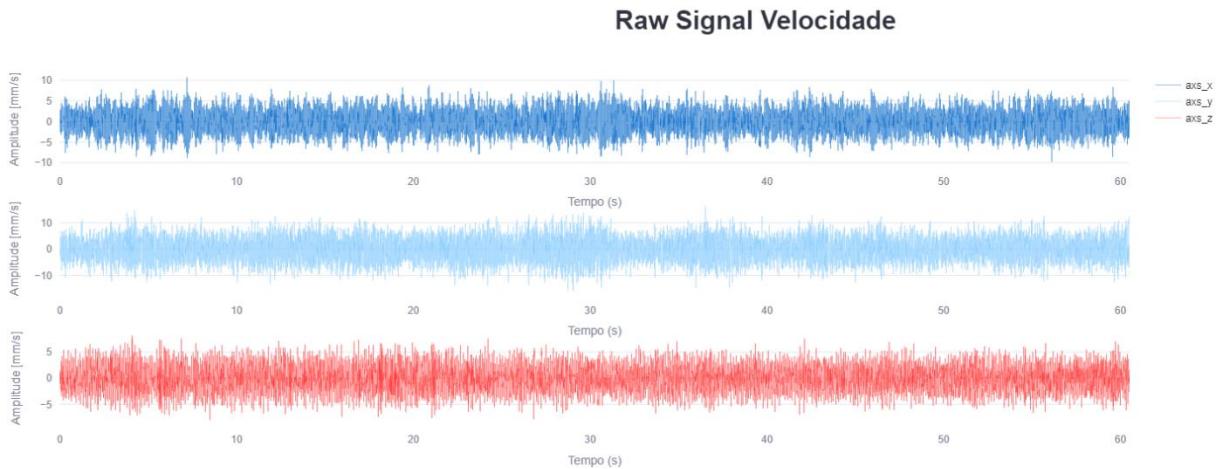
As figuras 32, 33, 34, 35 e 36 ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral, e rms respectivamente.

Figura 32 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



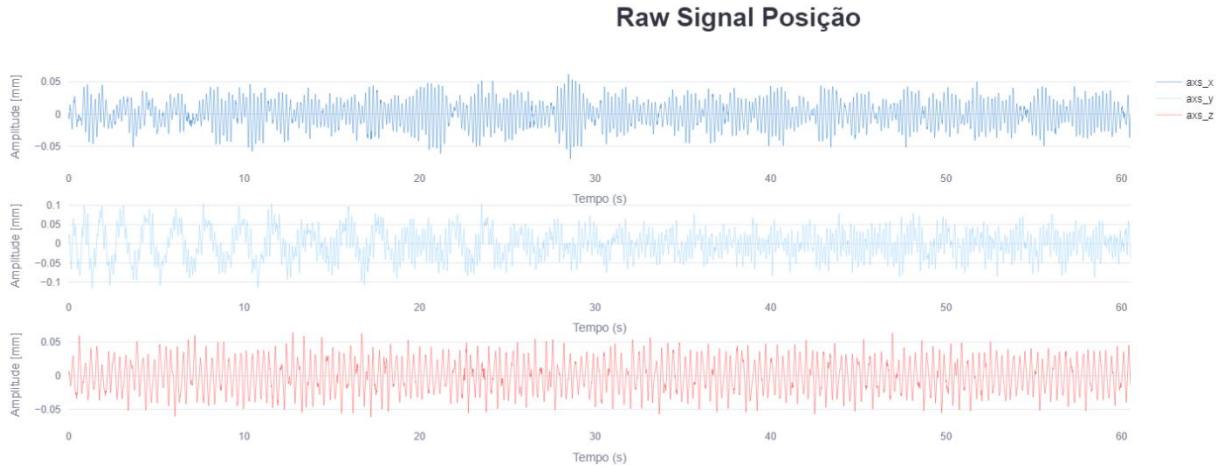
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 33 - Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



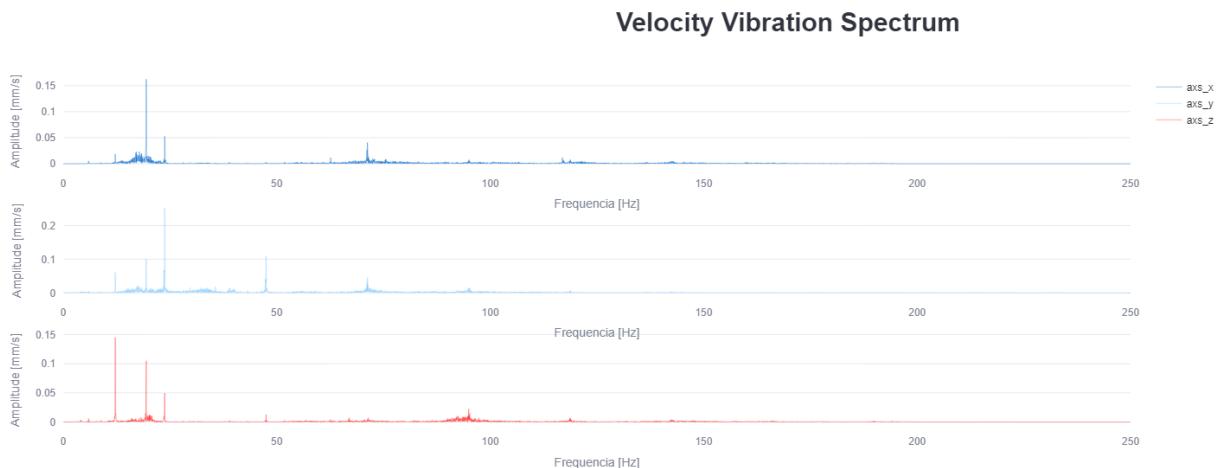
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 34 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 35 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 36 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
2.603 ↑ 18	4.2537 ↑ 18	2.2873 ↑ 18	1.8288221461427634 ↑ 18

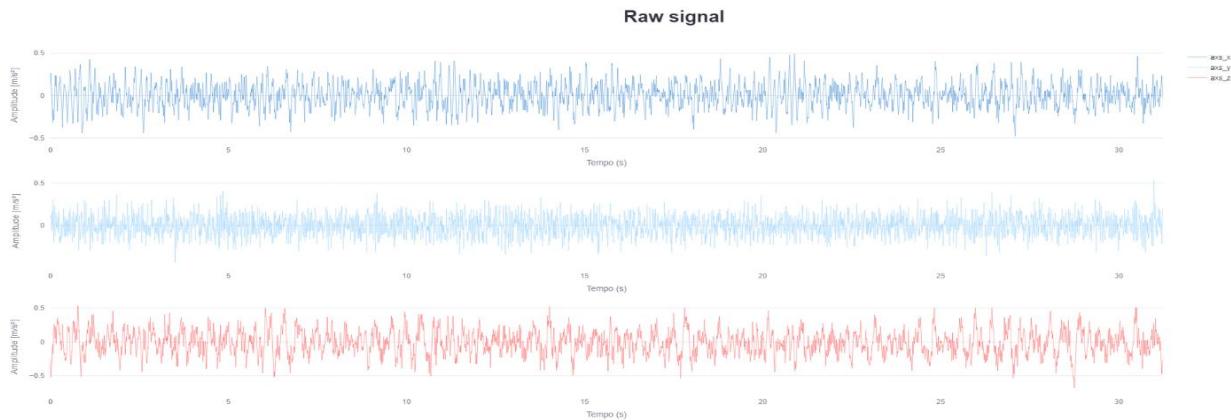
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comparando os valores de rms obtidos na figura 36 com a tabela 7 extraída da norma DNV.GL. foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão abaixo do mínimo determinado pela norma.

7.2 Compartimento 57

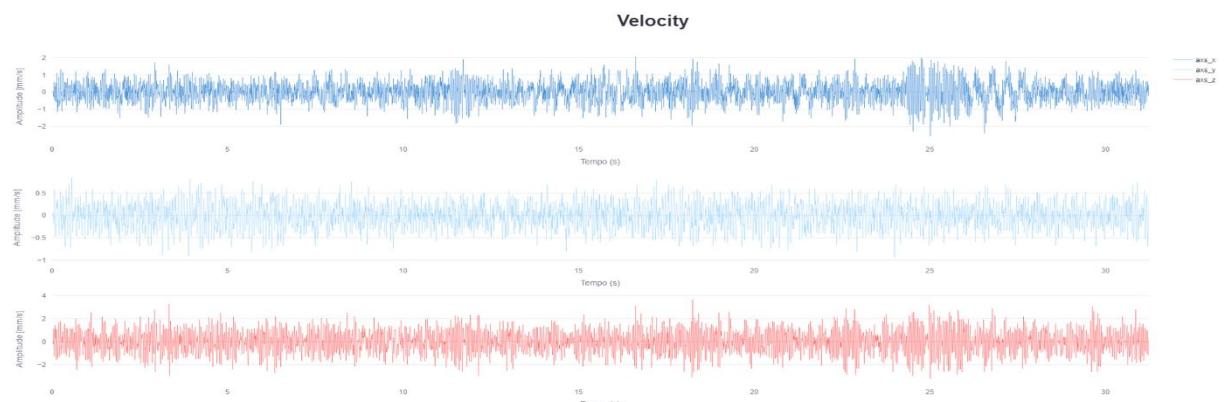
As figuras 37, 38, 39, 40 e 41 ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral, e rms respectivamente.

Figura 37 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 38 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 39 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 40 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 41 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
0.5685 ↑ 2	0.2655 ↑ 2	0.9652 ↑ 2	0.3837379806297232 ↑ 2

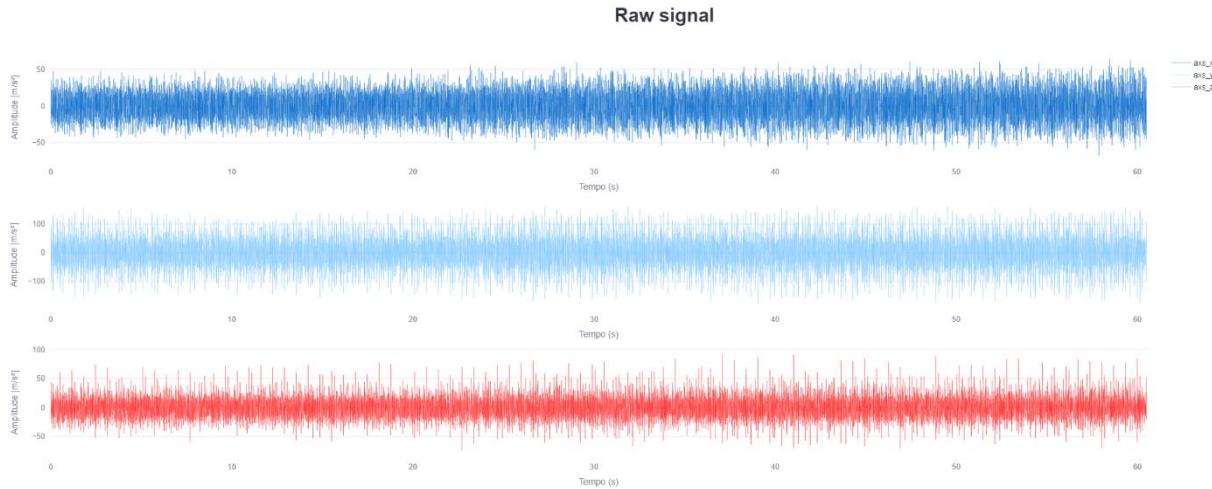
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para análise de estrutura foi seguida a orientação descrita no capítulo 2.1.5.2 da norma DNV.GL. na qual especifica a janela de frequência 1hz a 80 hz para análise espectral. Comparando os valores de rms obtidos na figura 41 com a tabela 18 extraída da norma DNV.GL. foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão abaixo do mínimo determinado pela norma.

7.3 Engine 01 Bottom

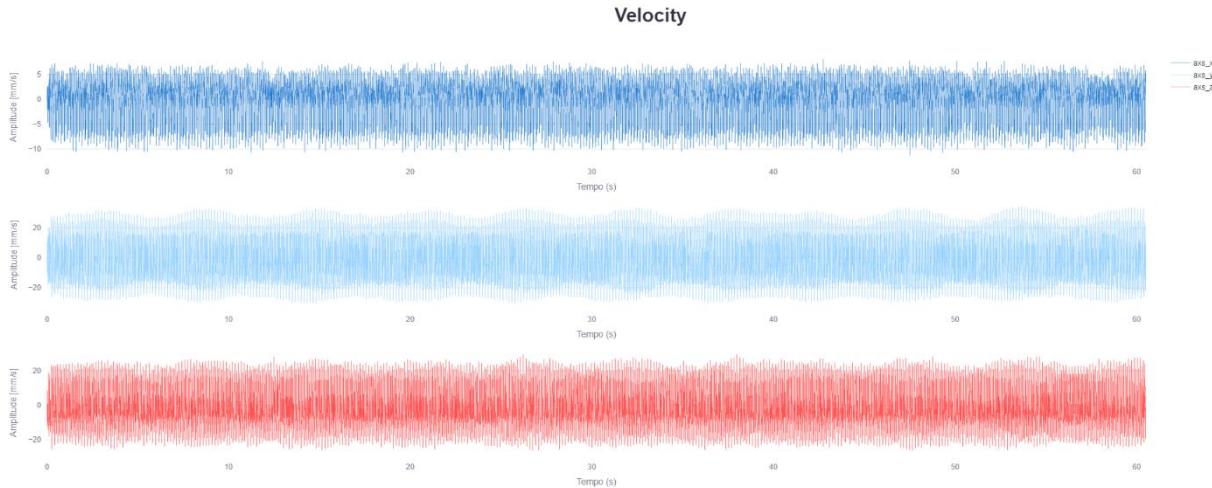
As figuras 42, 43, 44, 45, 46 e 47 ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral, e rms respectivamente.

Figura 42 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



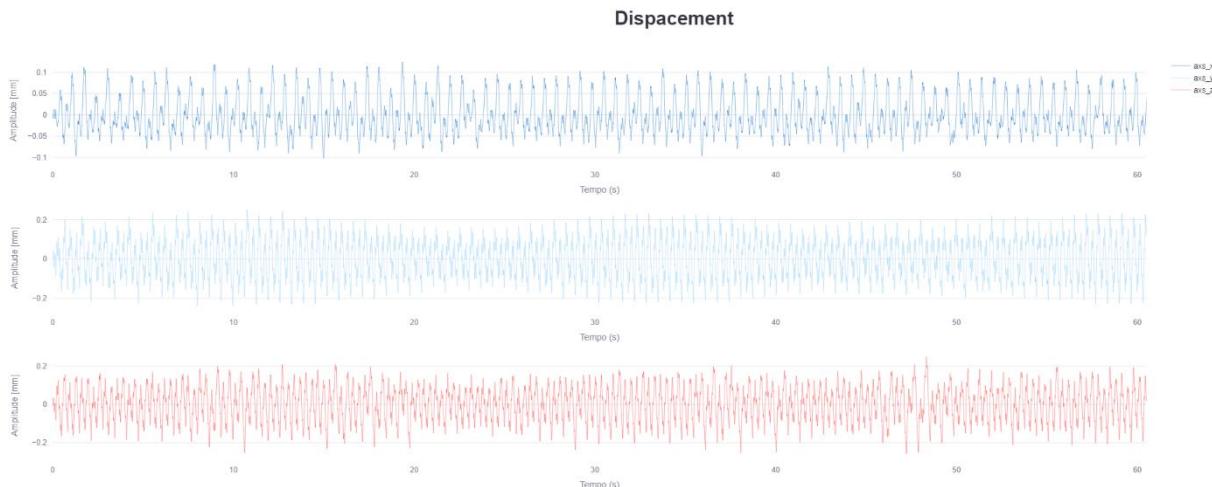
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 43 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



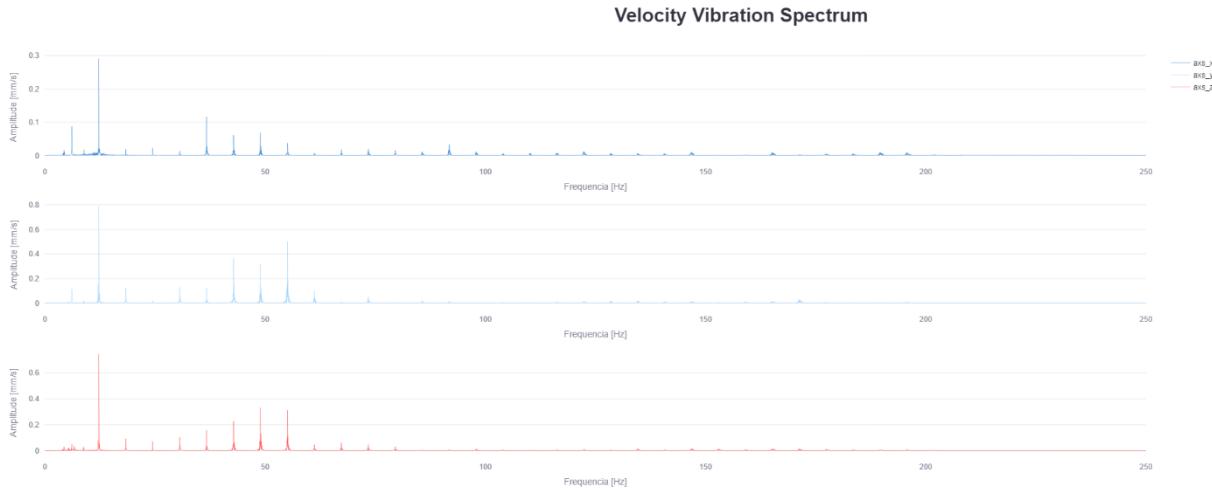
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 44 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



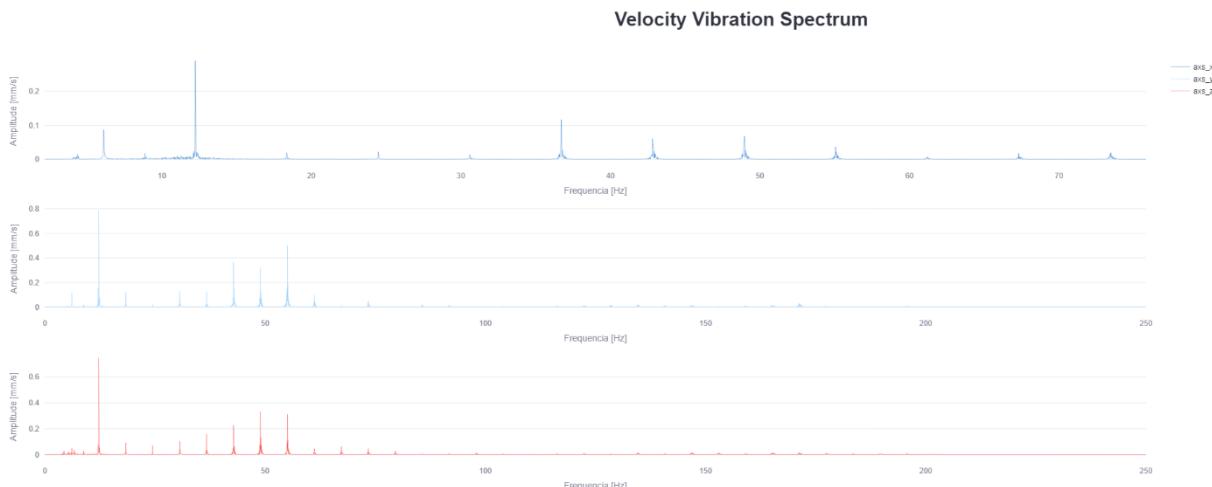
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 45 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 46 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 47 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
3.6322 ↑ 25	12.6905 ↑ 25	10.4929 ↑ 25	5.620820595488408 ↑ 25

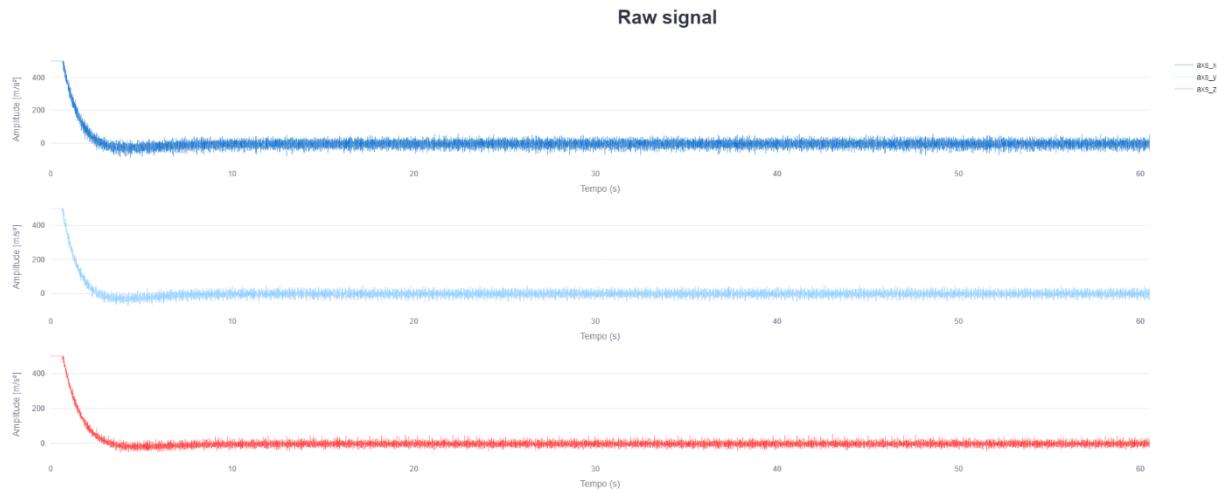
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comparando os valores de rms obtidos na figura 47 com a tabela 5 extraída da norma DNV.GL. foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão abaixo do mínimo determinado pela norma.

7.4 Engine 01 Top

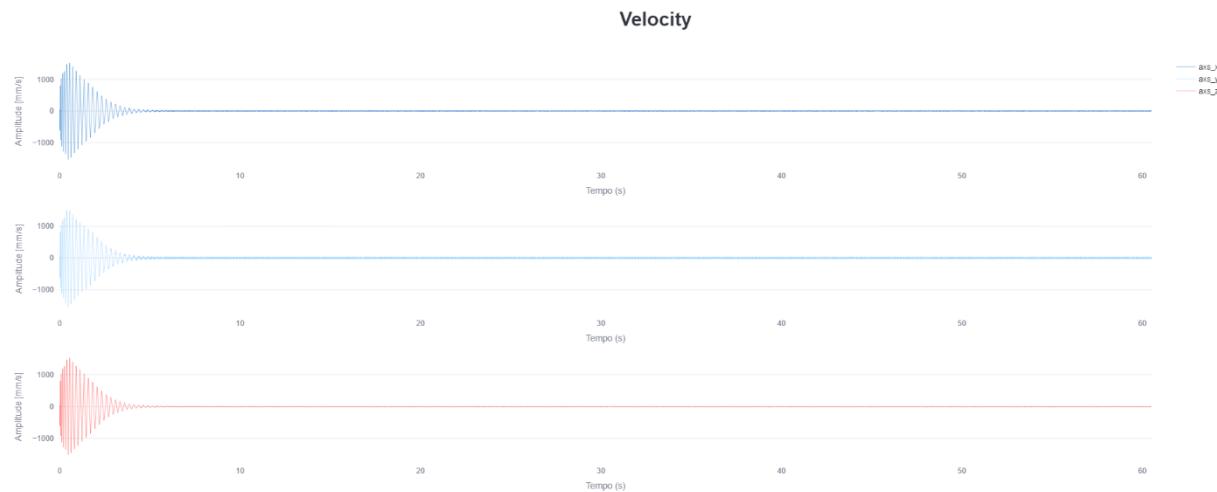
As figuras 48, 49, 50, 51, 52, 53 e 54 ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral, e rms respectivamente.

Figura 48 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



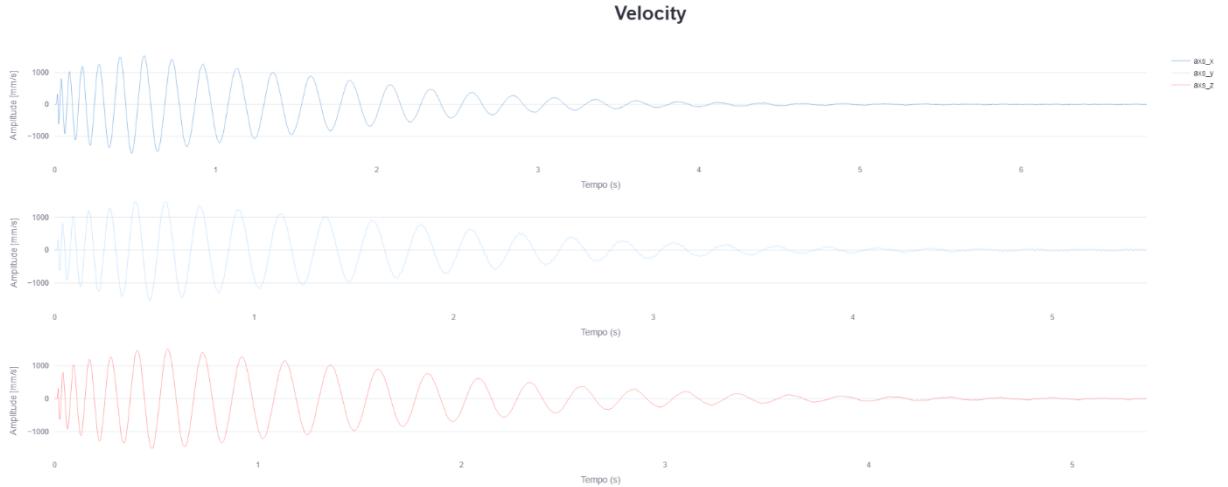
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 49 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 50 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



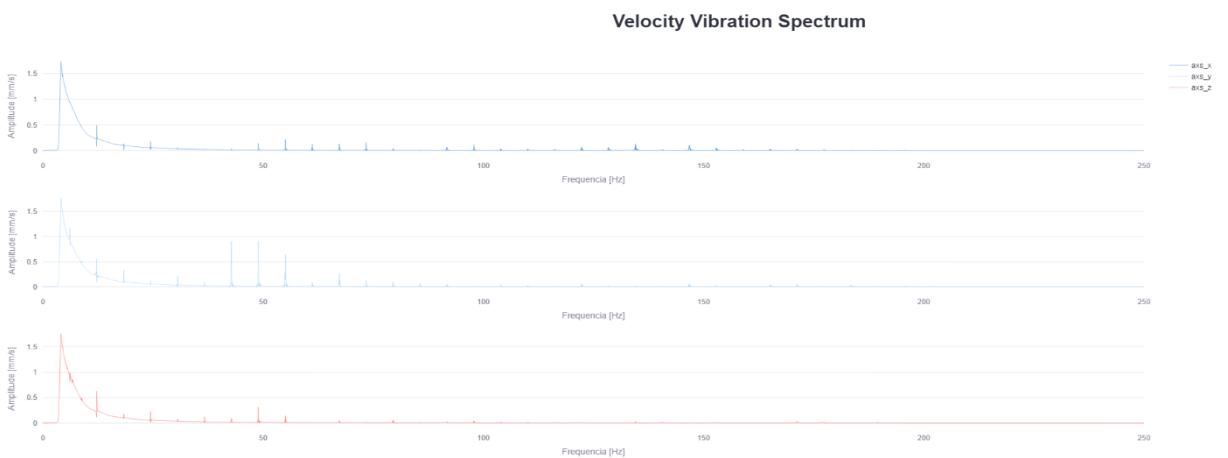
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 51 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



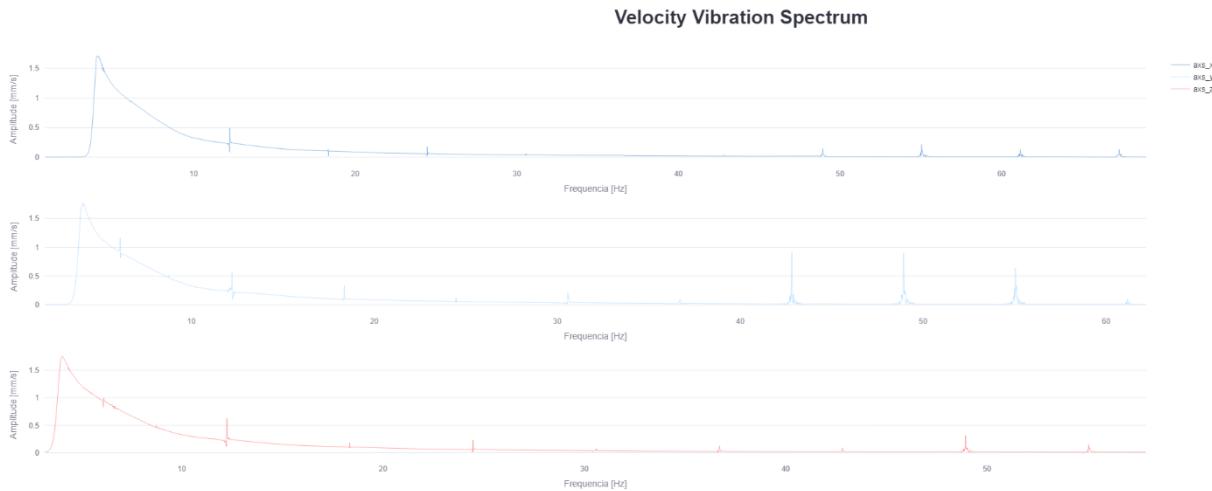
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 52 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 53 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 54 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

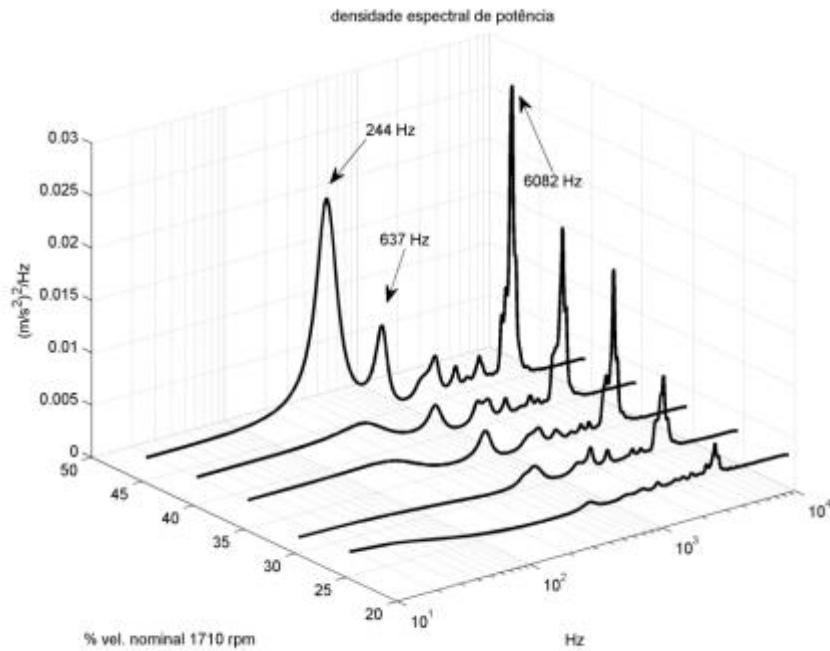
RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
152.1895 ▲ 25	151.9373 ▲ 25	153.056 ▲ 25	87.98530570343361 ▲ 25

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comparando os valores de rms obtidos na figura 54 com a tabela 5 extraída da norma DNV.GL. (2017), foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão bem acima do mínimo determinado pela norma.

É indicado inspecionar o equipamento tendo em vista que os valores superaram o estipulado pela norma, é interessante realizar outras medições no equipamento de diferentes faixas de rotação para realizar uma melhor diagnóstico, uma boa visualização e comparação para análise em diferentes faixa de rotação é um gráfico cascata (figura 55).

Figura 55 – Gráfico cascata

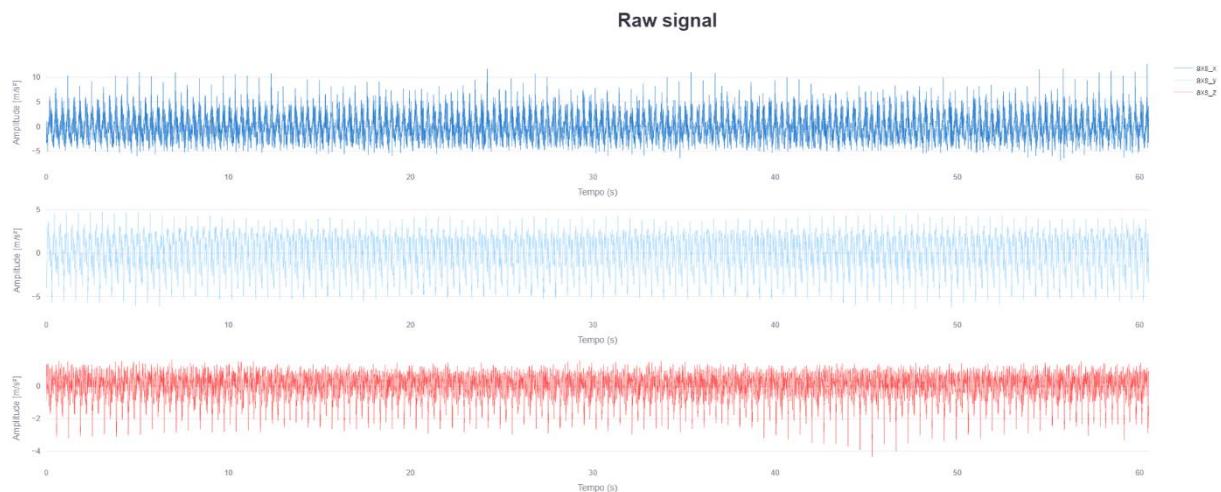


Fonte: Santos (2019)

7.5 Turbo Chasing

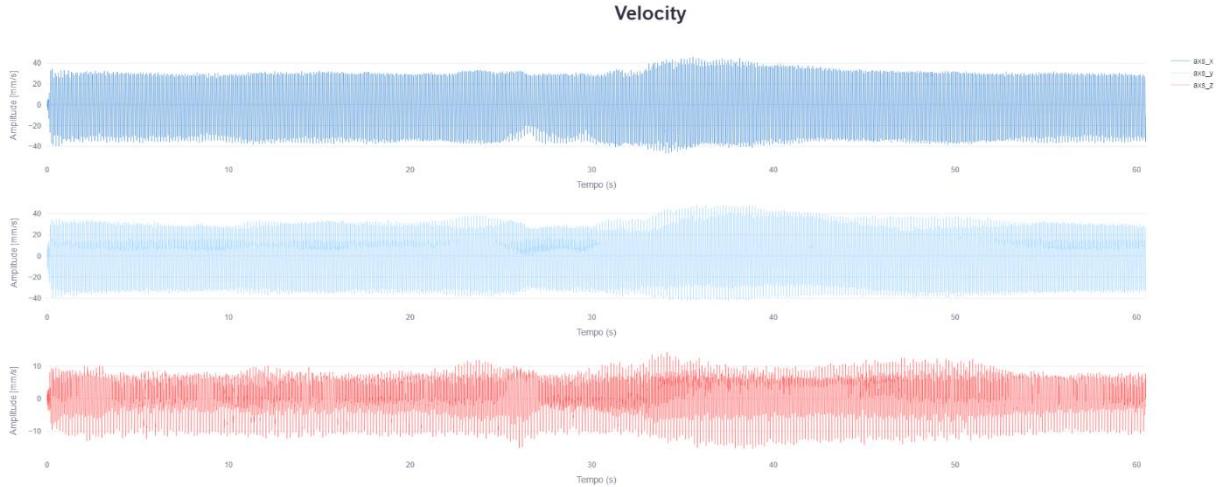
As figuras 56, 57, 58, 59, 60 e 61 abaixo ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral e rms respectivamente.

Figura 56 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



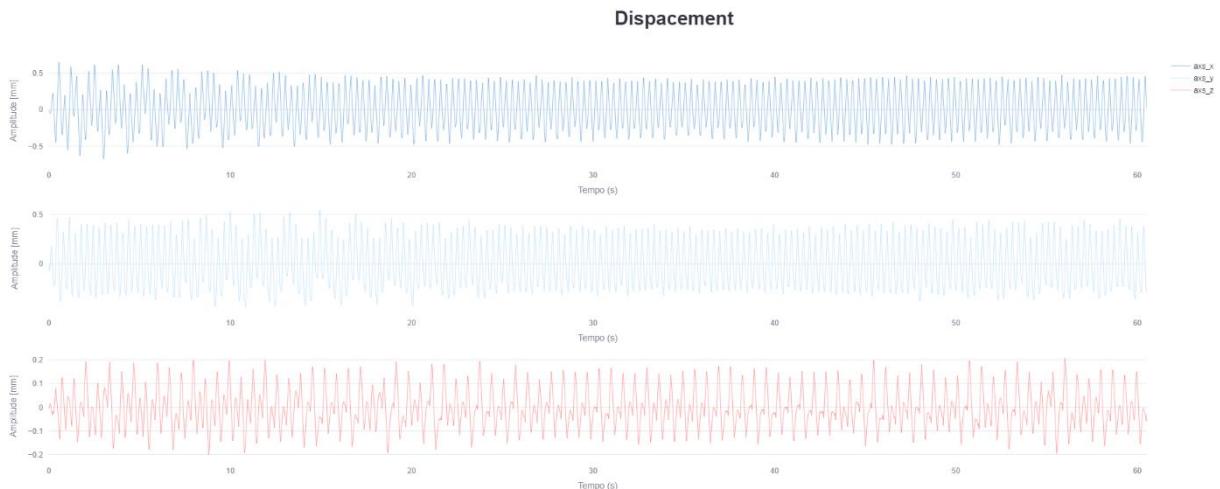
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 57 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



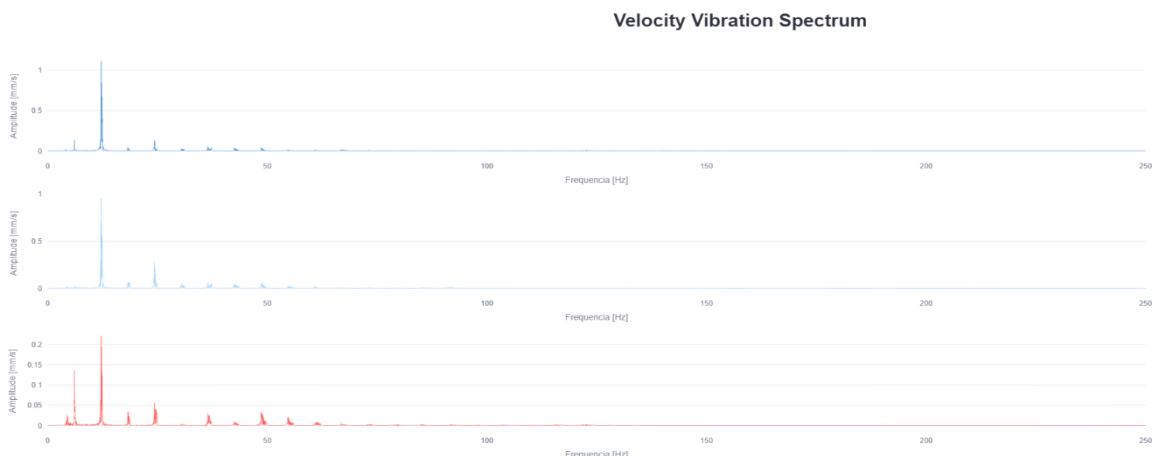
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 58 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



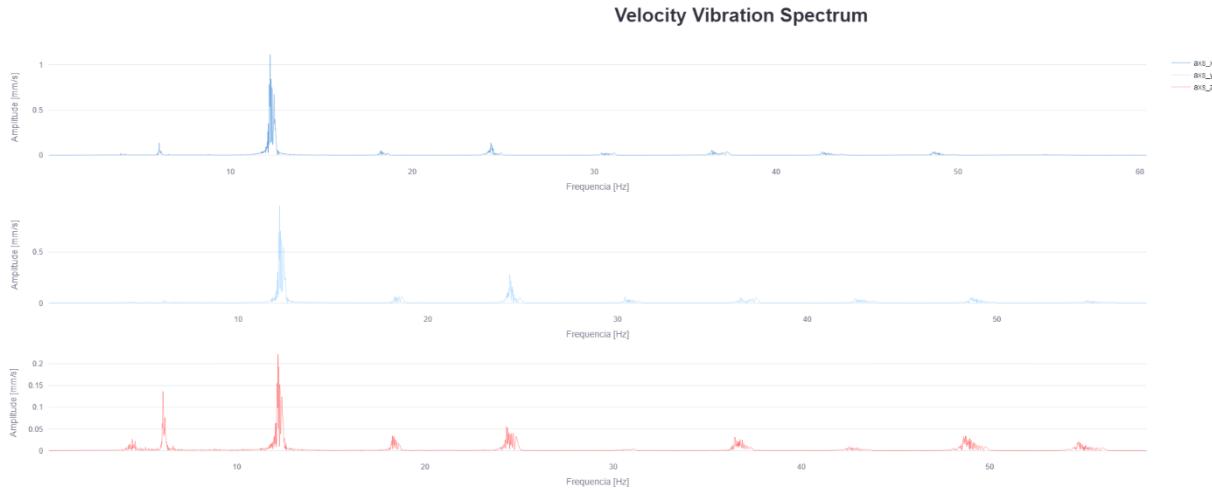
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 59 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 60 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 61 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
22.5728	19.9911	5.5657	10.22063487667093

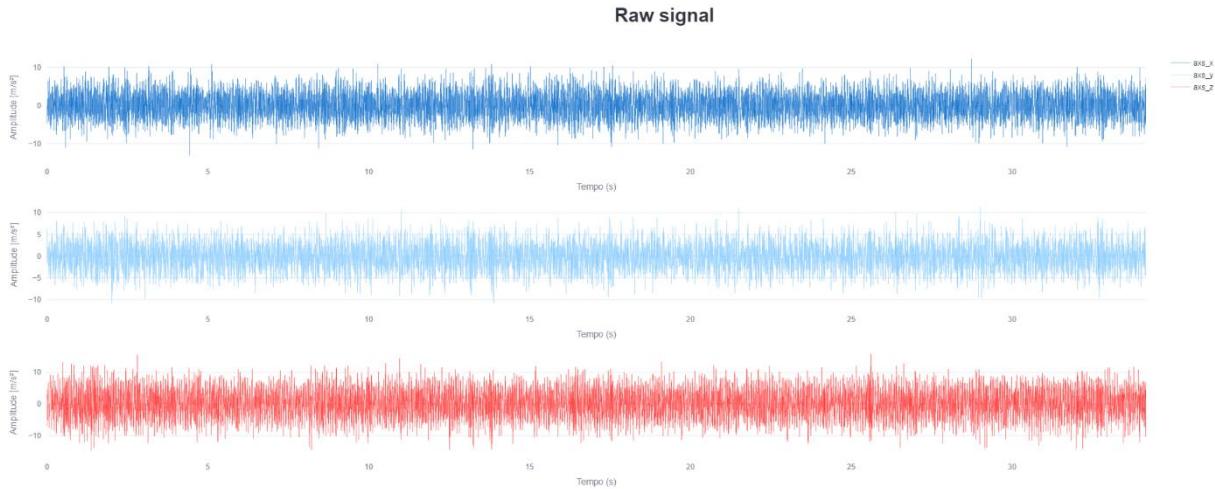
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Comparando os valores de rms obtidos na figura 61 com a tabela 6 extraída da norma DNV.GL. foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão abaixo do mínimo determinado pela norma.

7.6 Tween Deck

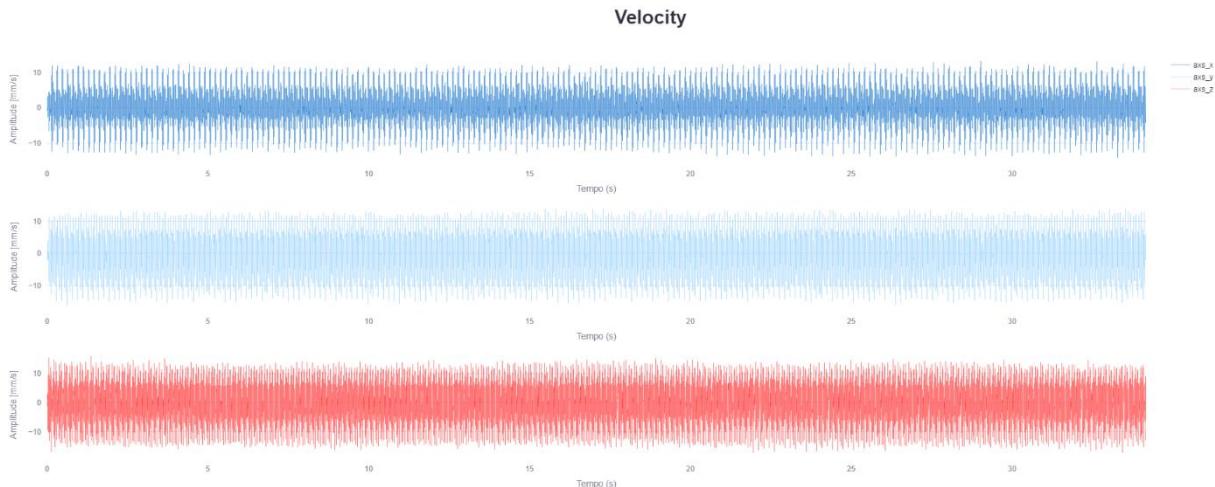
As figuras 62, 63, 64, 65, 66 e 67 ilustram os resultados obtidos após todo o tratamento dos dados, representando aceleração, velocidade, posição, análise espectral, e rms respectivamente.

Figura 62 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (aceleração)



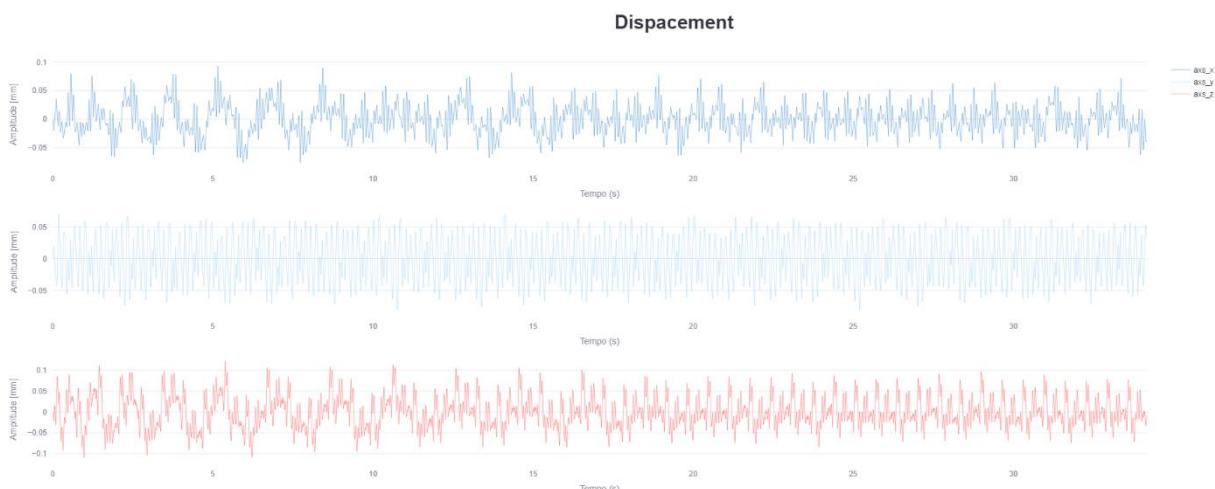
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 63 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (velocidade)



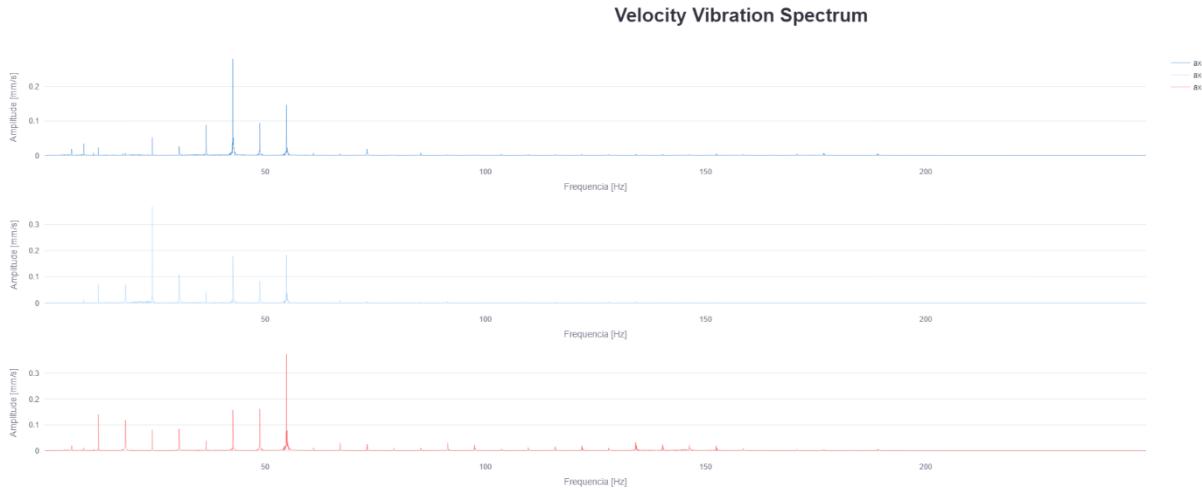
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 64 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (posição)



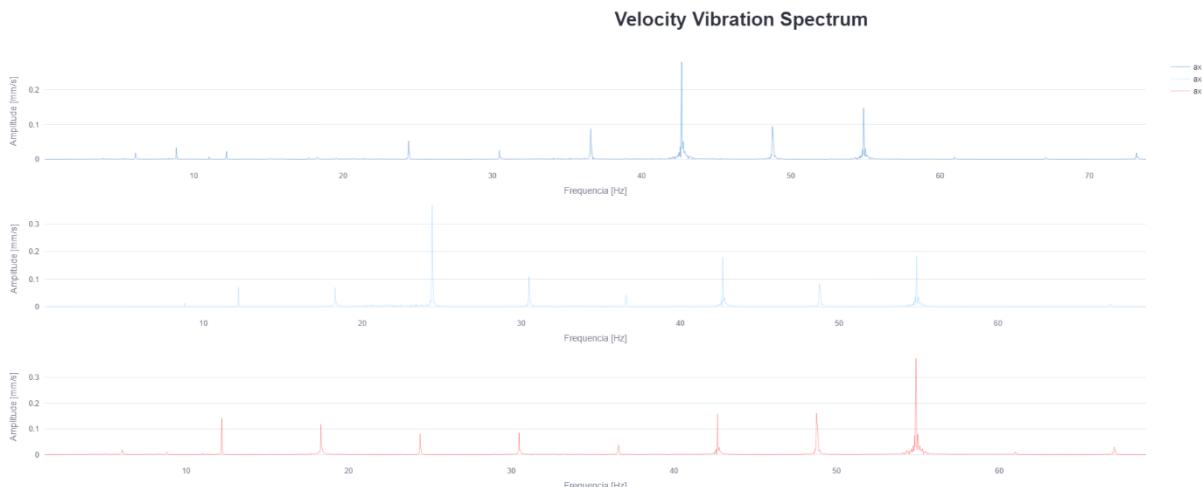
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 65 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 66 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (análise espectral)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 67 – Resultados obtidos após todo o tratamento dos dados (rms)

RMS Velocity X [mm/s]	RMS Velocity Y [mm/s]	RMS Velocity Z [mm/s]	RMS Velocity mean [mm/s]
4.7828 ↑ 45	6.3389 ↑ 45	7.1478 ↑ 45	3.561333612411071 ↑ 45

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

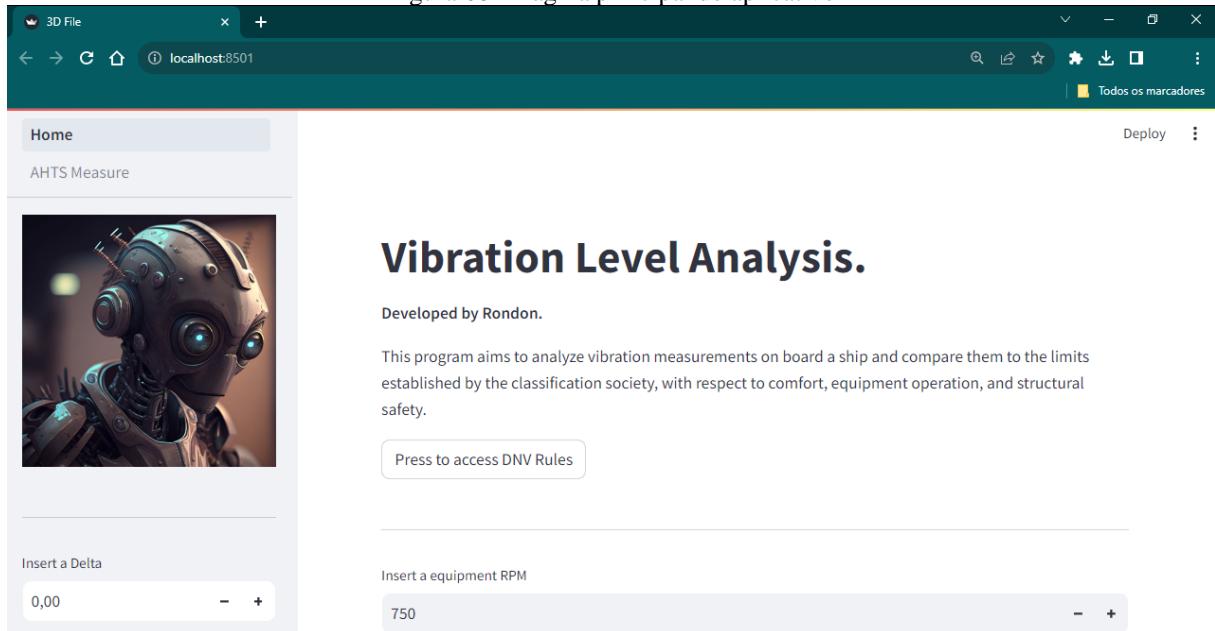
Comparando os valores de rms obtidos na figura 67 com a tabela 16 extraída da norma DNV.GL. foi observado que tanto os valores de rms para os eixos de aquisição quanto o valor médio de rms dos sinais estão abaixo do mínimo determinado pela norma.

7.7 Web app

Foi desenvolvido um web app para melhor visualização e interação com as análises dos dados. A aplicação permite, na sua página inicial (figura 68), que o usuário faça o upload de um arquivo “.csv” com as medições e possa desta maneira manipular os dados como bem entender.

No canto superior esquerdo é possível navegar entre páginas, onde na primeira página “Home” é dedicada a arquivos de medições para upload e na segunda página “AHTS Measure” é possível verificar os dados trabalhados neste trabalho.

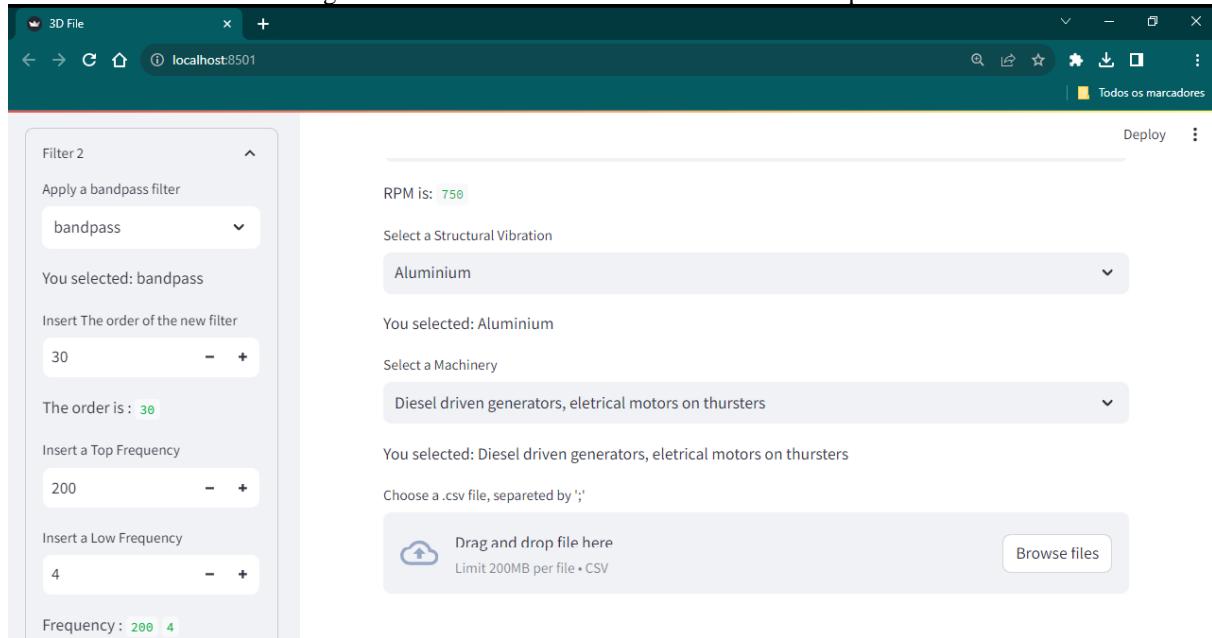
Figura 68 – Página principal do aplicativo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

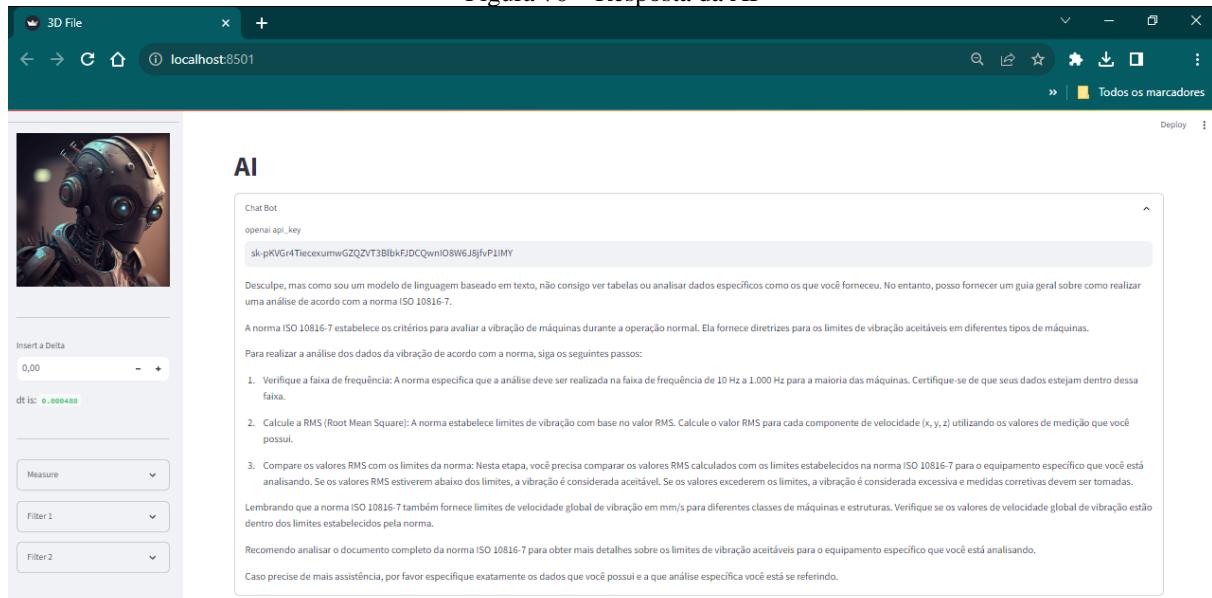
A aplicação permite a inserção de filtros e tratamentos dos dados em tempo real (figura 69), aplicação de filtros e preenchimento de formulário. É possível fazer o *download* dos gráficos gerados para possível formulação de relatório. Além disso, foi utilizado uma api com toaken da open.ai que permite, ao inserir os dados principais das medições no formulário, extrair os dados de rms e responder com base em alguma norma predisposta à inteligência artificial.

Figura 69 – Filtros e tratamentos dos dados em tempo real



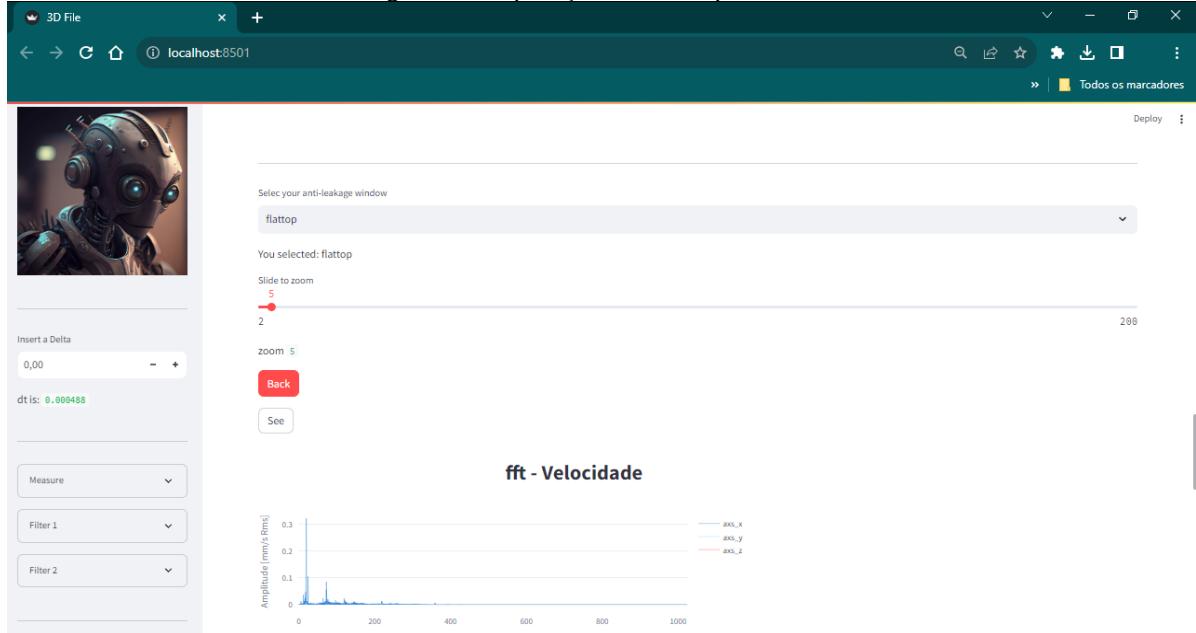
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 70 – Resposta da AI



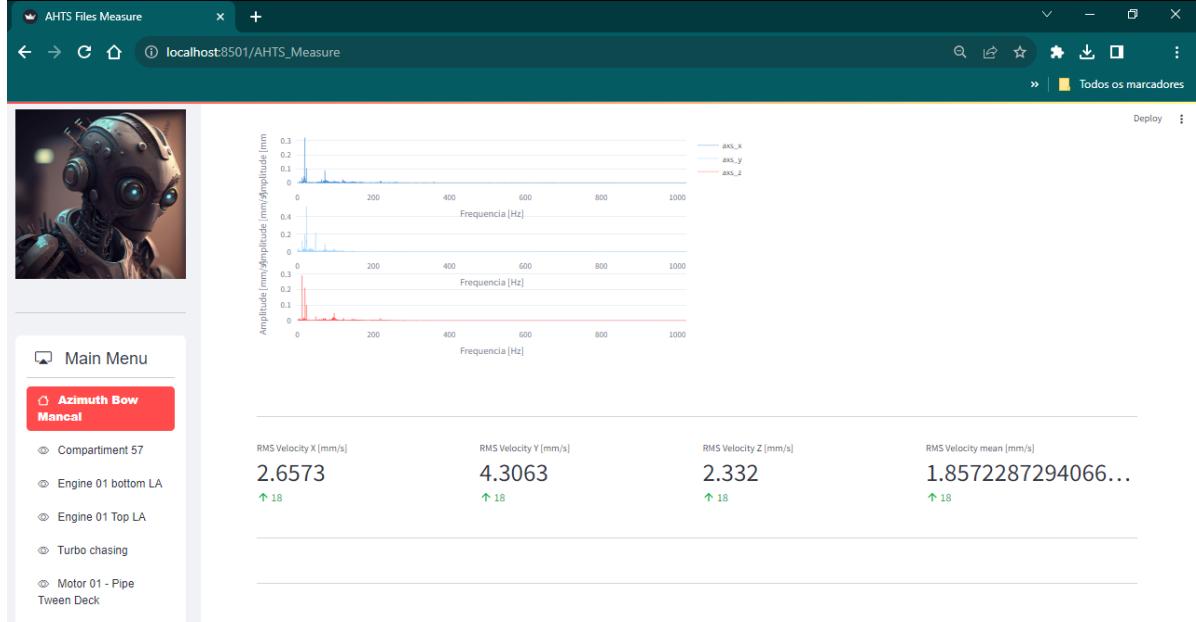
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 71 – Aplicação da “Flattop Window”



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 72 – Valores de RMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como é possível observar nas figuras 70, apesar de não ter fornecido uma resposta conclusiva, este modelo não tem o intuito de diagnosticar uma falha, mas sim automatizar um processo de verificação ou checagem em um documento disponibilizado ao modelo.

O projeto é interativo e prático, podendo ser baixado em um servidor interno ou externo. Além de poder ser gerenciado no *browser*, não tendo a necessidade de fazer instalação.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, com objetivo central em analisar o funcionamento de determinado equipamentos através de uma análise vibracional e comparar os resultados com a norma classificadora DNV.GL, foi possível visualizar a extrema profundidade do assunto associado a um elevado grau de complexidade dado as diferentes área de conhecimento necessárias para elaborar um relatório conclusivo e assertivo quanto ao diagnóstico do equipamento analisado.

Também foi possível observar a importância de um banco de dados qualificados para a análise, fiel ao cumprimento dos requisitos necessários para corroborar a um melhor diagnóstico. Além disso, o registro audiovisual das aquisições das medições agrega muito nas análises para que de fato possa trazer ainda mais subsídios para a fase de tratamento de dados e consequentemente um diagnóstico correto.

O trabalho constatou que seria possível um acompanhamento rotineiro dos parâmetros dos equipamentos vitais a bordo, prática esta que não é implementada pela Marinha do Brasil e poderia trazer uma vantagem econômica muito grande.

Dessa forma, a apresentação de diversas tecnologias de diagnóstico e o estudo de suas correlações, permitem organizar um processo estruturado de tomada de decisões para identificar defeitos, prever uma eventual indisponibilidade de um equipamento funcionar e definir as melhores linhas de ação.

Com a intenção de tornar mais viável este processo foi desenvolvido um *web app* utilizando a linguagem de programação *Python*, sendo este possível de ser utilizado em um computador comum a bordo, para tornar mais palpável uma possível implementação no futuro, com os profissionais a bordo tendo conhecimento de como fazer uma análise inicial sem precisar fazer toda a carga matemática por trás do aplicativo.

Segundo Pinto e Xavier (2001), a missão da manutenção é “garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados”.

É de grande valia entender que o processo evolutivo da tecnologia pode trazer imensos resultados ao dia a dia do trabalho, mesmo que isto custe um esforço intelectual para acompanhar este processo. Na Marinha do Brasil, espera-se de seus militares o máximo de preparo e dedicação nos aspectos tanto físico quanto intelectual e por isso seus meios navais são mantidos com a máxima excelência.

Como contribuição a aplicação desenvolvida será disponibilizada com o código fonte aberto para possíveis melhorias e contribuições futuras.

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a implementação de um modelo preditivo treinado utilizando técnicas de *machine learning* ao aplicativo de forma a identificar falhas como falhas em manuais, falhas em engrenagens e falhas combinadas.

Outra contribuição para o desenvolvimento do aplicativo seria a tentativa de otimizar o desempenho e a velocidade dos comandos, para assim melhorar a experiência do usuário. Além de outras páginas que possibilitem a análise de outros tipos de medição como como uni-axiais ou 2 medições uni-axiais para comparação ou medida de torção e flexão entre estas duas medidas.

REFERÊNCIAS

ANÁLISE de vibração em equipamentos rotativos. **Novise**, 2022. Disponível em: <<https://www.nosive.com.br/post/an%C3%A1lise-de-vibra%C3%A7%C3%A3o-em-equipamentos-rotativos>>. Acesso em: 08 de set. De 2023

BENTLY, J. L. **Machinery vibration analysis and diagnostics**. New York: Marcel Dekker, 2000.

BURDEN, Richard L., FAIRE, J. Douglas. **Numerical analysis**. New York: Marcel Dekker, 2002.

CLOUGH, Ray William, PENZIEN, Joseph. **Dynamics of Structures**. 3º ed. California: Computers and Structures, Inc., 2003.

DNV.GL. Rules for classification: Ships – Pt.6 Ch.8. 2017

FEYNMAN, Richard Phillips. **Lições de física de Feynman**. Porto Alegre : Bookman, 2008.

FILHO, Luis Felipe Salmão. **Manutenção por análise de vibrações: uma valiosa ferramenta para gestão de ativos**. Projeto de Graduação - Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

GALANTE, Alexandre. **A bordo do Rei dos Mares – Sua Majestade o AHTS**. Poder naval, 2012. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2012/09/29/a-bordo-do-rei-dos-mares-%e2%80%93-sua-majestade-o-ahts/>>.

GALLI, Vinícius Barcos. **Manutenção preditiva por análise de vibração mecânica em máquinas rotativas: estudo de caso**. 2017. 96 f. Trabalho de Graduação - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2017.

International Organization for Standardization. 2000. **Mechanical Vibration — Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships**. ISO Standard No. 6954:2000.

International Organization for Standardization. 2009. **Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts**. ISO Standard No. 10816-7:2009.

JUNIOR, Adyles Arato. **Manutenção preditiva monitorando severidade de vibrações**. Agosto de 2005. Apresentação de Powerpoint. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9755427-Manutencao-preditiva-monitorando-severidade-de-vibracoes-prof-dr-adyles-arato-jr-unesp-ilha-solteira.html>>. Acesso em: 10 de out. de 2023

JUSTO, Dagoberto Adriano Rizzotto (org.). **Cálculo numérico**. Rio Grande do Sul: UFRGS, 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/reamat/CalculoNumerico/livro-py/livro-py.pdf>>.

OLIVEIRA, Thiago de Souza. **Análise de ordem de uma bancada experimental aplicada ao estudo de rotores**. 2015. 43 f. Trabalho de Graduação - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2015.

PINTO, Alan K.; XAVIER, Júlio A. N. **Manutenção Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., 2001.

SHABANA, Ahmed A. **Theory of Vibration: An Introduction**. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.

SANTOS, Wallace Magela dos. Medição e análise de vibrações em sistemas rotativos. In: **19º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**, v. 7, 2019, Niterói. Anais. Niterói: Universidade Anhembi Morumbi, 2019.

SPAMER, Fernanda Rosa. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SKF Reliability Systems. **Vibration diagnostic guide**. San Diego: SKF Reliability Systems, 2000.

TRINTINALIA, Luiz C. Capítulo V - **Densidade espectral de potência**. 30 de abril de 2013. Apresentação de PowerPoint. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4544861/mod_resource/content/0/aula01trinti.pdf>. Acesso em:

VIEIRA, Bruno Augusto; MONTEIRO, Vera Lúcia; MOURA, Roque Antônio de.; SILVA, Messias Borges. **Análise vibracional como ferramenta de manutenção preditiva para máquinas rotativas**. Revista SODEBRAS, v. 16, n. 192, p. 142-152, 2021.