

MARINHA DO BRASIL  
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA  
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM  
PROPULSÃO NAVAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA A MARINHA DO BRASIL:  
emprego da técnica para prevenir falhas nas linhas de eixo e seus mancais

PRIMEIRO-TENENTE LUÍS PAULO DE SOUZA GOMES

Rio de Janeiro  
2020

PRIMEIRO-TENENTE LUÍS PAULO DE SOUZA GOMES

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA A MARINHA DO BRASIL:  
emprego da técnica para prevenir falhas nas linhas de eixo e seus mancais

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

Orientadores:

D. Sc. Fernando A.N. Castro Pinto

Capitão-Tenente (EN) César Augusto Bernardi Werle

CIAW  
Rio de Janeiro  
2020

## FOLHA DE APROVAÇÃO

PRIMEIRO-TENENTE LUÍS PAULO DE SOUZA GOMES

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA A MARINHA DO BRASIL:  
emprego da técnica para prevenir falhas nas linhas de eixo e seus mancais

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

Aprovada em \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

Fernando A.N. Castro Pinto, D. Sc. – UFRJ \_\_\_\_\_

Carlos Alfredo Órfão Martins, CC (EN – RM1) – CIAW \_\_\_\_\_

César Augusto Bernardi Werle, CT (EN) – DEN \_\_\_\_\_

Dedico esse trabalho àqueles que sempre torceram pelo meu sucesso e que através desse trabalho eu possa contribuir para o futuro da Marinha do Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me agraciado com saúde, força, perseverança e com familiares e pessoas que me apoiaram em momentos tão difíceis.

Agradeço a minha amada esposa, Thais Braz, pelo apoio e incentivo em todo o tempo de curso e peço-lhe desculpas pelos momentos ausentes em virtude da necessidade de dedicar-me às provas e a esse trabalho para conclusão do curso.

Agradeço à minha mãe, Ilza Aparecida de Souza Gomes, minha heroína que foi uma das maiores incentivadoras para essa minha profissão escolhida. Agradeço também ao meu falecido pai, Luís Carlos dos Santos Gomes, que aonde estiver tenho certeza que estará torcendo para o meu sucesso.

Agradeço também ao meu jovem irmão, Luís Fernando de Souza Gomes, por ser meu principal motivo de vencer e propiciá-lo tudo de melhor.

Agradeço a Marinha do Brasil, por me proporcionar a realização deste curso com profissionais tão capacitados que só me engrandeceu pessoalmente e profissionalmente.

Não poderia esquecer de agradecer ao professor Castro Pinto, meu orientador, por me mostrar os horizontes a serem tomados e, da melhor maneira possível, me ajudando a obter êxito neste trabalho. Agradeço também ao CC Carlos Martins, coordenador do curso, que foi crucial para a realização do trabalho em questão. Agradeço também à professora Denise, pela paciência e ensinamentos para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos colegas de faculdade e irmãos de arma, que se tornaram verdadeiros amigos, e trilharam por este longo tempo ao meu lado, não deixando desanimar e provocando inúmeras risadas.

A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO PARA A MARINHA DO BRASIL:  
emprego da técnica para prevenir falhas nas linhas de eixo e seus mancais

**Resumo**

Este trabalho tem por objetivo a revisão do estudo da vibração nas linhas de eixos propulsores e seus respectivos mancais, através da manutenção preditiva, tendo em vista o desgaste prematuro dos referidos equipamentos, uma vez que ocorrem vibrações excessivas. Desta forma, no âmbito dos navios de guerra, podemos restringir os desgastes, de forma a subsidiar a Marinha do Brasil, não apenas a possíveis indícios ou falhas no funcionamento, mas também a redução de custos de manutenção, uma vez que é possível prever quando é necessário a intervenção de manutenção, somando-se a isso o prolongamento da vida útil. Por este motivo torna-se necessário o conhecimento das características oriundas das causas e consequências das vibrações. Assim, será dada ênfase ao órgão responsável por esta técnica na MB e como otimizar o emprego dessa manutenção preditiva.

**Palavras- chave:** Análise; Vibração; Eixo; Mancais.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cinco grandes avanços para medição de vibração.....	10
Figura 2 – Acelerômetro do Iphone, medição a partir do aplicativo " <i>Vibration by Diffraction Limited Desing</i> " .....	12
Figura 3 – Propulsor modelado no software CFX.....	13
Figura 4 – Arranjo do Sistema Propulsivo .....	14
Figura 5 – Gráfico de medições de vibrações feitas pela CPN .....	15
Figura 6 – Acelerômetro, modelo 352c33, marca PCB .....	17
Figura 7 – Placa Conversora Analógico-Digital .....	18
Figura 8 – Tela do Software SAVERA .....	18
Figura 9 – Croqui do ponto de medição da linha de eixo .....	19
Figura 10 – Foto do ponto de instalação do acelerômetro .....	20
Figura 11 – Gráficos de Tendência da Linha de Eixo Propulsor .....	20
Figura 12 – Croqui dos pontos de medição dos mancais de sustentação e foto com as posições dos acelerômetros .....	21
Figura 13 – Croqui dos pontos de medição das Linhas de Eixo .....	22
Figura 14 – Foto do ponto de instalação do acelerômetro .....	22
Figura 15 – Gráfico de Tendências da Linha de Eixo de BB .....	22
Figura 16 – Gráfico de Tendências da Linha de Eixo de BE .....	23
Figura 17 – Organograma do C-EXP-CAnAV .....	26

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/D	Analógico-digital
BB	Bombordo
BE	Boreste
CETIM	Centro de Tecnologia Informação da Marinha
CMG	Capitão de Mar e Guerra
CPN	Centro de Projetos de Navios
DESSI	Indicador da Velocidade Efetiva do Eixo Desejada (“ <i>Desired Effective Shaft Speed Indicator</i> ”)
DGMM	Diretoria-Geral do Material da Marinha
DPCOMB	Depósito de Combustíveis da Marinha no Rio de Janeiro
FFT	Transformadas Rápida de Fourier (“ <i>Fast Fourier Transform</i> ”)
HD	Disco Rígido (“ <i>Hard Disk</i> ”)
MB	Marinha do Brasil
MCP	Motor de Combustão Interna
OM	Organização Militar
PC	Computador Pessoal (“ <i>Personal Computer</i> ”)
SAVERA	Sistema de Medição e Análise de Vibração de Equipamentos Rotativos e Alternativos



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Histórico das Medições de Vibração.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 As causas da vibração nos navios .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 As causas das vibrações nas linhas de eixo propulsores e seus respectivos mancais. 13</b>	
<b>3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NA MB .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Equipamentos Utilizados .....</b>	<b>16</b>
3.1.1 Acelerômetro .....	16
3.1.2 Placa analógico-digital .....	17
3.1.3 Software SAVERA .....	18
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Análise de Vibração de uma Fragata Classe Niterói .....</b>	<b>19</b>
4.1.1 Linha de Eixo Propulsor .....	19
4.1.2 Mancais de Sustentação .....	20
<b>4.2 Análise de Vibração de um Navio-Patrolha Classe Grajaú .....</b>	<b>21</b>
4.2.1 Linhas de Eixo Propulsor .....	21
<b>5 CONSEQUÊNCIAS PARA OS NAVIOS .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 Proposta de solução a curto prazo .....</b>	<b>25</b>
5.1.1 Lista de Equipamentos para a coleta de dados para a Análise de Vibração .....	25
<b>5.2 Proposta de solução a longo prazo.....</b>	<b>26</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>27</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O problema da manutenção nos navios de guerra da Marinha do Brasil (MB) é um fator importante quando são levados em consideração seus custos e tempo de execução e, principalmente, a disponibilidade de sobressalentes.

Os custos, o tempo de execução e a disponibilidade de sobressalentes estão interligados visto que a maioria dos navios que compõe a nossa Esquadra Brasileira são adquiridos de outros países. Assim, a aquisição de sobressalentes dos meios navais da MB depende de um conjunto de fatores, que são eles: disponibilidade do sobressalente no país de origem do meio, disponibilidade de recursos para a aquisição e tempo para importação do sobressalente.

Tais fatores, implicam na necessidade de realização da manutenção preditiva eficaz para os navios, avaliando em que tipo de máquina a combinação de técnicas, como análise de óleo lubrificante, monitoração de parâmetros operacionais (pressão, temperatura, etc.) e análises de vibrações podem ser efetivas, para determinarem as condições de funcionamento das máquinas.

As principais técnicas de manutenção preditiva são empregadas por alguma Organização Militar (OM) específica na MB. A análise de óleo lubrificante dos equipamentos de bordo é realizada pelo Depósito de Combustíveis da Marinha do Brasil no Rio de Janeiro (DPCOMB) e a análise de vibrações pelo Centro de Projetos de Navios (CPN).

Esta pesquisa tem o objetivo evidenciar a importância da análise de vibração para a manutenção preditiva dos equipamentos dos navios da MB, principalmente no que tange as linhas de eixo e seus respectivos mancais, para a redução dos custos de manutenção e o aumento da disponibilidade e confiabilidade de seus navios.

No entanto, a análise de vibração pelo CPN é realizada por uma quantidade de pessoal restrita, que por sua vez, implica que nem todos os navios empregam essa manutenção preditiva de forma efetiva.

Busca-se atingir ao final deste trabalho destacar a importância da qualificação do pessoal de bordo, para que estes profissionais procedam com a análise dos equipamentos, a fim de enviar os dados coletados para o CPN para que assim possa ser feita a análise especializada dos dados coletados e, conseqüentemente, a elaboração dos relatórios sobre o funcionamento dos equipamentos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

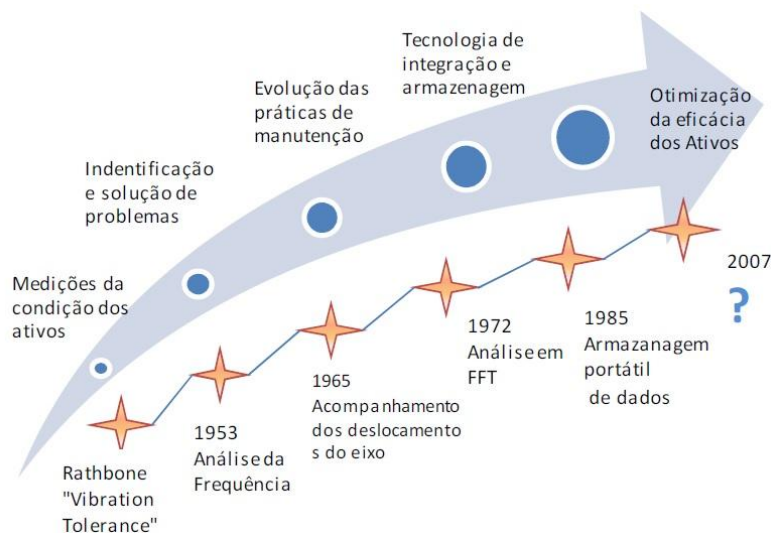
Esse trabalho utiliza autores, que através de estudos teóricos ou históricos, evidenciam o processo de evolução da análise de vibrações, assim, para começarmos o estudo sobre o monitoramento das vibrações é necessário primeiramente conhecer a evolução que ocorreu dessa prática para que seja possível compreender como ficou mais simples e rápido fazer esse monitoramento e avaliar seu resultado. Além disso, compreender as causas dessas perturbações nos navios que implicam no desgaste prematuro dos equipamentos, principalmente no que tange às linhas de eixo e seus respectivos mancais do sistema de propulsão dos navios.

### 2.1 Histórico das Medições de Vibração

O avanço no estudo de vibrações, ao longo dos anos, torna possível entender como esse método é capaz de influenciar a manutenção preditiva.

Um estudo com o título: "*From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance - Seventy Years Continuous Progress*" do especialista americano John S. Mitchell, com 35 anos de experiência e formado na *U.S. Naval Academy*, evidencia que os grandes avanços tecnológicos dos últimos 70 anos permitiram o grande avanço das análises de vibração e conseqüentemente da manutenção preditiva. Mitchell explica essa evolução dividindo-a em cinco grandes avanços, como evidenciado na Figura 1.

Figura 1 – Cinco grandes avanços para a medição de vibração



Fonte: JOHN (2007).

Como pode ser visualizado na figura, o primeiro passo teve sua origem através de um *paper* chamado "*Vibration Tolerance*". Este foi empregado, pelo T.C. Rathbone em 1939, para monitorar a condição de máquinas rotativas de aproximadamente 1Hz até 120Hz.

O segundo avanço deu-se a partir da análise da frequência de vibração, tornando possível a detecção da natureza de um defeito, porém as leituras dos equipamentos eram muito complexas demandando operadores com grande experiência.

Seguindo essa linha de avanço, o terceiro passo iniciou-se no final dos anos 60, para o monitoramento e proteção dos eixos rotativos dos equipamentos industriais, tendo em vista a apresentação de problemas relacionados aos seus eixos e mancais. A partir desse passo, foram lançadas uma série de especificações para os projetos de máquinas, como: margens de velocidade de rotação, níveis de vibração aceitáveis, parâmetros para balanceamento, entre outros.

Até aqui, as medições dos eixos e mancais forneciam grande quantidade de dados apenas no domínio do tempo, tornando possível identificar se uma vibração estava ou não acima do limite permitido, e demandavam de um compressor de tempo para a transformação dos dados coletados no domínio da frequência. Porém, o fato dessas máquinas serem grandes e pesadas impossibilitava o emprego em lugares confinados, por exemplo, a Praça de Máquinas dos navios.

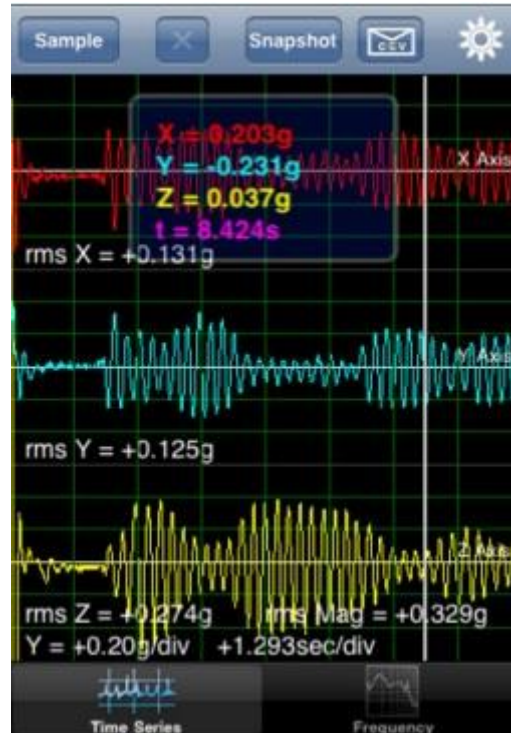
No entanto, posteriormente, o quarto passo deu-se com o emprego da *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier ou FFT) para a realização da análise em tempo real empregando equipamentos de tamanho e peso bem menores que realizavam a conversão do domínio do tempo para o domínio da frequência em um display integrado.

O início da era digital implicou no quinto e último passo, permitindo que a medição de vibração avançasse, pois com o surgimento do *Personal Computer* (Computador Pessoal ou PC) foi possibilitado a armazenagem dos dados e espectros gerados pelos conversores FFT no *Hard Disk* (Disco Rígido ou HD) dos computadores. Com a chegada desses meios, a atividade tornou-se mais simples, pois agora o operador só precisaria interpretar os resultados e transcrevê-los.

Apesar de sua grande abrangência, o estudo de John S. Mitchell limita-se aos avanços ocorridos até o ano de 2007, desde então diversos avanços ocorreram na última década no que tange às análises de vibrações. As novas tecnologias são cada vez mais práticas e completas, além disso, sua compactabilidade permite que dispositivos portáteis como um celular, possa realizar medições de aceleração com análise em tempo real e FFT por meio de

um aplicativo. A Figura 2 apresenta um exemplo de execução de um aplicativo de medição de vibração na tela de um celular "Iphone".

Figura 2 – Acelerômetro do Iphone, medição a partir do aplicativo "Vibration by Diffraction Limited Desing"



Fonte: FILHO (2013).

## 2.2 As causas das vibrações nos navios

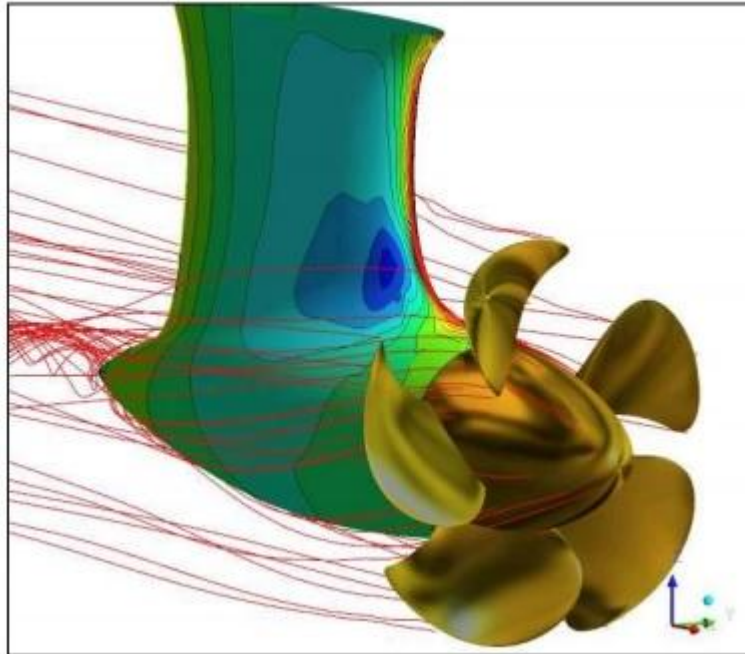
Ao longo dos anos, com a necessidade do aumento das dimensões dos navios e das potências dos sistemas de propulsão, houve um aumento nos problemas técnicos como os causados pela vibração. Os projetos dos cascos dos navios, tem como um dos principais objetivos, evitar a vibração elástica da estrutura pelas forças externas e internas. Essas vibrações podem causar além de danos aos equipamentos, desconforto aos tripulantes a bordo.

Pesquisas realizadas mostram que grande parte da ocorrência de problemas de vibração em navios se dá pela excitação produzida pelo sistema de propulsão e hélice, conforme evidenciado na Figura 3, que são transmitidos de duas formas à estrutura do navio: pelo eixo e pela pressão hidrodinâmica junto ao casco.

Outro equipamento que também gera vibrações indesejáveis são os motores de combustão interna (MCI), que com a explosão do gás no interior da câmara de combustão,

entre outras coisas, oferece ampla possibilidade de excitação da estrutura do motor, da linha de eixos e seus mancais e até mesmo de toda a estrutura.

Figura 3 - Propulsor modelado no software CFX



Fonte: SOUZA (2015).

### **2.3 As causas das vibrações nas linhas de eixo propulsores e seus respectivos mancais**

Com a evolução nos projetos dos navios, os problemas de vibrações induzidas pelos hélices têm sido mais complexos e frequentes. Podendo ser justificado pelos seguintes aspectos: localização das praças de máquinas, emprego de compartimentos adjacentes ao propulsor para outros fins e aumento da potência dos navios.

Para que possa ocorrer este acréscimo de potência das plantas propulsoras faz-se necessário o aumento da rigidez das linhas de eixos. Além disso, como o aumento dos motores Diesel, o eixo propulsor e seus mancais são os primeiros a sofrer os danos causados pelas vibrações recorrentes das explosões da combustão dos motores.

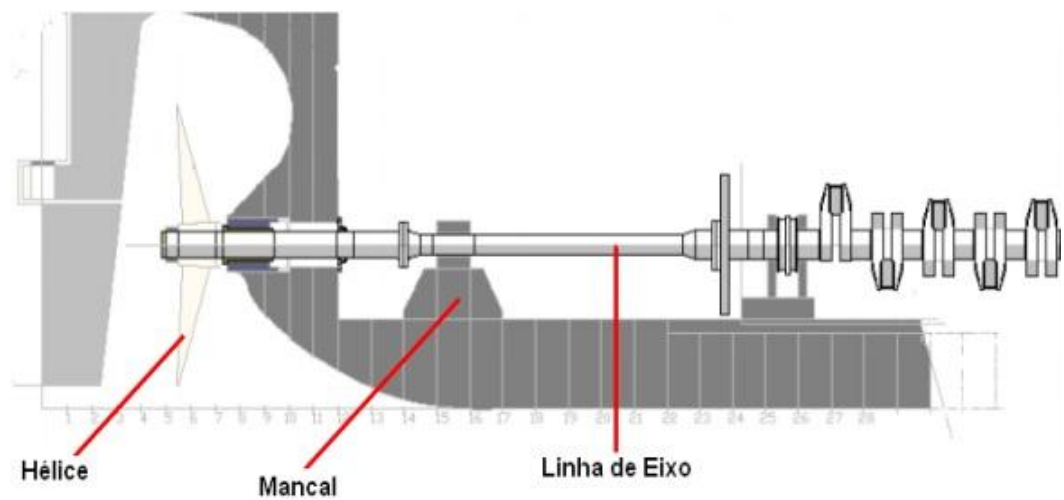
Assim, podemos mencionar algumas consequências dessas vibrações nas linhas de eixo propulsor, são elas:

- Desgaste ou aparecimento de fraturas nas buchas do tubo telescópico;
- Deterioração das linhas de eixos propulsores;

- Desgaste ou arrastamento do metal patente das buchas do tubo telescópico com o consequente vazamento pelos selos de ré (tipo Simplex).

Após diversos estudos, o problema de vibração nos eixos propulsores permanece presente nos arranjos do sistema propulsivo, ilustrado na Figura 4, ainda que o atual procedimento de alinhamento e montagem dos eixos, seus mancais e o tubo telescópico sejam baseados na distribuição de carga sobre os mancais de sustentação, buchas de tubos telescópicos e buchas de pés de galinha.

Figura 4 – Arranjo do Sistema Propulsivo



Fonte: JORDANI (2014).

### 3. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NA MB

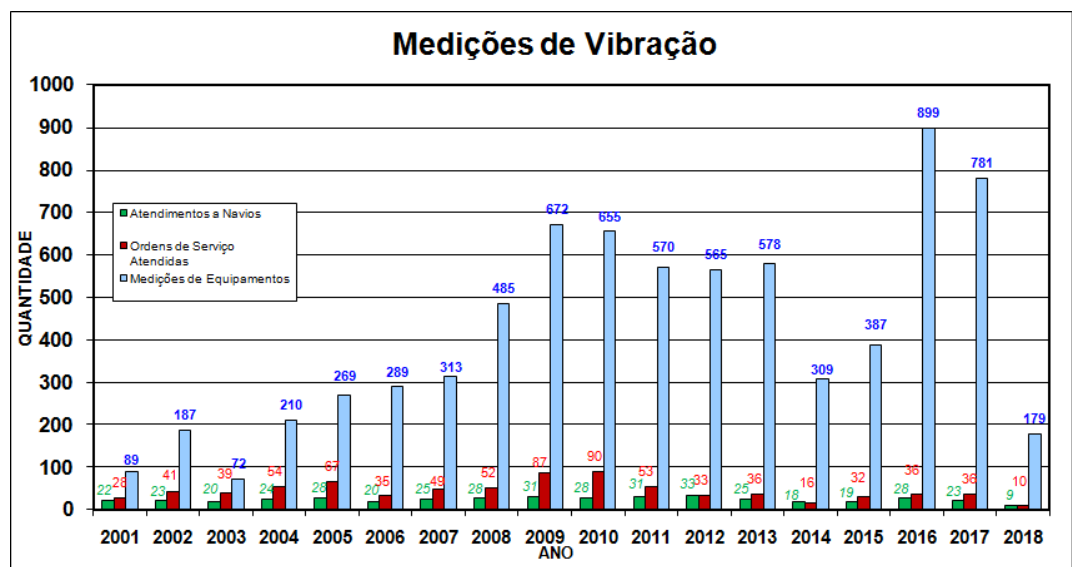
Em 23 de dezembro de 1996 o Ministério da Marinha (MM), criou a CPN, uma OM com autonomia administrativa diretamente subordinada à Diretoria-Geral de Material da Marinha (DGMM) e sob direção de um Capitão-de-Mar-e-Guerra (CMG) do Corpo de Engenheiros da Marinha. Foi ativado em 29 de agosto de 1997 pelo DGMM, como Organização Militar Prestadora de Serviço (OMPS).

As análises de vibração, que é uma das manutenções preditivas, são realizadas nos navios da Esquadra por equipes especializadas do CPN. Esta manutenção tem como objetivo identificar falhas mecânicas nos equipamentos, para que sejam corrigidas e não causem danos futuros aos equipamentos restringindo a capacidade operativa dos navios.

Os principais equipamentos que recebem este tipo de monitoramento são: Diesel Geradores e Turbo Geradores, Motores de Combustão Principais (MCP), Motores de Combustão Auxiliares (MCA), Turbinas a Vapor e a Gás, Linhas de Eixo, Redutoras, Bombas, Compressores, dentre outros.

A figura a seguir representa o gráfico de quantos monitoramentos foram realizados ao longo dos anos. Vemos que em 2016 foi o ano de maior número de monitoramento feito pela CPN.

Figura 5 - Gráfico de medições de vibrações feitas pela CPN



Fonte: <https://www.marinha.mil.br/cpn/content/descricao-e-graficos>



Após a análise de vibração, a equipe da CPN produz um relatório completo e detalhado para os navios, que será abordado no capítulo 4, relatando as medidas necessárias que devem ser tomadas pela tripulação para a resolução dos problemas captados no monitoramento de vibração.

A cada ano as avaliações são facilitadas em virtude do amplo conhecimento pela equipe no que diz respeito aos equipamentos e retorno dos mesmos às vibrações. Porém, é imprescindível que os equipamentos de medida estejam em perfeito estado de conservação para que a medição seja mais precisa possível.

### **3.1 Equipamentos utilizados**

#### *3.1.1 Acelerômetro*

O acelerômetro é basicamente um mecanismo com a capacidade de medir a aceleração de objetos, podendo ser destacado os seguintes tipos: piezoelétrico, piezoresistivo e capacitivo.

O tipo de acelerômetro mais encontrado é o piezoelétrico, que contém um ou mais cristais pré-tencionados por uma mola de compressão acoplada a uma massa. Esses itens unidos formam um oscilador cuja frequência de ressonância é determinada.

Seu funcionamento se dá pela vibração da máquina à qual está fixado, provocando uma excitação onde a massa exerce uma força variável nos cristais piezoelétricos e o pulso gerado é proporcional à aceleração.

O acelerômetro piezoelétrico possui seu próprio sinal. Porém, devido a sua alta impedância, não é compatível com os equipamentos de indicação em painéis, equipamentos de análise e monitoração. Devido a esse problema, são utilizados equipamentos eletrônicos para converter a impedância para baixa.

Na Tabela 1 serão apresentadas as vantagens e desvantagens do emprego do Acelerômetro Piezoelétrico.

Tabela 1 – Vantagens e Desvantagens do uso do Acelerômetro Piezoelétrico

<b>ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
ampla faixa de reposta de frequência boa resistência a temperaturas peso e dimensões reduzidas preço relativamente baixo	peça bastante sensível frequência exige a instalação de filtro passa-baixa ressonância pode ser excitada no sensor

Fonte: Autor.

Na MB, o acelerômetro utilizado é o piezoelétrico modelo 352c33, como o da Figura 6, que decodifica uma informação mecânica, a vibração, em uma informação elétrica e em cada análise feita pelo CPN são utilizados três unidades de acelerômetros, para ser feito assim a leitura dos dados em três dimensões possíveis. A partir dessas leituras se obtêm um resultado para cada uma e desses resultados ocorre uma compilação de dados gerando um relatório final do equipamento monitorado.

Figura 6 – Acelerômetro, modelo 352c33, marca PCB



Fonte: <https://www.pcb.com/products?m=352C33>

O acelerômetro modelo 352c33 possui um cristal piezoelétrico que capta as forças mecânicas do equipamento, gerando um diferencial de potencial elétrico. Caso tenham deformações, estas irão gerar tensões diferentes que serão levadas ao amplificador que por sua vez leva a informação para a placa de conversão analógico-digital.

### 3.1.2 Placa analógico-digital

Como já citado, as informações coletadas pelo acelerômetro são conduzidas através do amplificador para a placa de conversão analógico-digital. Esta placa apresenta digitalmente uma grandeza analógica, que neste caso trata-se de um nível de tensão.

O modelo utilizado pela MB é o NI 9233, apresentado na Figura 7, que tem a capacidade de receber até quatro entradas de tensão. Além disso, ela tem uma probabilidade maior de acerto em sua leitura. Por outro lado, ao apresentar alguma disfunção, se torna mais provável o acerto do tipo de avaria que tal equipamento possui.

Figura 7 - Placa Conversora Analógico-Digital



Fonte: [https://www.ni.com/pdf/manuals/374223a\\_02.pdf](https://www.ni.com/pdf/manuals/374223a_02.pdf)

Cada sinal de entrada recebe uma corrente de excitação fornecida pelo NI 9233. O sinal é AC-acoplado (corrente alternada acoplado), armazenado e condicionado, mostrado por um Conversor Analógico-Digital (ADC) de 24 bits.

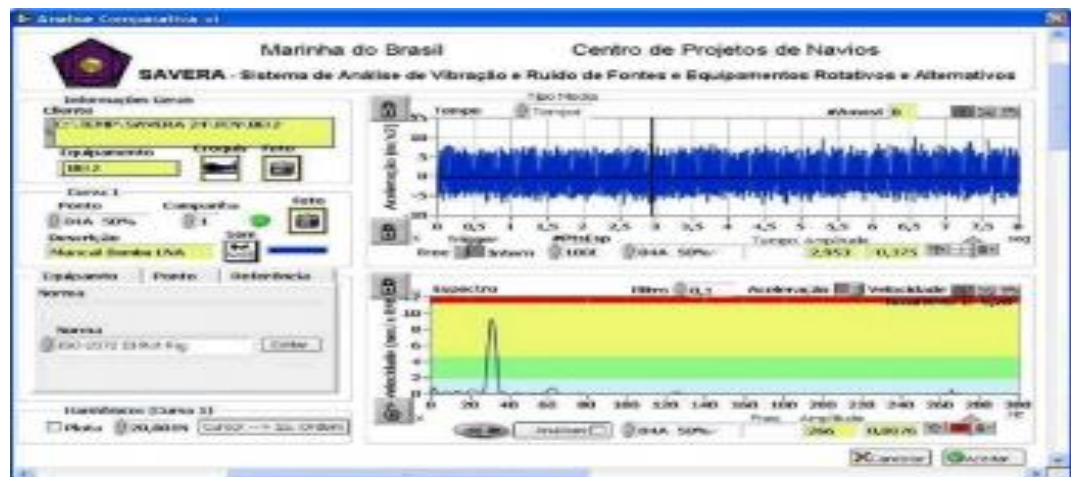
O sinal recebido é digitalizado e encaminhado ao software chamado Sistema de Medição e Análise de Vibração de Equipamentos Rotativos e Alternativos (SAVERA), que será abordado no próximo item, para então apresentar os resultados.

Vale ressaltar que, para minimizar o ruído do fundo que possa a ser produzido, é necessário que seja realizado o aterramento elétrico do equipamento.

### 3.1.3 Software SAVERA

O software SAVERA, utiliza a linguagem LABVIEW, uma linguagem fácil de ser entendida, usando a linguagem de programação para uso de engenharia, através do encontro de milhares de algoritmos especializados e funções. A Figura 8 abaixo, mostra a tela desse software.

Figura 8 - Tela do Software SAVERA



Fonte: <https://www.marinha.mil.br/cpn/content/descricao-e-graficos>

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Serão apresentados os resultados obtidos pelos relatórios de análise de vibração do CPN em navios de diferentes classes. Neste trabalho vamos enfatizar as análises realizadas nas linhas de eixo e seus respectivos mancais, bem como, as manutenções a serem realizadas quando os dados coletados apresentarem avaria ou iminência de avaria.

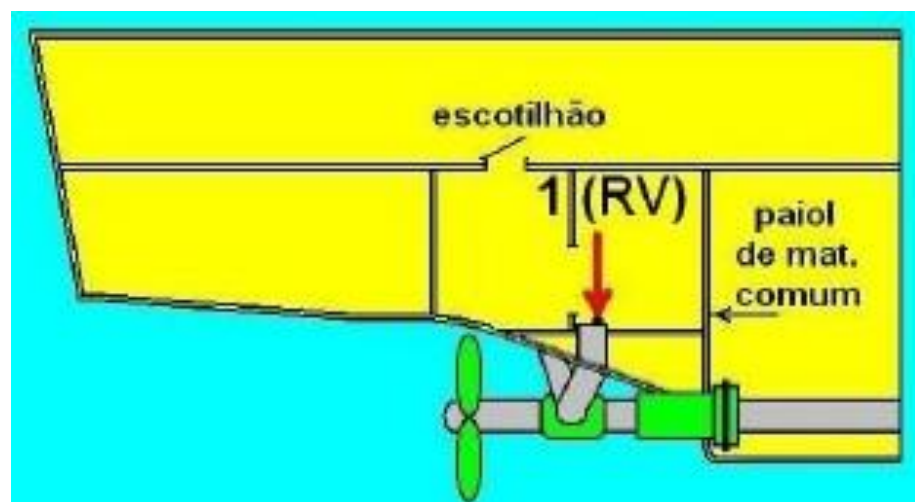
Vale ressaltar que as análises realizadas sempre são resultadas de medições realizadas anteriormente em comparação com a atual, para que assim possa ser observada a Curva de Tendência dos Equipamentos Medidos e, posteriormente, ser confeccionado o Gráfico de Tendências, onde a própria equipe de bordo possa constatar se a vibração do equipamento está acima ou dentro do limite de operação.

### 4.1 Análise de Vibração de uma Fragata da Classe Niterói (FCN)

#### 4.1.1 Linha de Eixo Propulsor

A linha de eixo foi medida em um ponto (PT 1), na direção vertical. Os detalhes são mostrados nas Figuras 9 e 10. As condições de operação para a medição foram: 60 DESSI, 100 DESSI e 140 DESSI, sendo o DESSI uma combinação de rotação do eixo propulsor com o ângulo da pá do hélice, chamado de passo.

Figura 9 – Croqui do ponto de medição da linha de eixo



Fonte: CPN (2017).

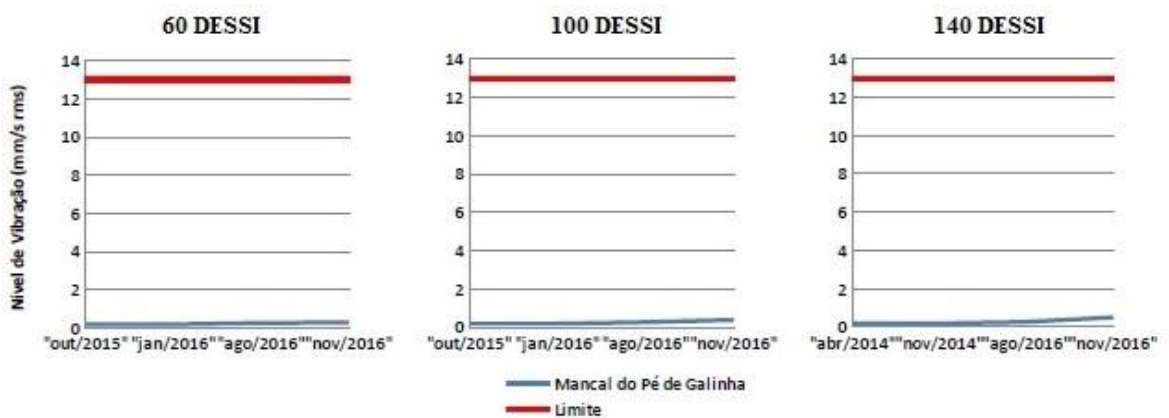
Figura 10 – Foto do ponto de instalação do acelerômetro



Fonte: CPN (2017).

A figura 11 apresenta o resultado da análise onde a linha de eixo apresentou níveis normais de vibração, por estar em todas as condições de operação abaixo do limite estabelecido.

Figura 11 – Gráficos de Tendência da Linha de Eixo Propulsor

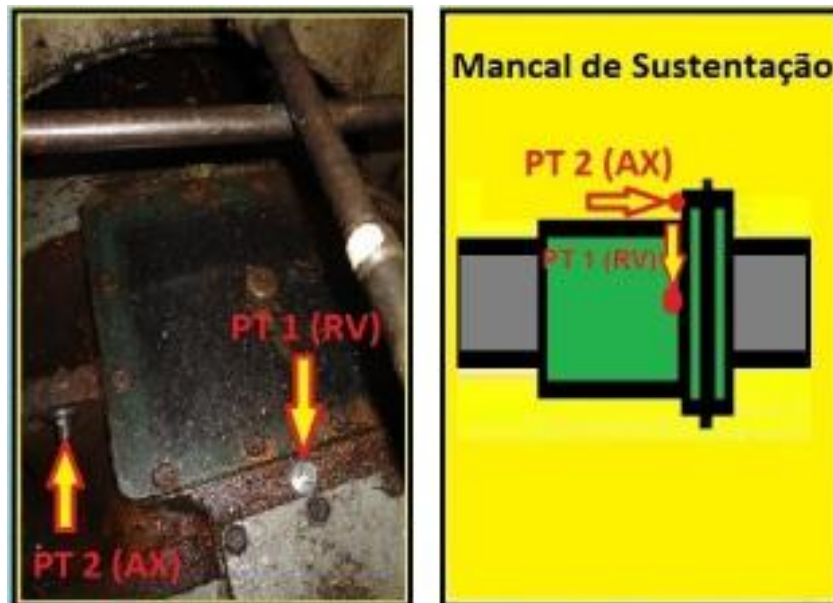


Fonte: CPN (2017).

#### 4.1.2 *Mancais de Sustentação*

Cada mancal de sustentação foi medido em dois pontos (PT 1 e PT 2), sendo um na direção axial e o outro na radial vertical. Detalhes dos pontos medidos podem ser observados na Figura 12. As condições de operação para a medição foram as mesmas do Item 4.1.1.

Figura 12 – Croqui dos pontos de medição dos mancais de sustentação e foto com as posições dos acelerômetros.



Fonte: CPN (2017).

Como pode-se constatar a partir de análises anteriores a linha de eixo e seus respectivos mancais de sustentação dessa Fragata não apresentaram nenhum tipo de anormalidade, assim, ficou como orientação para o navio, continuar a fazer esse acompanhamento periodicamente a fim de prevenir possíveis falhas.

## 4.2 Análise de Vibração de um Navio-Patrolha Classe Grajaú

Foi solicitado o serviço de análise de vibração junto ao CPN, após o Período de Manutenção, no qual foram realizadas as revisões de ambos os MCP.

### 4.2.1 Linhas de Eixo Propulsor de Bombordo (BB) e Boreste (BE)

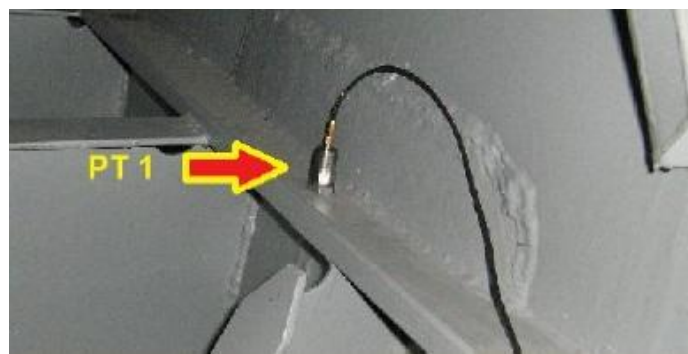
As linhas de eixo foram medidas em um ponto (PT 1) cada na direção vertical. Os detalhes são mostrados nas Figura 13 e 14. As condições de operação para a medição foram: 750 rpm, 1150 rpm, 1300 rpm e 1700 rpm do eixo.

Figura 13 – Croqui dos pontos de medição das Linhas de Eixo.



Fonte: CPN (2016).

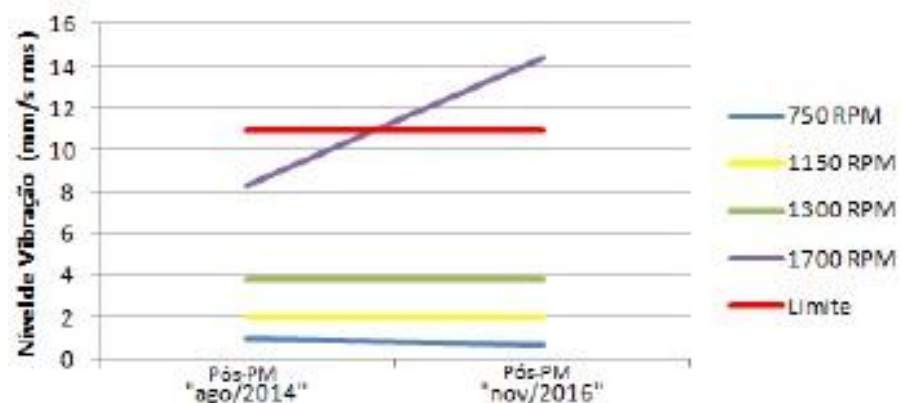
Figura 14 – Foto do ponto de instalação do acelerômetro.



Fonte: CPN (2016).

As linhas de eixo de BB e de BE apresentaram níveis de vibração acima dos limites estabelecidos conforme os gráficos das Figuras 15 e 16, respectivamente, configurando como causas prováveis: deformação, perda de material ou acúmulo de incrustações em uma ou mais pás dos hélices, provocando comportamento hidrodinâmico irregular na região da popa.

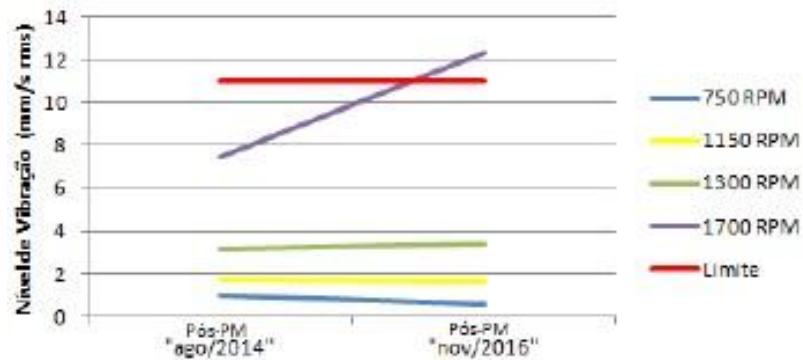
Figura 15 – Gráfico de Tendências da Linha de Eixo de BB



Fonte: CPN (2016).



Figura 16 – Gráfico de Tendências da Linha de Eixo de BE



Fonte: CPN (2016).

Como pode-se constatar a partir da análise realizada antes do Período de Manutenção, as anormalidades estavam presentes quando navio está em condição de operação de 1700 rpm, sendo assim o navio ficou restrito a operar a apenas até 1300 rpm do eixo. Além disso, ficou como orientação para o navio a realização das seguintes manutenções: efetuar limpeza, manutenção e balanceamento dos hélices.

Após a realização da manutenção do hélice, o navio deveria solicitar uma nova análise de vibração de ambas as linhas de eixo propulsor.

## 5. CONSEQUÊNCIAS PARA OS NAVIOS

O CPN possui diversas limitações para atender aos serviços solicitados pelos navios. Assim, a principal consequência para os navios é a necessidade de aguardar em média três a quatro semanas para que uma equipe do CPN tenha disponibilidade de comparecer a bordo para efetuar as análises. Após, é necessário aguardar cerca de quatro semanas para obter o resultado da análise. Além disso, devido às intensas atividades operativas no mar dos navios, a disponibilidade para recebimentos dessas equipes também é limitada, desencadeando impedimentos para efetuar as medições.

Outra importante consequência é que sem a adoção desses procedimentos, os navios ficam privados dos principais benefícios da análise de vibração. Ao realizar essa análise, há uma redução nos custos de manutenção, já que é possível prever quando é necessária a intervenção de manutenção, além do prolongamento da vida útil dos componentes. Soma-se também ao aumento da eficiência das intervenções de manutenção, aumento da disponibilidade dos equipamentos e ampliação da confiabilidade operacional.

### 5.1 Proposta de solução a curto prazo

A fim de diminuir a quantidade de solicitações de visitas técnicas de equipes do CPN aos navios, uma possível solução é capacitar as tripulações dos navios a fazerem a parte inicial das medições, conforme um curso expedito, com tempo previsto de no máximo sete dias, evitando, ao máximo, diminuir o tempo de ausência dos militares nos seus serviços diários a bordo.

#### 5.1.1 *Dinâmica do curso para qualificação na coleta de dados para a análise vibração*

O Curso Expedito para Coleta de Dados para a Análise de Vibração (C-EXP-CAnaV) deverá ser elaborado pelo CPN em conjunto com o Centro de Adestramento Almirante Marquês de Leão (CAAML), seguindo o organograma apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Organograma do C-EXP-CAnAV



Fonte: Autor.

Ficaria como responsabilidade do grupo formado pelo CPN e CAAML para a implementação do curso, as seguintes medidas:

- a) Realizar grupo de estudo para analisar a viabilidade do C-EXP-CAnAV;
- b) Discriminar as áreas de conhecimento a serem abordadas no curso;
- c) Analisar a necessidade quantitativa e qualitativa de pessoal da Marinha para realização do curso;
- d) Verificar o pessoal disponível na MB com o conhecimento técnico exigido para o curso;
- e) Confeccionar orçamento inicial dos gastos para as seguintes ações:
  - i. Elaboração de material didático e acadêmico para o curso;
  - ii. Local físico para realização das salas;
  - iii. Laboratório técnico para aulas práticas;
  - iv. Custos referente aos estágios das turmas a bordo dos navios.

Vale ressaltar que o curso terá como objetivo habilitar os militares para executarem, fundamentalmente, as seguintes tarefas:

- Instalação do sensores nos equipamentos a serem analisados;
- Coleta dos dados através do SAVERA;
- Preenchimento da planilha das informações coletadas.

Assim, os navios deverão escalar para o curso uma equipe formada, no mínimo por três militares que deverão atender os seguintes requisitos:

- um cabo especializado em comunicações interiores (CB-CI);
- um cabo especialidade em circuitos elétricos (CB-EL);
- um sargento aperfeiçoado em motores (SG-MO), para supervisionar todos os procedimentos.

No curso deverão ser abordados assuntos que serão orientações básicas, como:

- a) Lista de equipamentos necessários para as medições;
- b) Lista de pessoal mínimo necessário para efetuar as medições;
- c) Orientações básicas de manuseio e conservação desses equipamentos;
- d) Croqui de local das posições dos sensores para cada tipo de equipamento;
- e) Precauções a serem tomadas durante as medições para que sejam evitadas perturbações externas ou ruídos nas medições;
- f) Precauções de segurança a serem tomadas;
- g) Modelo de planilha a ser preenchido com as informações das vibrações lidas nos equipamentos.

### 5.1.2 *Lista de Equipamentos para a coleta de dados para a Análise de Vibração*

A fim de otimizar as medições, cada navio deverá possuir os equipamentos necessários para realizar este serviço. A Tabela 2 apresenta a descrição dos equipamentos similares aos empregados pelo CPN e o valor orçado no mês de referência (fevereiro de 2020):

Tabela 2 – Orçamento material para Análise de Vibração

Equipamento	Marca – Modelo	Preço Um	Qtde	Preço Total
Acelerômetro	Wilcoxon - 799LF	R\$ 1.700,00	4	R\$ 6.800,00
Placa conversora A/D	NI 9223	R\$ 10.200,00	1	R\$ 10.200,00
Laptop Toughbook	Panasonic – CF-30	R\$ 8.800,00	1	R\$ 8.800,00
			TOTAL	R\$ 25.800,00

Fonte: Autor.

Foram orçados apenas materiais que podem ser adquiridos no Brasil, para que fosse facilitado a compra dos mesmos. Em virtude deste fato, o acelerômetro orçado foi similar o emprego pelo CPN.

## 5.2 Proposta de solução a longo prazo

A fim de descentralizar a coleta de dados e acelerar o envio para a análise de vibração do CPN, foi apresentado na solução a curto prazo como poderia ser realizada a capacitação do pessoal de bordo dos navios para efetuar as coletas dos dados.

No entanto, como maneira de acelerar o envio dos mesmos de maneira digital e criptografada, poderia ser criado um site pelo próprio CPN, de maneira que mesmo com o navio em uma missão operativa no mar consiga enviar os dados para que seja feita a análise. Assim, o processo torna-se mais dinâmico e simplificado.

No site existiriam as abas para preenchimento dos dados e deveriam conter as explicações necessárias para o preenchimento. Além disso, figuras ilustrando o modo de aferição da análise nos equipamentos. Logo, o site seria uma evolução do plano de aulas da solução do curto prazo.

A fim de garantir a conexão segura dessas informações, o site deve ser apenas disponibilizado via INTRANET, responsabilidade a cargo do Centro de Tecnologia Informação da Marinha (CETIM). Além disso, todos os dados seriam enviados de maneira criptografada, a fim de otimizar a segurança no tráfego das informações.

## 6. CONCLUSÃO

Como observado nos capítulos anteriores do presente trabalho, a manutenção preditiva é de suma importância para prevenir as falhas nos equipamentos, assim, a análise de vibração tem grande importância na MB.

O CPN é o órgão gerencial responsável pela execução das medições, processamento dos dados analisados, diagnóstico dos problemas encontrados e previsão do comportamento de todos os navios da área do Primeiro Distrito Naval do Rio de Janeiro. Essa responsabilidade abrange cerca de 40 navios, com características e equipamentos diversos. Desta forma, a demanda pelos serviços desse centro é extremamente elevada.

Além da grande demanda de serviços, outro importante elemento a ser considerado é a limitação de pessoal capacitado a operar os equipamentos necessários para a execução das análises de vibração e, principalmente, pessoal detentor do conhecimento para diagnosticar o comportamento dos equipamentos analisados.

Assim, torna-se de grande relevância a implementação do C-EXP-CAnAV como forma de otimizar da análise de vibração como manutenção preditiva, a fim de minimizar os custos de manutenção e deixar o deixar o navios da MB sempre pronto para cumprir suas missões.

## REFERÊNCIAS

CENTRO DE PROJETOS DE NAVIOS, MB. Atividades Técnicas, Manutenção Preditiva. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/cpn/content/descricao-e-graficos>>. Acesso em: 8 fev. 2020.

COSTA, Y. G. G. **Sistema de conversão analógico digital de 12 bits**. Centro de Ciências Exatas e da Natureza, UFPB, 2005.

FILHO, L. F. S. **Manutenção por análise de vibrações: uma valiosa ferramenta para gestão de ativos**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

JOHN, M. **From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance**. SanJuan Capistrano, California, 2007.

JORDANI, T. A. **Influência da deflexão do casco sobre o alinhamento de eixos propulsores de navios de apoio**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PCB PIEZETRONICS, MTS System Corporation. Disponível em: <<https://www.pcb.com/products?m=352C33>>. Acesso em: 27 dez. 2019.

(RESERVADO) CPN. **Relatório Técnico de Análise de Vibração de um Navio-Patrolha Classe Grajaú**. Marinha do Brasil, 2016.

(RESERVADO) CPN. **Relatório Técnico de Análise de Vibração de uma Fragata Classe Niterói**. Marinha do Brasil, 2017.

SILVA, D. A. **Diagnóstico de equipamentos de propulsão naval através de análise de vibração**. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SOUZA, L. A. **Análise integrada do sistema propulsivo e do comportamento dinâmico de embarcações**. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.