ESCOLA SUPERIOR NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA



MANUTENÇÃO PREVENTIVA CONDICIONADA DE EQUIPAMENTOS MARÍTIMOS

João Paulo Serpa Morais

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Fernandes Mendonça

Maio de 2018

Resumo

O mar revela-se um dos melhores meios para transporte de cargas entre os vários pontos do planeta. O comércio marítimo de mercadorias tem vindo a evoluir positivamente neste último século.

Devido à elevada concorrência, as empresas que operam neste setor são obrigadas a gerir eficaz e eficientemente os seus recursos, reduzindo o tempo de paragem dos navios tanto em porto, como nas intervenções técnicas, diminuindo os custos de operação.

Existe assim, uma permanente necessidade em aumentar a disponibilidade dos equipamentos e controlar mais eficazmente os stock's dos navios.

Em ambas as situações, a manutenção preventiva condicionada poderá ter um papel determinante na salvaguarda de equipamentos e gestão de stock's.

A utilização de técnicas de controlo de condição, como a análise de vibrações, análise de óleo lubrificante, inspecção visual ou termografia, garantirão resposta aos objectivos e exigências das empresas nos tempos de hoje.

Na presente tese será apresentada uma revisão sobre os principais conceitos de manutenção, com particular ênfase na manutenção preventiva condicionada. Complementando o sistema de manutenção preventiva sistemática, existente a bordo, foi utilizada/implementado um sistema de manutenção condicionada na instalação do N/M Corvo, sobre sete equipamentos muito importantes para que o navio possa funcionar sem falhas durante longos períodos de tempo. As técnicas de manutenção condicionada utilizadas foram a análise de vibrações e a termografia.

Será também apresentada uma breve introdução sobre conceitos da termografia e feita a análise termográfica a sistemas mecânicos e elétricos existentes a bordo.

No final será apresentada a importância deste tipo de manutenção na gestão de stock's, redução de custos e aumento da disponibilidade dos equipamentos.

Abstract

The Sea has proven time and again to be one of the best ways to transport cargo to the four corners of the world.

Over the last century, Maritime trade has been developing positively. We are facing high competition in this sector, therefore companies are obligated to manage in the best way possible their resources, hence to avoid having their vessels stopped longer than necessary either during Port operations or for mechanical maintenance or intervention, dropping their costs as a result.

Due to the above, it is really important to increase equipment / vessel availability and to have an effective control of the vessel's stock.

In both situations, conditional pre-emptive maintenance may have a key role in safeguarding equipment and in stock management.

Nowadays to fulfil Goals and Company requirements, it is necessary to use tools of control conditioning, so to ensure that we are ahead of the market, using vibration analysis, lubricant control, visual inspection and/or thermography readings.

In this thesis I will present to you an overview of key maintenance concepts with particular emphasis on pre-emptive conditional maintenance.

In order to complement the pre-emptive maintenance system already existing aboard the N/M Corvo, a maintenance control system was introduced to seven of the most important pieces of equipment so that we can ensure that the vessel will work for longer periods of time without breaking down. The techniques applied were vibration analysis and Thermography.

I will offer you a short introduction describing Thermography concepts presenting an example of a Thermography reading being executed on mechanical and electrical systems aboard the vessel.

As a result i will demonstrate the importance of this type of maintenance and stock management, resulting in costs reduction and more availability of equipment.

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos os que deram o seu contributo para que esta dissertação fosse realizada. Em primeiro lugar, agradeço à ENIDH e a todos os professores da mesma pela forma que lecionaram o mestrado e pelos equipamentos cedidos para o estudo realizado nesta dissertação. Agradeço também aos meus colegas pela partilha e amizade durante este período.

Ao meu orientador, Eng.º Luís Manuel Fernandes Mendonça, pela disponibilidade, apoio, dedicação e compreensão durante todas as fases da dissertação.

A toda a equipa técnica e de gestão da Mutualista Açoreana, pela disponibilidade de analisar alguns dos equipamentos presentes na instalação do N/M Corvo.

Aos meus pais, pela confiança depositada, apoio constante e pelas palavras e conselhos nos momentos mais difíceis.

À minha namorada, Mafalda Martins, pela compreensão e apoio em todas as etapas do trabalho realizado.

Por fim, mas não menos importante, à SPECMAN, pela disponibilidade e informação prestada em alguns temas.

Índice

Resumo ..... **III**

Abstract ..... **IV**

Agradecimentos ..... **V**

Índice ..... **VII**

Lista de figuras ..... **IX**

Lista de tabelas ..... **X**

Lista de gráficos ..... **XII**

Simbologia ..... **XIII**

Capítulo 1 ..... **15**

Introdução **15**

1.1. Marinha mercante portuguesa 15
1.2. Evolução da manutenção 16
1.3. Metodologia 19
1.4. Motivação desta dissertação 20
1.5. Objectivos 20
1.6. Organização da Dissertação 21

***Capítulo* 2** **22**

Fundamento teórico **22**

2.1. Impacto da manutenção 22
2.2. Indicadores de desempenho 24
2.3. Tipos de manutenção 30
2.4. Análise de vibrações (técnica da manutenção preventiva condicionada) 34
2.4.1. Vibração mecânica 34
2.4.2. Nível de vibração 35
2.4.3. Parâmetros de vibração 35
2.4.4. Sensores de vibração 37
2.4.5. Análise de sinais de vibração 38
2.4.6. Diagnóstico de avarias 41
2.5. Termografia 52
2.5.1. Espetro eletromagnético 53
2.5.2. Características da radiação infravermelha 53
2.5.3. Fatores que influênciam a medição de radiação infravermelha 55
2.5.4. Termografia por infravermelhos 55
2.5.5. Termografia qualitativa e quantitativa 58
2.5.6. Termografia ativa e passiva 58
2.5.7. Vantagens e limitações da termografia 60
2.5.8. Equipamentos 61
2.5.9. Aplicações da termografia 62

***Capítulo* 3** **69**

Determinação das frequências características **69**

Resultados obtidos em Maio 2017 ..... **74**

3.1. Análise de vibrações 74
3.1.1. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 75
3.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 77
3.1.3. Bomba de lastro e esgoto 79
3.1.4. Bomba de água do mar EB 82
3.1.5. Bomba de água do mar BB 84

3.1.6. Bomba de circulação de óleo térmico 86
3.1.7. Ar condicionado 89
3.2. Termografia 92

***Capítulo* 4 .... 96**
Resultados obtidos em Janeiro 2018 96
4.1. Análise de vibrações 96
4.1.1. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 96
4.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 99
4.1.3. Bomba de lastro e esgoto 100
4.1.4. Bomba de água do mar EB 103
4.1.5. Bomba de água do mar BB 105
4.1.6. Bomba de circulação de óleo térmico 108
4.1.7. Ar condicionado 110
4.2. Termografia 113

***Capítulo* 5 ....115**
Análise de resultados 115
5.1. Análise crítica dos resultados referente à análise de vibração 115
5.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 116
5.1.3. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 117
5.1.4. Bomba de lastro e esgoto 119
5.1.5. Bomba de água do mar EB 121
5.1.6 Bomba de água do mar BB 123
5.1.7. Bomba de circulação de óleo térmico 124
5.1.8. Ar Condicionado 127
5.1.9. Análise critica dos resultados referente à termografia 129

***Capítulo* 6 ....131**
Conclusões 131
6.1. Conclusões 131
6.2. Trabalhos futuros 132
6.3. Referências bibliográficas 133

Lista de figuras

Figura 1 - Evolução da Manutenção [20] **17**
Figura 2 - Metodologia utilizada **19**
Figura 3 - Input's / Output's da manutenção [6] **22**
Figura 4 - Custos de manutenção [30] **23**
Figura 5 - Curva caracteristica de fiabilidade e probabilidade de falha **26**
Figura 6 - Curva da banheira **27**
Figura 7 - Tipos de Manutenção **30**
Figura 8 - Nível de Vibração [26] **35**
Figura 9 - Parâmetros de vibração [26] **36**
Figura 10 - Sensor de velocidade **37**
Figura 11 – Acelarómetro [7] **38**
Figura 12 - Curva de tendência com níveis de criticidade [7] **39**
Figura 13 - Exemplo da conjugação da vibração de um equipamento **40**
Figura 14 - Variação do Fator de Crista na degradação de um componente [7] **41**
Figura 15 - Espetro com evidência de desequilíbrio no rotor do exaustor [34] **42**
Figura 16 - Desalinhamento angular [31] **43**
Figura 17 - Espetro representativo de um desalinhamento angular [34] **43**
Figura 18 - Desalinhamento paralelo [31] **43**
Figura 19 - Espetro representativo de um desalinhamento paralelo [34] **44**
Figura 20 - Espectro característico de folga mecânica no apoio do equipamento, evidenciando os vários picos harmónicos [34] **45**
Figura 21 - Espetro característico Tipo I [31] **45**
Figura 22 - Espetro característico Tipo II [31] **46**
Figura 23 - Espetro característico Tipo III [31] **46**
Figura 24 - Constituição de um rolamento [25] **47**
Figura 25 - Dimensões de um rolamento [5] **48**
Figura 26 - Níveis de vibração para rolamentos defeituosos [1] **49**
Ilustração 27 - Espetro característico de falha do rolamento [34] **50**
Figura 28 - Espetro característico da cavitação numa bomba [1] **50**
Figura 29 - Cavitação numa bomba centrifuga [1] **51**
Figura 30 - Espetro eletromagnético [21] **53**
Figura 31 – Balanço de energia radiante para um corpo real [8] **54**
Figura 32 - Resolução da imagem térmica [22] **57**
Figura 33 - Técnicas comuns em termografia [14] **59**
Figura 34 - Vantagens e desvantagens da termografia [8] **61**
Figura 35 - Camâra termográfica [22] **62**
Figura 36 - Imagem termográfica de sistema de vapor [24] **63**
Figura 37 - Imagens termográficas de sistemas mecânicos [24] **64**
Figura 38 - Imagem termografica de uma ligação com folga **66**

Figura 39 – Imagem termográfica de sobrecarga de uma contatora 67
Figura 40 - Imagem termográfica de desiquilibro de carga 67
Figura 41 - Grupo de bombas circulação ao condensador do sistema de frio 92
Figura 42 - Bomba de refrigeração de água de baixa temperatura 93
Figura 43 – Bomba de circulação de óleo térmico da caldeira 93
Figura 44 – Três fases da bomba de incêndio nº1 94
Figura 45 - Cabelagem diversa presente na instalação 94
Figura 46 - Desfasamento da bomba de incêndio Nº2 113
Figura 47 - Macho esférico para descarga de óleo do coletor de evacuação da caldeira auxiliar 113
Figura 48 – Válvula de retenção para selo da depuradora 114
Figura 49 – Imagem comparativa das três fases do motor elétrico de incêndio 130

Lista de tabelas

Tabela 1 - Técnicas de manutenção preventiva condicionada [4] 33
Tabela 2 - Norma ISO 2372 39
Tabela 3 - Frequência característica do conjunto 69
Tabela 4 - Frequência característica das pás do ventilador 70
Tabela 5 - Frequência caracteristica dos rolamentos 71
Tabela 6 - Frequência caracteristica dos rolamentos 72
Tabela 7 - Frequência caracteristica dos rolamentos 73
Tabela 8 - Frequência caracteristica dos rolamentos 73
Tabela 9 - Frequência caracteristica dos rolamentos 74
Tabela 10- Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 (Maio 2017) 75
Tabela 11 - Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 (Maio 2017) 78
Tabela 12 - Bomba de Lastro e Esgoto (Maio 2017) 80
Tabela 13 - Bomba Água do Mar EB (Maio 2017) 83
Tabela 14 - Bomba Água do Mar BB (Maio 2017) 85
Tabela 15 - Bomba de circulação de óleo térmico (Maio 2017) 87
Tabela 16 - Ventilador Ar Condicionado dos Alojamentos (Maio 2017) 90
Tabela 17- Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 (Janeiro 2018) 97
Tabela 18 - Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 (Janeiro 2018) 99
Tabela 19 - Bomba de Lastro e Esgoto (Janeiro 2018) 101
Tabela 20 - Bomba Água do Mar EB (Janeiro 2018) 104
Tabela 21 - Bomba Água do Mar BB (Janeiro 2018) 106
Tabela 22 - Bomba de circulação de óleo térmico (Janeiro 2018) 108
Tabela 23 - Ventilador Ar Condicionado dos Alojamentos (Janeiro 2018) 111
Tabela 24 - Valores obtidos para a bomba de refrigeração de baixa temperatura Nº1 116
Tabela 25 - Valores obtidos para a bomba de refrigeração de baixa temperatura Nº2 117

Tabela 26 - Valores obtidos para a bomba de lastro e esgoto 119
Tabela 27 - Valores obtidos para a bomba de água do mar EB 122
Tabela 28 - Valores obtidos para a bomba de água do mar BB 123
Tabela 29 - Valores obtidos referentes à bomba de circulação de óleo térmico 125
Tabela 30 - Valores coletados para o ventilador de ar condicionado 127

Lista de gráficos

Gráfico 1 - Espectro de frequência no ponto de medição H1EM - LT1 - (Maio 2017) 76
Gráfico 2 - Espectro de frequência no ponto de medição H3P - LT1 - (Maio 2017) 77
Gráfico 3 - Espectro de frequência no ponto de medição A2EM – LT2 - (Maio 2017) 79
Gráfico 4 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em V1EM (Maio 2017) 81
Gráfico 5 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em A2EM (Maio 2017) 81
Gráfico 6 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em V3P (Maio 2017) 82
Gráfico 7 – Espetro referente à bomba de água do mar EB em H1EM (Maio 2017) 84
Gráfico 8 - Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em V1EM (Maio 2017) 86
Gráfico 9 – Espetro referente à bomba de óleo térmico em H1EM (Maio 2017) 88
Gráfico 10 - Espetro referente à bomba de óleo térmico em V2EM (Maio 2017) 88
Gráfico 11 - Espetro referente à bomba de óleo térmico em V3C (Maio 2017) 89
Gráfico 12 – Espetro de sinal referente ao ventilador ar condicionado em H1EM (Maio 2017) 91
Gráfico 13 - Espetro de sinal referente à base do ventilador ar condicionado (Maio 2017) 91
Gráfico 14 - Espectro de sinal no ponto de medição V1EM -LT1- (Janeiro 2018) 98
Gráfico 15 - Espectro de sinal no ponto de medição V3P –LT1- (Janeiro 2018) 98
Gráfico 16 - Espectro de sinal no ponto de medição V1EM –LT2- (Janeiro 2018) 100
Gráfico 17 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em V1EM (Janeiro 2018) 102
Gráfico 18 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em A2EM (Janeiro 2018) 102
Gráfico 19 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em V3P (Janeiro 2018) 103
Gráfico 20 – Espetro referente de sinal à bomba de água do mar EB em A3P (Janeiro 2018) 105
Gráfico 21 - Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em H3P (Janeiro 2018) 107
Gráfico 22 – Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em V3P (Janeiro 2018) 107
Gráfico 23 – Espetro de sinal referente à bomba de óleo térmico em V1EM (Janeiro 2018) 109
Gráfico 24 – Espetro de sinal referente à bomba óleo térmico em V2EM (Janeiro 2018) 109
Gráfico 25 – Espetro de sinal referente à bomba de óleo térmico em A2EM (Janeiro 2018) 110
Gráfico 26 – Espetro de sinal referente ao ventilador ar condicionado em H1EM (Janeiro 2018) 112
Gráfico 27 – Espetro de sinal referente à base do ventilador de ar condicionado (Janeiro 2018) 112
Gráfico 28 – Comparação do espetro de sinal referente à bomba de água de refrigeração Nº2 no ponto V1EM 118
Gráfico 29 – Comparação do ponto de medição V1EM na bomba de lastro e esgoto 121
Gráfico 30 – Comparação do espetro de sinal referente à bomba de água do mar EB no ponto H1EM 122
Gráfico 31 - Comparação do nível de vibração no ponto H3P para a bomba de água do mar BB 124

Simbologia

CNN → *Companhia Nacional de Navegação*

CTM → *Companhia portuguesa Transportes Marítimos*

CEE → *Comunidade Económica Europeia*

TPM → *Total Productive Maintenance – Manutenção produtiva total*

N/M Corvo → *Navio Motor Corvo*

SGM → *Sistema de Gestão de Manutenção*

IT → *Intervenção Técnica*

MTBF → *Mean Time Between Failures – Tempo médio entre falhas*

MTTR → *Mean Time To Repair – Tempo médio de reparação*

MDT → *Maintenance Down Time – Indisponibilidade do equipamento*

D → *Disponibilidade*

Hz → *Hertz*

RMS → *Root Mean Square*

RPM → *Rotações Por Minuto*

FFT → *Fast Fourier Transformation – Transformada rápida de Fourier*

FC → *Fator de Crista*

Dp → *Diâmetro Primitivo*

BPFI → *Frequência da pista interior*

BPFO → *Frequência da pista exterior*

BSF → *Frequência dos corpos rolantes*

FTF → *Frequência da gaiola*

IV → *Infra-Vermelho*

NDT → *Non-Destructive Testing – Ensaios não destrutivos*

Capítulo 1

Introdução

1.1. Marinha mercante portuguesa

Inicialmente, durante o período do estado novo, a marinha mercante portuguesa era constituída por sete empresas que operavam principalmente para os mercados das ex-colónias. Estas, controlavam os tráfegos coloniais e insulares, em regimes de mercado monopolista, condicionando assim o acesso de armadores estrangeiros.

Nesta época, existiam dois mercados distintos. Por um lado, o transporte de passageiros de, e para, as ex-colónias e ilhas próximas, e também o transporte de graneis, que na altura era feito em sacaria, atados ou avulso.

Os portos portugueses eram, de forma genérica, de baixo rendimento e produtividade, com ritmos de operação baixos, estadias em porto prolongadas e custos de operação elevados.

De 1971 a 1974, houve um processo de reestruturação da marinha mercante portuguesa, que se traduziu na fusão de várias empresas. Após este período, com a revolução de 1974, houve uma perda substancial destes mercados e o retorno de militares e portugueses residentes nessas zonas, devido à perda das colónias.

A revolução de 25 de Abril levou também à nacionalização da marinha mercante portuguesa, cujas empresas passaram a ter então, o estatuto de empresas públicas.

Decorreu então um período de proteção às cargas nacionais, que eram transportadas exclusivamente por armadores nacionais. A estratégia empresarial destas empresas públicas, como os projectos de investimento e as tabelas de frete, eram controladas pelo Estado, através da nomeação de Gestores Públicos. A frota nacional acabou por ficar desadequada ao novo modelo de exploração e incapaz de concorrer no mercado internacional. Tudo isto levou ao progressivo enfraquecimento dos armadores portugueses.

Em 1984, e devido ao elevado nível de endividamento, o Ministério do Mar extingue duas grandes empresas nacionais, a Companhia portuguesa de Transportes Marítimos (CTM) e Companhia Nacional de Navegação (CNN). Após a extinção destas, são criadas duas novas empresas, a Portline, direcionada para tráfego de longo curso, e a Transinsular, vocacionada principalmente, para os transportes de curta distância.

O setor marítimo nacional sofreu importantes alterações após a adesão de Portugal à Comunidade Económica Europeia (CEE). Com a abertura de mercados, a eliminação de reservas de frota e de carga, a extinção de monopólios e liberalização da cobotagem, e por forma a garantir o cumprimento dos padrões de qualidade e segurança impostos pelas Convenções Internacionais, e outras medidas, levou à privatização das próprias empresas, renovação e adequação das suas frotas.

Atualmente, e apesar dos apoios governamentais à Marinha Mercante, nomeadamente, subsídios à construção de navios destinados aos tráfegos insulares benefícios para os armadores e trabalhadores com a implementação do *Tonnage Tax*, a marinha mercante portuguesa encontra-se confinada a dois navios, sendo estes da mesma companhia, Mutualista Açoreana [17].

1.2. Evolução da manutenção

A manutenção acompanhou o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade e cresceu conforme as mudanças e exigências dos mercados.

A manutenção começou por ser secundária e executada pelo responsável de operação até 1914. Nesta data, com o despolutar da primeira guerra mundial e da implementação da produção em série, instituída por Ford, as empresas sentiram necessidade de criar equipas destinadas à reparação de equipamentos, no menor tempo possível.

Desde os anos 30 o processo cronológico da manutenção divide-se em três fases, como se pode ver na figura 1. [20]

Uma primeira fase, no período antes da segunda guerra mundial, quando a indústria ainda era pouco mecanizada. Nesse período a manutenção era, fundamentalmente, corretiva, ou seja, só se dava a reparação após a falha do equipamento. A produtividade não era prioritária, pelo que, não se considerava necessária uma manutenção com períodos de tempo definidos, portanto não se privilegiava um tipo de manutenção preventiva sistemática.

Durante a segunda guerra mundial, e até os anos 60, temos a segunda fase da manutenção, onde houve um forte aumento da mecanização, bem como da complexidade das instalações industriais.

Novas técnicas de manutenção começaram a surgir, como computorização, sistemas manuais de planeamento e controlo do trabalho e monitorização por tempo dos equipamentos. Foi neste período que surgiu o conceito de manutenção preventiva, pois houve a necessidade de maior disponibilidade e fiabilidade dos equipamentos com vista a aumentar os níveis de

produtividade. A indústria estava bastante dependente do bom funcionamento das máquinas. Com isto, aumentou-se a vida útil dos equipamentos.

A terceira fase surgiu a partir da década de 70, onde se começou a ter atenção aos custos envolvidos no processo de Gestão da Manutenção. Pretendia-se assim combinar os meios financeiros, estudos de fiabilidade e disponibilidade, avaliações técnicas-economicas e métodos de gestão, de modo a obter ciclos de vida dos equipamentos maiores e cada vez menos dispendiosos. Numa manutenção centrada no negócio, os custos são a base para as decisões na área de manutenção influenciando as decisões estratégicas das empresas.

Ainda na década de 1970 os japoneses instauraram a *Total Productive Maintenance* (TPM). Consiste num sistema de gestão que abrange diversas áreas de uma indústria, e cada uma dessas áreas que pertence ao processo, é vista como "Pilar".

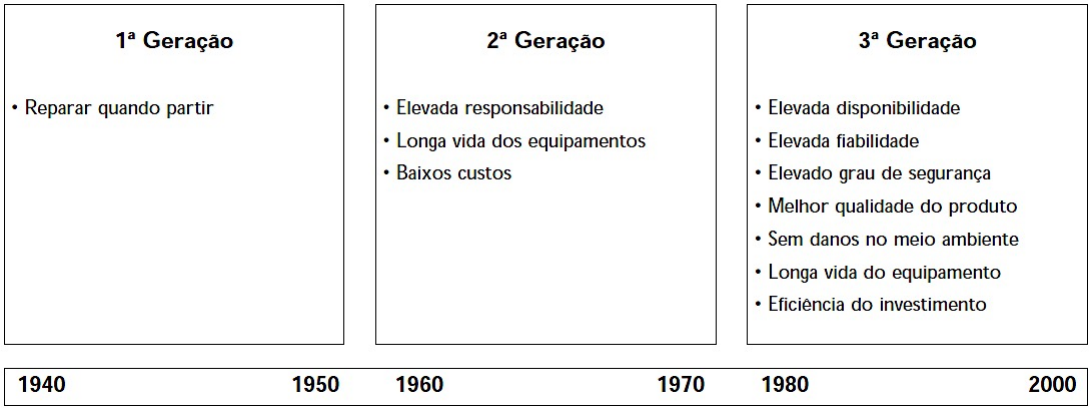


Figura 1 - Evolução da Manutenção [20]

Com desenvolvimento dos microcomputadores nos anos 80, as áreas de manutenção passaram a desenvolver e processar seus próprios sistemas de manutenção, melhorando e refinando o processamento das informações, oferecendo assim uma diminuição da dependência humana e de equipamentos.

Através da síntese das três fases da manutenção observa-se que ao longo das gerações as expectativas em relação à manutenção tornavam-se cada vez mais fortes. Antes vista apenas como a reparação após a falha, e agora com a responsabilidade de manter padrões de qualidade estabelecidos pelas empresas.

Com o aumento das exigências dos mercados, a manutenção passou por consideráveis mudanças técnicas, aumentando os investimentos em computadores e softwares potentes e realizações de análises de falha e risco, que proporcionaram maior fiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

A manutenção tem passado por muitas mudanças nos últimos 20 anos devido ao:

- ✓ Aumento do número e diversidade dos equipamentos e instalações que têm que ser mantidos;
- ✓ Projetos mais complexos;
- ✓ Novas técnicas de manutenção;
- ✓ Novos sistemas de gestão de manutenção. [27]

Dado o crescimento nos últimos anos, os gestores de manutenção têm como missão a redução dos tempos de paragem dos equipamentos, paragens eficientes sem afetar a produtividade da instalação, e garantir o funcionamento das instalações por forma a que os produtos ou serviços cumpram os critérios instituídos pelo controlo de qualidade e padrões pré-estabelecidos pelas empresas.

A manutenção deve ser encarada como um investimento no futuro. Um equipamento não deve ser reparado só porque esta avariado, mas sim porque o seu operador quer tirar partido dele no futuro.

1.3. Metodologia

Definiu-se inicialmente uma metodologia na qual se destacaram as seguintes etapas para a realização do projeto.

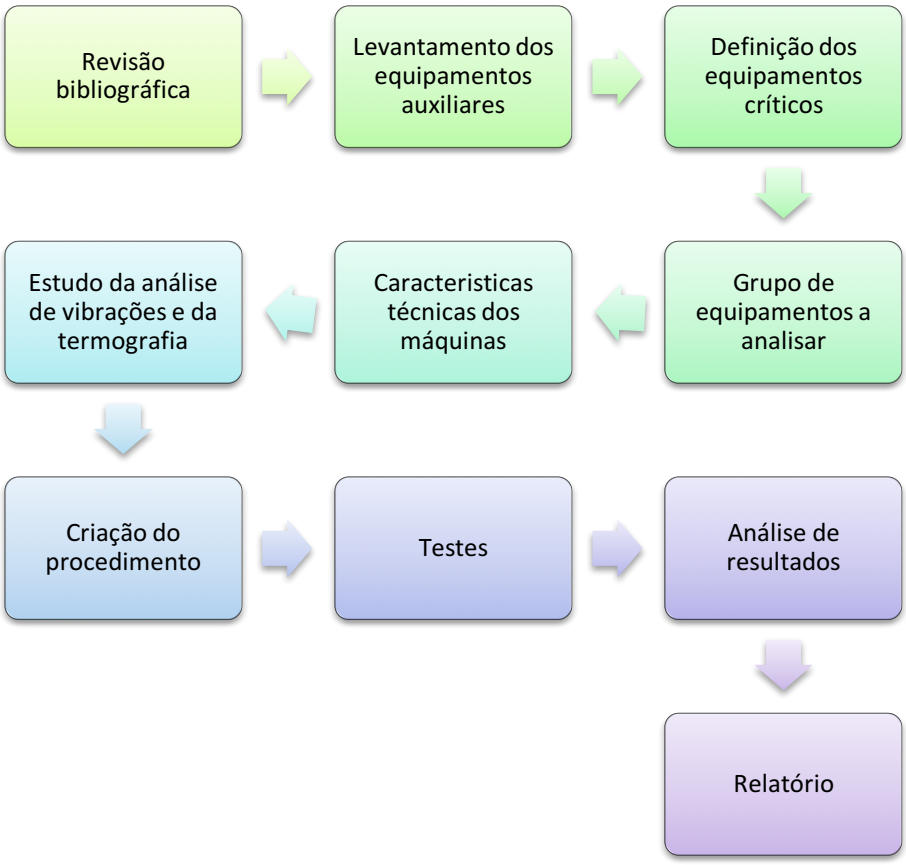


Figura 2 - Metodologia utilizada

Após o período inicial de revisão bibliográfica, procedeu-se ao levantamento dos equipamentos auxiliares à propulsão da instalação do N/M Corvo.

Com auxílio do sistema de gestão de manutenção, SGM, implementado no navio, passou-se de seguida à definição dos critérios de seleção de modo a definir o grupo de equipamentos críticos.

Posteriormente, de acordo com a criticidade e histórico de manutenção, procedeu-se ao estudo da análise de vibrações e da termografia, para cada equipamento em estudo.

Para análise de vibrações foi necessário a recolha de características técnicas das máquinas, que pelo contrário, na análise termográfica, não existiu essa necessidade.

Com a finalidade de verificar o resultado das intervenções efetuadas e gerar a análise de cada um dos equipamento e elaborar um relatório, o estudo divide-se avaliar os equipamentos, propor intervenções e avaliar após a intervenção dos equipamentos propostos.

Partindo desta metodologia foi possível atingir o objetivo principal de definir um plano de manutenção condicionada para monitorização dos equipamentos, e com isto, uma obtenção de redução de custos.

1.4. Motivação desta dissertação

A motivação para o estudo apresentado nesta dissertação passa por aplicar um tipo de manutenção sustentável numa empresa ou indústria, que permita cumulativamente aumentar a disponibilidade dos equipamentos e a produtividade da empresa, potenciando assim, uma redução dos impactos financeiros associados à manutenção.

Dentro do campo da manutenção, serão estudadas técnicas de controlo de condição dos equipamentos que poderão trazer inúmeros benefícios para um gestor da manutenção.

A quantidade de dados gerados por sensores lança também um desafio que consiste em agregar os dados para que venham a ser utilizados num sistema de apoio à decisão.

1.5. Objectivos

Os objetivos que se pertendem atingir nesta dissertação são apresentados em seguida.

- ✓ De acordo com o histórico de manutenção, selecionar os equipamentos auxiliares que se revelem mais importantes à navegabilidade.
- ✓ No âmbito da manutenção preventiva condicionada, aplicar duas técnicas de controlo de condição.
- ✓ Obter uma representação gráfica, facilmente interpretável, que permita resumir a informação da condição do equipamento.
- ✓ Realizar uma análise de resultados, que permita encontrar quais as avarias que se mostrem mais difíceis de identificar e quais as mais severas do ponto de vista das vibrações.
- ✓ Através da análise termógrafica observar desapertos e desiquilíbrios de fase de equipamentos elétricos.
- ✓ Criar um histórico de manutenção útil para trabalhos futuros.

1.6. Organização da Dissertação

A presente dissertação organiza-se em seis capítulos onde se explana o estudo efetuado.

O primeiro capítulo é constituído por uma breve introdução sobre a marinha mercante portuguesa e a evolução da manutenção até aos dias de hoje. Descreve-se também o projeto realizado, os objetivos e metodologia utilizada.

O segundo capítulo refere-se a um enquadramento teórico no qual se desenvolve o tema da manutenção, focando o impacto económico, os tipos de manutenção, vantagens e desvantagens.

No terceiro capítulo são apresentadas as características técnicas dos equipamentos, os cálculos efetuados e os resultados referentes ao primeiro estudo da análise de vibrações, bem como, o estudo termográfico efetuado.

Quanto ao quarto capítulo apresentam-se os resultados referentes à segunda fase de estudo, pós intervenção técnica e a continuação do estudo termográfico a alguns equipamentos.

No capítulo quinto, com base no fundamento teórico, é apresentada a análise crítica dos resultados obtidos.

Finalmente, no sexto capítulo é possível retirar conclusões relativas ao desenvolvimento do projeto. No mesmo capítulo surgem algumas sugestões de trabalhos que possam ser úteis futuramente.

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1. Impacto da manutenção

Segundo a norma EN 13306:2010, versão portuguesa, manutenção é definida como a "Combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que ele pode desempenhar a função requerida.". A manutenção pode ser entendida como o conjunto de procedimentos que tem por objetivo o bom funcionamento de um equipamento, maximizando o seu tempo de vida útil, reduzindo as paragens de produção devidas a avarias, aumento da disponibilidade, bem como assegurar os níveis de qualidade do trabalho prestado pelos mesmos e se possível antecipando eventuais falhas.

A disponibilidade, a qualidade e eficiência das máquinas/equipamentos produtivos, têm um papel determinante na competitividade da empresa. Isto significa que a área da Manutenção desempenha um papel fundamental ao qual é necessário cada vez mais atenção. Atualmente com o aumento de competitividade dos mercados é necessário que as empresas maximizem a eficiência dos seus sistemas e implementem sistemas de gestão da manutenção que conduzam ao aumento da produtividade. Por outro lado, as tarefas habituais da manutenção são complementadas pelas tarefas associadas a critérios de segurança, qualidade, preservação do meio ambiente, economia energética, eficácia, optimização dos processos industriais e à formação dos recursos humanos e financeiros (figura 3).



Figura 3 - Input's / Output's da manutenção [6]

A expectativa do consumidor relativamente ao desempenho dos produtos ou sistemas é bastante alta e com tendência a que produtos simples, como eletrodomésticos ou dispositivos mecânicos funcionem sem avarias. Para sistemas mais complexos, como sistemas informáticos ou mesmo os automóveis que conduzimos, a maioria dos consumidores tolera muito pouco falhas.

Existem muitos fatores que afectam a fiabilidade, sendo os mais importantes, os ligados ao projecto, selecção de materiais, processos de fabrico e operação dos sistemas de manutenção. A manutenção lida essencialmente com acções tendentes a reduzir a probabilidade de falha dos sistemas, ou a reposicionar um sistema em falha no seu estado operacional.

De acordo com Souris [30], os custos gerados pela função manutenção podem ser comparados a um iceberg, em que a parte visível, ou os custos diretos, são os que correspondem aos custos com a mão de obra, as ferramentas, os sobressalentes, pelas taxas horárias de intervenção e pelos materiais de consumo aplicados. Por sua vez, a parte invisível do iceberg, será composta pelos custos indiretos, ou seja, pelos custos inerentes à perda da produção provocada pela paragem de equipamentos e, comparando com os custos diretos, serão mais difíceis de quantificar, dado representar a maior fatia dos custos, podendo ser identificados, e contabilizados genericamente, pelas perdas na produção e pela indisponibilidade do equipamento, figura 4.

Existe portanto um grande potencial de redução de custos, quando adoptadas as políticas adequadas de manutenção.



Figura 4 - Custos de manutenção [30]

De uma forma geral, uma gestão de topo considera a manutenção como um custo necessário para o bom funcionamento dos equipamentos.

Segundo Ferreira [11] os custos de perda de produção englobam:

- ✓ Custos de perdas dos produtos não fabricados, das matérias-primas em curso de transformação, perda de qualidade, perda de produtos desclassificados;
- ✓ Custos de mão de obra perdida;
- ✓ Custos de amortização dos equipamentos parados;
- ✓ Despesas induzidas nomeadamente prazos não conseguidos (penalidades, perda de cliente, fraca imagem) e perda de qualidade na fabricação;
- ✓ Despesas com o arranque do processo de produção.

É de salientar que o custo total de manutenção varia consoante o nível de manutenção. O custo ótimo corresponde a um equilíbrio entre os custos da manutenção preventiva e os custos da manutenção corretiva. Manter este equilíbrio é uma dificuldade para muitas organizações.

2.2. Indicadores de desempenho

A avaliação da situação real e atual na qual a empresa se encontra é crucial. Para que isso aconteça são precisos métodos para medir o desempenho que permitam uma avaliação constante das diversas fases de vida do equipamento, para posteriormente comparar os diferentes momentos.

Um indicador de desempenho permite dar uma indicação sobre uma determinada característica ou acontecimento. Estes possibilitam a medição da eficácia das ações e das diferenças entre as previsões e os resultados operacionais.

Os indicadores mais importantes na manutenção são: Fiabilidade; MTBF (Mean Time Between Failures); MTTR (Mean Time to Repair) e Disponibilidade. Estes conceitos serão desenvolvidos de seguida.

2.2.1. Fiabilidade

Define-se fiabilidade de um equipamento como sendo a capacidade de um produto ou equipamento cumprir as funções, ou de apresentar qualidade, para que foi projetado, ao longo do tempo. A qualidade é uma propriedade que pode alterar-se ao longo da vida de um produto.

Definindo-se qualidade de um produto como a sua conformidade ou adequação a uma determinada especificação no momento em que se conclui a sua produção, poder-se-á depreender

que fiabilidade é a capacidade que o equipamento tem de manter a qualidade do trabalho que executa durante a sua vida útil.

A fiabilidade de um produto é determinada nas fases de conceção, ou de projeto, em que são definidas as formas, dimensões e materiais, e de produção. Durante a segunda fase, a produção, é determinante a qualidade dos materiais e processos utilizados.

Na fase de exploração de um equipamento, o conhecimento da fiabilidade de um equipamento permite escolher o método de manutenção mais adequado. Nesta fase da sua vida, a fiabilidade do equipamento só poderá ser melhorada pela substituição de alguns componentes por outros mais fiáveis, ou pela criação de redundâncias.

A informação necessária ao cálculo da fiabilidade pode provir de três fontes:

- ✓ Fabricantes;
- ✓ Utilizadores;
- ✓ Bases de dados.

Num ensaio destrutivo, concebido pelos fabricantes, a amostra é colocada em funcionamento até que todos tenham falhado. Ao fim de cada intervalo de tempo, ciclos de funcionamento, ou de distância percorrida, é registado o número de bens que falharam no intervalo. A tabela assim construída permite calcular e definir a fiabilidade, R(t), do bem ensaiado, como a probabilidade dele se encontrar ainda em funcionamento ao fim do tempo, do número de ciclos de funcionamento, da distância, etc.

$$R(t) = \frac{Nº\ de\ elementos\ sobrantes\ até\ ao\ tempo\ t}{Nº\ de\ elementos\ no\ inicio\ do\ ensaio} \quad (equação\ 1)$$

Portanto, a função fiabilidade, expressa-se matematicamente como a probabilidade do bem não falhar num dado período. A probabilidade de falha nesse período, ou seja, a infiabilidade, função F(t) (Failures) é complementar.

$$F(t) = \frac{Nº\ de\ elementos\ com\ falha\ até\ ao\ tempo\ t}{Nº\ de\ elementos\ no\ inicio\ do\ ensaio} \quad (equação\ 2)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (equação\ 3)$$

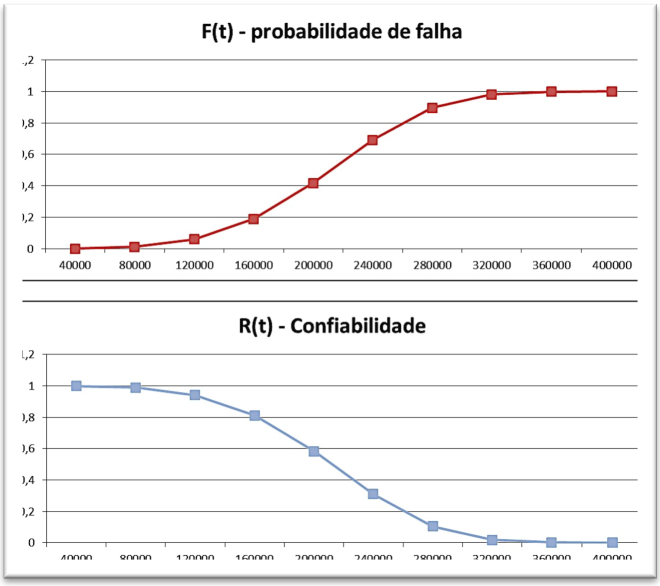


Figura 5 - Curva caracteristica de fiabilidade e probabilidade de falha

Até que um determinado órgão funcione em condições tais que proporcionem a maior eficácia, segurança e economia de recursos, devem ser percorridas três etapas:

I. Medir a fiabilidade, deduzindo a expressão adequada a cada órgão, desde os seus componentes elementares, tendo em consideração as suas inter-relações, até ao nível de todo o conjunto;

II. Melhorar a fiabilidade, compreendendo as interdependências da fiabilidade do órgão e procurando as formas mais adequadas de aumentar a fiabilidade global, respeitando compromissos de custos e segurança;

III. Otimizar, maximizando a fiabilidade do órgão para dimensões, custo e disponibilidade prescrita ou para uma fiabilidade fixada como objetivo, minimizar restrições.

Ainda relacionadas com a fiabilidade de um bem ou equipamento, usam-se outras duas medidas:

- ✓ Função densidade de probabilidade de falha

$$f(t) = \frac{Nº\ de\ falhas\ em\ \Delta t}{\Delta t \times (Nº\ de\ elementos\ no\ inicio\ do\ ensaio)} \quad (equação\ 4)$$

- ✓ Função de risco, ou taxa instantânea de falhas:

$$\lambda(t) = \frac{Nº\ de\ falhas\ em\ \Delta t}{\Delta t \times (Nº\ de\ sobreviventes\ no\ inicio\ do\ intervalo)} \quad (equação\ 5)$$

A representação gráfica da taxa instantânea de falhas, λ(t), e conhecida por "curva da banheira" devido à sua forma característica, trata-se de uma representação gráfica simples, na qual se divide a vida de um produto em três partes: período de avarias/falhas precoces; vida útil (incidência de falhas é relativamente estável no tempo) e período de degradação (produto começa a apresentar desgaste acentuado, falhas passam a ocorrer com maior frequência).

Assim, de modo mais detalhado referem-se as três partes do gráfico abaixo representado, gráfico 2. Na primeira zona, a taxa de avarias é mais elevada devido ao facto dos produtos serem novos, aliado ao facto dos operadores das linhas de produção estarem ainda em fase de adaptação e existirem problemas de transporte ou instalação.

Relativamente à segunda fase (vida útil) corresponde à maturidade, neste estágio a distribuição de avarias é mais uniforme ao longo do tempo, e é por isso o período de maior rendimento do equipamento. As falhas nesta fase são causadas por acontecimentos aleatórios, não havendo, geralmente, degradação prévia visível.

Finalmente a última fase, designada de período de degradação, na qual se assinala o aproximar do fim de vida útil do equipamento. O aumento da taxa de avarias revela uma degradação acelerada, sendo que o equipamento já não cumpre a função para a qual foi desenvolvido.

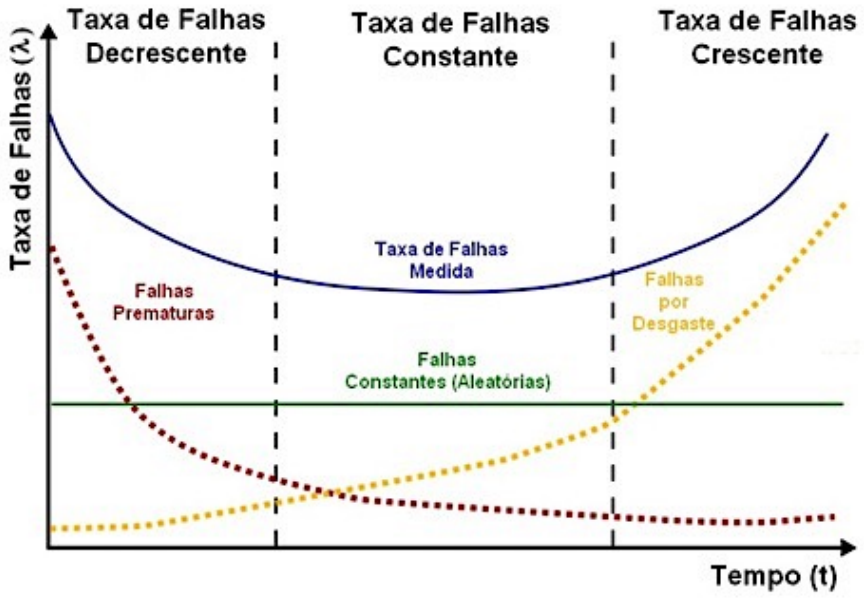


Figura 6 - Curva da banheira

2.2.2. MTBF (Mean Time Between Failures)

Este indicador refere-se ao tempo médio entre falhas e exprime o período de tempo entre duas avarias consecutivas, ou seja, o tempo recolhido entre o fim da última falha e o início da próxima, dentro do tempo em que o equipamento deveria estar em funcionamento.

Este parâmetro é obtido através do inverso da estimativa da taxa de falhas, como mostra a equação 6.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (equação\ 6)$$

2.2.3. MTTR (Mean Time To Repair)

Com a avaliação da fiabilidade procura-se o projeto de sistemas que funcionem um determinado período de tempo sem falhas. Na manutibilidade procura-se conceber sistemas que, em caso de falha, sejam reparados o mais depressa possível.

A manutibilidade é uma característica de projeto. Traduz a capacidade de um sistema ser mantido em boas condições operacionais, ou seja, de receber manutenção.

São várias as formas de medir a manutibilidade. A manutibilidade pode ser expressa através de:

- ✓ Frequência de manutenção: probabilidade de um sistema não necessitar de mais que n intervenções de manutenção num determinado intervalo de tempo;
- ✓ Tempo de manutenção: probabilidade que a duração da manutenção seja inferior a um determinado intervalo de tempo, quando realizada nas condições e com os meios previstos;
- ✓ Custo de manutenção: probabilidade do custo da manutenção de um sistema não exceder um determinado valor durante um determinado período, quando é operado e mantido em condições pré-estabelecidas.

O indicador mais comum da manutibilidade de um sistema é o tempo de manutenção.

O MTTR, Mean Time To Repair, exprime o tempo médio necessário para a reparação de uma avaria e é estimado através da divisão do somatório dos tempos de reparação num dado período (TRi) pelo número de avarias ocorridas nesse mesmo período.

$$MTTR = \frac{\Sigma TR_i}{Número\ de\ avarias} \quad (equação\ 7)$$

O conceito pode aplicar-se às ações de manutenção corretiva, *MTTRc*, ou a ações de manutenção preventiva *MTTRp*. Estes tempos não incluem actividades logísticas nem administrativas.

O tempo de inatividade de um sistema devido a uma falha, MDT (Maintenance Down Time), é o intervalo de tempo entre a deteção de uma avaria e o momento em que, depois de reparado, o bem retoma o bom funcionamento. No conceito de MDT, incluem-se os seguintes tempos:

- ✓ Tempo de espera;
- ✓ Tempo gasto na deteção da avaria;
- ✓ Tempo de diagnóstico da avaria;
- ✓ Tempo de acesso ao órgão avariado;
- ✓ Tempo de espera do fornecimento da peça;
- ✓ Tempo de substituição e/ou reparação;
- ✓ Tempo de montagem;
- ✓ Tempo de controlo e arranque do equipamento.

2.2.4. Disponibilidade

A combinação de valores elevados de fiabilidade e manutibilidade num sistema asseguram elevada disponibilidade do mesmo.

A disponibilidade, *D,* é uma característica apenas dos sistemas reparáveis, que pode ser interpretada como a fração de tempo durante a qual um determinado equipamento esteve efetivamente em boas condições de funcionamento ou, através da inferência estatística, a probabilidade de o equipamento se encontrar em boas condições operacionais num determinado instante futuro.

A disponibilidade está dependente de vários fatores, como refere Ferreira [11]:

- ✓ Número de avarias;
- ✓ Rapidez com que as avarias são reparadas;
- ✓ Tipo de manutenção;
- ✓ Quantidade e qualidade dos meios à disposição;
- ✓ Correlação entre avarias.

Se, durante um determinado intervalo de tempo *(T)*, um sistema funcionar corretamente durante uma parte do tempo *(Tu)*, e se encontrar inoperacional *(Tp)* em manutenção corretiva ou preventiva, ou aguardando por processos logístico e administrativos, a disponibilidade operacional é descrita matematicamente por:

$$D = \frac{T_u}{T_u + T_p} \quad (equação\ 8)$$

2.3. Tipos de manutenção

Na política de manutenção aplicada num contexto industrial será sempre mais viável planear uma ação do que não a planear. Contudo, nem sempre uma manutenção planeada traz benefícios económicos ao nível dos equipamentos. É necessário fazer uma avaliação custo/beneficio para perceber qual o tipo de manutenção que mais se adqua. Em determinados casos, nos quais não se verifique vantajosa a utilização da manutenção planeada, deve então optar-se pela realização de uma manutenção não planeada.

A manutenção divide-se em dois grupos principais, um em que se adota uma manutenção planeada, e outro uma manutenção que não é planeada [6].

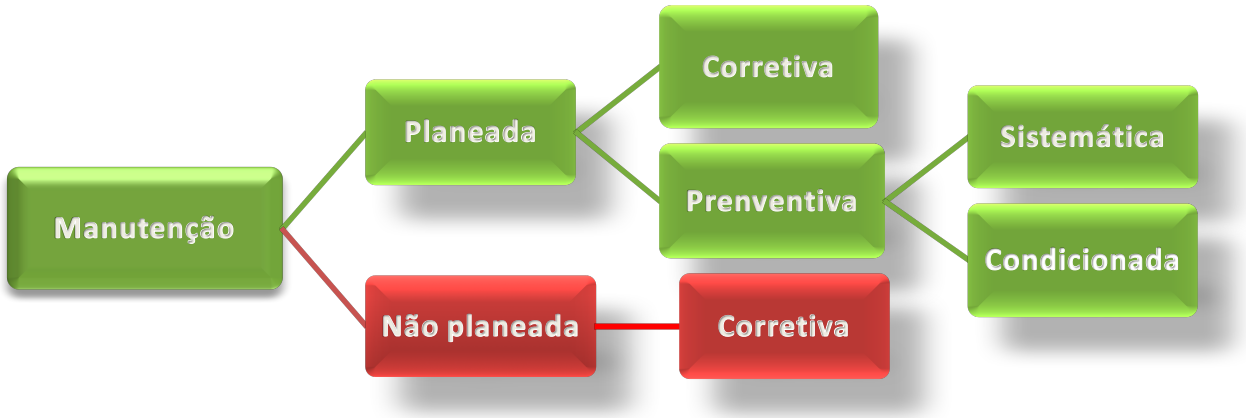


Figura 7 - Tipos de Manutenção

2.3.1. Manutenção Planeada

A manutenção planeada é um tipo de manutenção em que se prepara, devidamente as intervenções a serem realizadas, em termos de elementos de reserva, tempos de entrega e disponibilidade do equipamento. Esta pode trazer mais benefícios económicos, pois uma vez

feito o planeamento da intervenção, existe um maior controlo dos equipamentos, um aumento da vida útil dos mesmo e redução de perdas inesperadas de produção. De acordo com a figura 5 acima a manutenção planeada divide-se em preventiva e corretiva.

A manutenção preventiva tem como função prevenir paragens não planeadas que, se os equipamentos não fossem reparados, resultariam em atividades de carácter corretivo. Esta é baseada no estado do equipamento, ambiente em que se encontra, dados fornecidos pelo fabricante e tipo de utilização. Os objetivos da manutenção preventiva são a redução do número de avarias em serviço (aumentando a disponibilidade dos equipamentos), diminuição dos tempos de intervenção e diminuição do número total de intervenções corretivas (diminuindo o custo da manutenção corretiva). A manutenção preventiva apresenta vantagens significativas em termos de redução do número de avarias, decréscimo do número de paragens na produção, redução nos custos da intervenção, maior durabilidade dos equipamentos e maior segurança nos equipamentos e no processo.

Por sua vez a manutenção preventiva divide-se em dois ramos:

- ✓ Manutenção preventiva sistemática;
- ✓ Manutenção preventiva condicionada (manutenção baseada na condição do equipamento).

2.3.1.1. Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha. O objetivo passa por restabelecer o funcionamento do equipamento ou instalação.

A manutenção corretiva planeada é utilizada quando existe uma falha no equipamento ou máquina e a sua manutenção não é urgente, ou por outro lado, em casos em que a avaria não afeta o funcionamento da máquina ou instalação. Esta manutenção é aplicável caso as avarias não originem problemas de segurança e não afetem a produção.

2.3.1.2. Manutenção preventiva sistemática

A manutenção preventiva sistemática é efetuada de forma periódica, em intervalos de tempo estabelecidos. O objetivo é manter o sistema num estado de funcionamento equivalente ao inicial. Esta manutenção apresenta algumas vantagens e desvantagens. Entre as vantagens, refira-se a possibilidade de obter o custo, à priori, de cada operação de manutenção, em simultâneo as operações e paragens são programadas de acordo com a produção. Em relação às desvantagens, existe uma maior possibilidade de erro humano, dada a frequência de intervenções, as paragens

sistemáticas, ainda que planeadas, têm um custo elevado, sendo também elevado o próprio custo de cada operação, devido à periodicidade.

2.3.1.3. Manutenção preventiva condicionada

A manutenção preventiva condicionada consiste na técnica de monitorização da tendência e modo de falha de um equipamento, ou componente, pelo acompanhamento de parâmetros indicativos da sua condição.

Em termos práticos uma técnica de manutenção condicionada deve atender aos seguintes requisitos:

- ✓ Permitir a colecta de dados com o equipamento em funcionamento, com o mínimo de interferência possível no processo de produção;
- ✓ Permitir a colecta dos dados que possibilitem a análise de tendência.

Alguns indicadores importantes como, temperatura, pressão, vibração, ruídos, desgastes e corrosão servem como indicadores à antecipação das falhas dos equipamentos.

Segundo Nemésio Sousa [23], a manutenção condicionada consiste basicamente, em:

- ✓ Escolha dos equipamentos a serem monitorizados
- ✓ Determinação dos parâmetros a serem avaliados
- ✓ Escolha da metodologia e instrumentação adequadas
- ✓ Utilização de sistemas avançados de planeamento, programação e controlo da manutenção
- ✓ Colecta de dados para observação e deteção do defeito em desenvolvimento com o equipamento em funcionamento
- ✓ Coleta dos dados que possibilitem o diagnóstico e análise da tendência
- ✓ Análises periódicas das variações destes parâmetros
- ✓ Determinação dos parâmetros a serem acompanhados
- ✓ Diagnóstico do estado do equipamento com base nesta análise
- ✓ Desenvolver um sistema de informações rápido e eficiente que forneça dados históricos sobre os equipamentos submetidos ao acompanhamento da condição.

Aplicando uma manutenção preventiva condicionada podemos inumerar as seguintes vantagens e devantagens:

- ✓ Aumento da longevidade dos equipamentos
- ✓ Controlo mais eficaz de peças de reserva
- ✓ custo menor de reparação

- ✓ aumento de produtividade
- ✓ Aperfeiçoamento da manutenção, por forma a que diminuie, ou em alguns casos até elimine, a necessidade de equipamentos de reservas e stock de peças sobressalentes
- ✓ Redução de 15% a 20% do custo, quando comparada com a manutenção clássica;
- ✓ Na análise dos resultados é exigida capacidade técnica para avaliar a informação medida pelos sensores.

Radiações Ionizantes Raios X e Gamagrafia	**Energia Acústica** Ultrassom e Emissão acústica
Energia Eletromagnética Partículas magnéticas Correntes parasíticas	**Fenômenos de Viscosidade** Líquidos penetrantes
Inspeção Visual Endoscopia ou Boroscopia	**Análise de Vibrações** Nível global, Espectro de vibrações Pulso de choque
Detecção de Vazamentos	
Análise de óleos lubrificantes ou isolantes Viscosidade, Número de neutralização (acidez ou basicidade), Teor de água, Insolúveis, Contagem de partículas Metais por espectrometria por infravermelho Cromatrografia gasosa, Tensão interfacial, Rigidez dielétrica, Ponto de fulgor	**Análise de Temperatura – Termometria** Termometria convencional Indicadores de temperatura Pirometria de radiação Termografia
Ferrografia Ferrografia quantitativa Ferrografia analítica	**Verificações de Geometria** Metrologia convencional Alinhamento de máquinas rotativas
Ensaios Elétricos Corrente, Tensão, Isolação, Perdas dielétricas, Rigidez dielétrica, Espectro de corrente ou tensão	**Forças** Células de carga, Teste de pressão Teste hidrostático, Teste de vácuo, Detecção de trincas

Tabela 1 - Técnicas de manutenção preventiva condicionada [4]

2.3.2. Manutenção Corretiva não planeada

A manutenção corretiva não planeada corrige as condições de funcionamento de determinado equipamento. Este tipo de manutenção apresenta como desvantagens:

- ✓ Custos elevados, apesar de não se verificarem gastos em manutenção até que ocorra uma avaria;
- ✓ Redução da disponibilidade do equipamento;
- ✓ Perda de produção;
- ✓ Possíveis incidentes (acidentes ou danos ao meio ambiente);
- ✓ Necessidade de stock´s.

2.4. Análise de vibrações (técnica da manutenção preventiva condicionada)

As máquinas rotativas são equipamentos com algum desgaste, contudo, estes equipamentos estão presentes em grande número na indústria atual. Refira-se que um bom plano de manutenção baseada na condição deve incluir diversas tecnologias de monitorização não havendo exclusividade relativamente ao equipamento. Como foi referido anteriormente, estas técnicas incluem a monitorização da vibração, termografia, inspeção visual, ultrassom e outras técnicas de ensaios não destrutivos.

Esta questão tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias nas áreas dos sensores de medição, instrumentação virtual, softwares de processamento digital, simuladores de sistemas dinâmicos e análise de dados. Além disso, muitos estudos nestas áreas têm sido desenvolvidos com o objectivo de facilitar a monitorização das máquinas e diagnosticar defeitos em tempo útil para que a manutenção possa intervir [7].

A utilização da análise de vibrações possibilita determinar a condição atual do equipamento, partindo da interpretação ou análise da vibração. Muitas vezes os problemas de uma máquina ou equipamento manifestam-se através de vibrações ou da alteração de uma frequência característica.

2.4.1. Vibração mecânica

Vibração mecânica é o fenómeno observado quando uma partícula executa movimentos em torno de uma posição de equilíbrio. Existem várias expressões matemáticas que definem o movimento vibratório, umas simples, outras com um grau elevado de complexidade. Físicamente, o fenómeno de vibração é o resultado da troca de energia entre dois elementos de um mesmo sistema.

De modo a obter e analisar os dados é essencial compreender três parâmetros: frequência de vibração, amplitude e fase.

- ✓ Frequência é o número de ciclos que num evento acontece num determinado período, medidos na unidade Hz - Hertz. A investigação dos sinais através da frequência é a técnica fundamental no diagnóstico de vibrações.
- ✓ Amplitude é a intensidade que acontece num determinado evento mostrando a criticidade dos eventos presentes.

- ✓ Fase: informa o ângulo em que o sinal se apresenta através da reacção física da máquina ou componente.

2.4.2. Nível de vibração

O nível de vibração de um espectro, em função do tempo, pode ser medido em valor Pico a Pico, valor de Pico e valor RMS - Root Mean Square, figura 6.

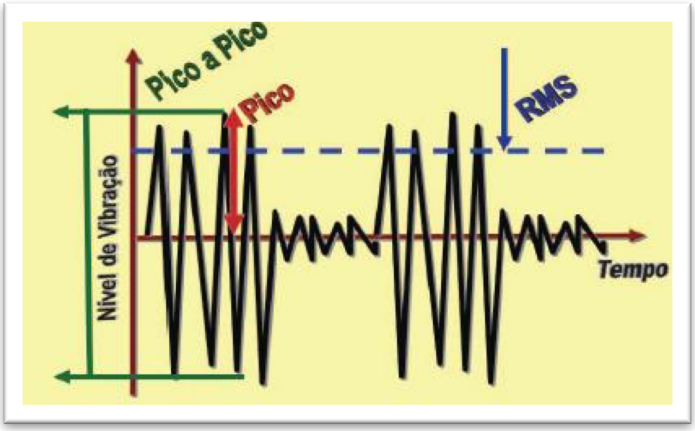


Figura 8 - Nível de Vibração [26]

O valor Pico a Pico é o percurso máximo da onda, usado para identificar a falha não só prematuramente, mas também, numa fase mais avançada, este não leva em consideração o histórico da onda no tempo. Por sua vez o valor de Pico também não tem histórico e é utilizado para identificar oscilações de curta duração, indica somente a ocorrência do pico. Finalmente o valor RMS é a medida de nível mais relevante, porque leva em consideração o histórico da onda no tempo e regista a severidade da energia contida no sinal. Indica a capacidade destrutiva da vibração presente.

2.4.3. Parâmetros de vibração

Os parâmetros para medir os níveis de vibração são: deslocamento, velocidade ou aceleração. Qualquer que seja o parâmetro considerado, deslocamento, velocidade ou aceleração, a forma e o período de vibração permanecem similares. Derivando o deslocamento, obtemos a velocidade e derivando a velocidade, obtemos a acelaração com uma diferença de fase entre os três parâmetros de 90º (Figura 7).

Os parâmetros de vibração são universalmente medidos em unidades métricas de acordo com as recomendações da ISO, sendo:

- ✓ Deslocamento: m, mm, µm;
- ✓ Velocidade: m/s, mm/s;
- ✓ Aceleração: m/s^2, km/s^2.

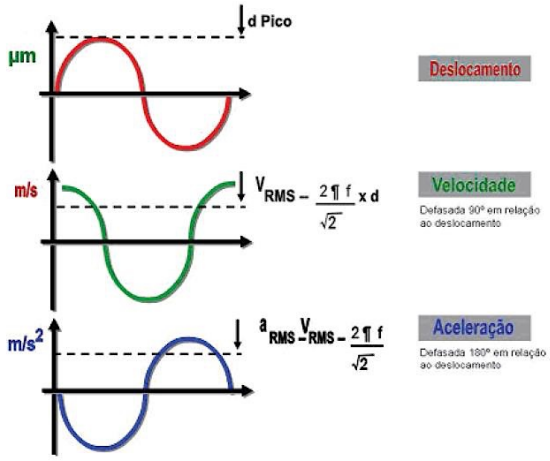


Figura 9 - Parâmetros de vibração [26]

Os sensores de vibração piezoelétricos transformam o sinal de vibração mecânica num sinal eléctrico, sendo este interpretado através do equipamento de medição ou pelo software. Por norma estes equipamentos medem os três parâmetros, convertendo, através de integradores eletrónicos o sinal medido pelo sensor no parâmetro escolhido pelo utilizador.

O deslocamento evidencia as energias de vibrações que ocorrem em baixa frequência (até 10 Hz, ou seja, 600 RPM). Este é utilizado para a identificação de desequilíbrio em partes de máquinas rotativas com amplitudes elevadas na frequência de rotação de um eixo. Devido a isto, a equilibragem de campo poderá ser efectuada correctamente até 20 Hz (1.200 RPM).

A velocidade de vibração é o parâmetro menos influenciado por ruídos de baixa ou alta frequência, sendo por isso, o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 Hz e 1.000 Hz e detetar os seguintes problemas:

- ✓ Falta de rigidez mecânica;
- ✓ Desequilíbrio;
- ✓ Desalinhamento paralelo e angular;
- ✓ Empeno de veios;
- ✓ Folgas;
- ✓ Desgastes em acoplamentos;
- ✓ Problemas relativos às pás;

- ✓ Problemas eléctricos (ex: escorregamento).

A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, ou seja, é a rapidez que a velocidade de um corpo varia. A sua aplicação é recomendada na monitorização de frequências entre 1.000 Hz e 10.000 Hz para identificar os seguintes problemas:

- ✓ Engrenamento;
- ✓ Falhas em rolamentos;
- ✓ Cavitação;
- ✓ Problemas eléctricos (ex: frequências de ranhuras).

2.4.4. Sensores de vibração

Os sensores de vibração são dispositivos que fazem a codificação de um sinal mecânico num sinal eléctrico representativo. Existem basicamente dois tipos de sensores: relativo e absoluto.

O sensor relativo é utilizado na medição do deslocamento, não havendo contacto entre o sensor e o equipamento, apenas uma variação no campo magnético irá provocar uma variação de tensão que posteriormente é convertida numa distância. Este sensor é o que tem maior aceitação na monitorização contínua de máquinas rotativas.

O sensor de velocidade é composto por uma carcaça, normalmente de alumínio, dentro da qual estão alojados uma bobina, um imã permanente e duas molas. O imã fica suportado pelas duas molas, uma em cada extremidade, e esse conjunto é colocado no interior da bobina. Quando o sensor é encostado numa superfície que apresenta vibração, ocorre um movimento relativo entre o imã e a bobina. Esse movimento corta as linhas de fluxo magnético, induzindo uma tensão proporcional à velocidade de vibração (figura 8).

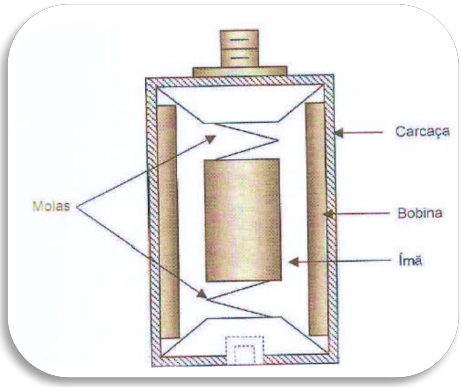


Figura 10 - Sensor de velocidade

Com uma instrumentação baseada no uso de acelerómetros, o utilizador fica livre para escolher entre aceleração, velocidade ou deslocamento, como parâmetros de medida, bastando para isso que o medidor de vibração possua circuitos integradores, que transformam sinais proporcionais à aceleração do movimento vibratório em sinais proporcionais a velocidade e ao deslocamento.

O acelerómetro, quando fixo a uma superfície vibrante, produz nos seus terminais de saída uma tensão que é proporcional à aceleração a que está submetido, ou seja, o seu princípio de funcionamento está na utilização de discos cerâmicos piezoeléctricos, que por sua vez, possuem a propriedade física de gerar descargas eléctricas quando solicitados a esforços.

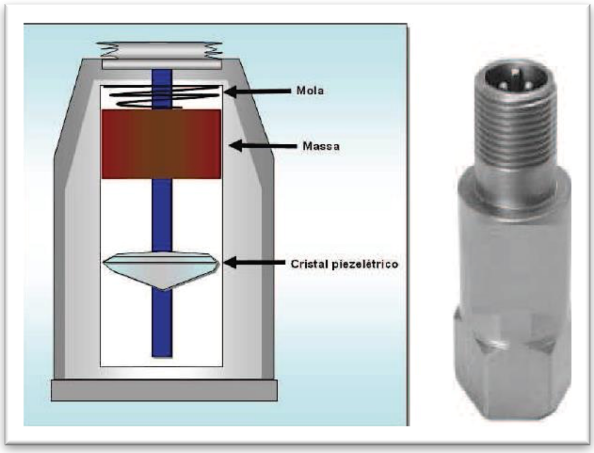


Figura 11 – Acelarómetro [7]

As vantagens de uso do acelerómetro são: ampla faixa de resposta em frequência, peso e dimensões reduzidas, boa resistência a temperaturas (pode atingir altas temperaturas) e preços relativamente baixos. Por outro lado, as desvantagens são: peça sensível (exige cuidados na montagem) e ressonância, pode ser excitada no sensor frequentemente exigindo instalação de filtro passa-baixa [7].

2.4.5. Análise de sinais de vibração

A medição e análise de sinais de vibração possibilitam a identificação de falhas nos estágios iniciais, antes da quebra do equipamento. Este procedimento pode ser ajustado através da utilização de técnicas de análise de sinais, que indicam o nível de vibração da máquina e o componente que apresenta defeito, a partir de frequências previamente conhecidas.

As técnicas de análise de sinais utilizadas para identificação de defeitos em máquinas são: Nível Global, Análise Espectral e Fator de Crista.

A forma mais simples de avaliar o estado vibratório de um determinado equipamento consiste na avaliação a nível global da vibração, valor RMS. Partindo desta análise é possível obter a informação sobre o estado geral do equipamento, pois o nível global de vibração não é mais do que o somatório de todas as frequências num determinado intervalo definido pelo utilizador e assim, ao longo do tempo, podem registar-se estes valores e obter a curva de tendência do equipamento. A curva de tendência é utilizada para observação da evolução do nível global de vibração e são definidos três níveis de criticidade: Normal, onde não há ocorrência de problemas; Alerta, onde ocorre um processo de desgaste não perigoso; e Alarme, onde é necessária a manutenção do equipamento [7].

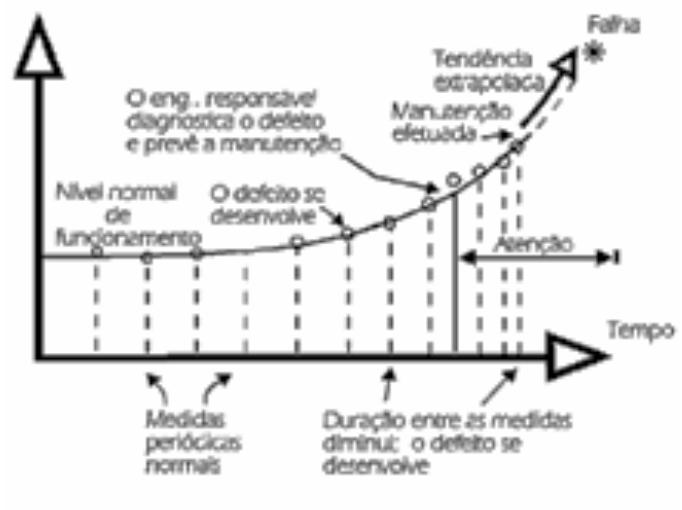


Figura 12 - Curva de tendência com níveis de criticidade [7]

O principal critério da avaliação de máquina rotativa em velocidade RMS é a norma ISO 2372 de 1974, Tabela 2.

NÍVEL	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS			
	CLASSE I Até 15 KW (20 CV).	CLASSE II 15 A 75 KW (20 - 100 CV)	CLASSE III Acima de 75 KW base rígida	CLASSE IV Acima de 75 KW base flexível
	VALOR RMS DA VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO (mm/s).			
A - Bom	até 0,71	até 1,12	até 1,8	até 2,8
B - Satisfatório	0,71 a 1,8	1,12 a 2,8	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1
C - Insatisfatório	1,8 a 4,5	2,8 a 7,1	4,5 a 11,2	7,1 a 18,0
D - Inaceitável	Acima de 4,5	acima de 7,1	acima de 11,2	acima de 18,0

Tabela 2 - Norma ISO 2372

Em relação à análise espectral é necessário compreender que cada componente constituinte de um equipamento tem uma frequência característica. Na análise de vibrações o

método mais utilizado para diagnóstico de avarias é a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformation*, FFT) [7]. Esta tem por base expressões matemáticas que decompõem a vibração de um equipamento nas frequências dos diversos componentes constituintes. Através deste método, a vibração é apresentada na forma de espetro de frequências. Com este é possível determinar a causa de um problema e a sua localização, pois apresenta as frequências de falha de cada componente do equipamento.

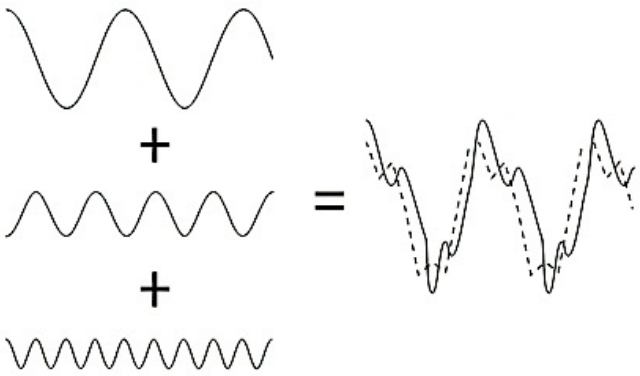


Figura 13 - Exemplo da conjugação da vibração de um equipamento

Por último o Fator de Crista é a relação entre o valor de Pico e o valor RMS do sinal de vibração, conforme a equação.

$$FC = \frac{x_{pico}}{x_{RMS}} \quad (equação\ 9)$$

O Fator de Crista deve ser obtido através de medições periódicas, tal que se possa construir um gráfico de *FC* ao longo do tempo [7]. O Fator de Crista aumenta a partir do momento em que aparecem pequenos defeitos localizados, que fazem com que o valor de pico aumente, e o valor RMS mantém-se estável, aumentando a relação entre ambos os valores. Quando os defeitos passam a ficar mais intensos, o nível de vibração eleva-se, aumentando também os valores de pico e RMS, o que faz com que a relação diminua, Figura 12.

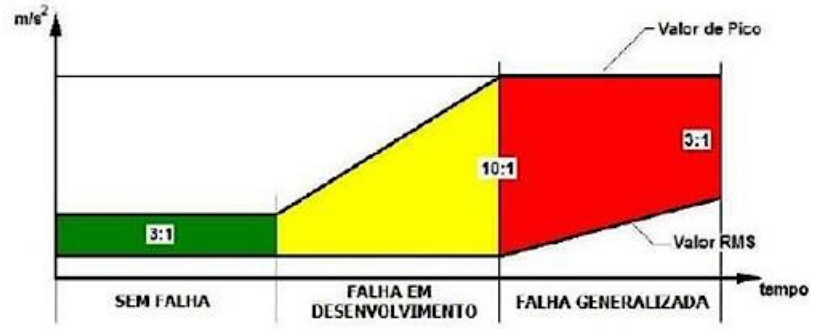


Figura 14 - Variação do Fator de Crista na degradação de um componente [7]

Como se verifica na figura 12, a redução do Fator de crista não é um bom indicador de falhas num estágio de falha severa, pois a relação permanece igual ao estado inicial, sem falha 3:1.

2.4.6. Diagnóstico de avarias

Cada componente de um sistema mecânico produz, consoante as suas características, um sinal vibratório próprio. A conjugação de todos esses sinais gera um movimento vibratório extremamente complexo de um sistema mecânico real. (Figura 11)

O diagnóstico de avarias através da análise de vibrações, consiste em conseguir extrair do sinal emitido pelo sistema, as frequências predominantes no espetro, de forma a identificar a fonte dos problemas e intervir de uma forma mais assertiva. Assim definem-se alguns tipos de avarias comuns em equipamentos rotativos: desequilíbrio; desalinhamento; empeno; folgas e desapertos, defeitos em rolamentos e fluido hidrodinâmico.

Em seguida são abordados os tipos de avarias referidos acima, com o auxílio de exemplos de espetros de frequências.

2.4.6.1. Desiquilíbrio

É uma das falhas mais comuns relacionados com vibrações nas máquinas rotativas. O desequilíbrio existe quando a distribuição de massas num rotor não é uniforme em relação a um eixo de inércia.

Na maioria dos casos deteta-se uma alta amplitude no espetro exatamente na frequência de rotação do equipamento, sendo que nas direções radiais (vertical e horizontal) a sensibilidade é maior. Como a amplitude de vibração é directamente proporcional ao grau de desequilíbrio, se

o valor da massa desequilibradora duplicar, também a amplitude de vibração será o dobro. Este facto é importante, pois permite que a actividade de equilibragem de rotores seja possível.

O desequilíbrio numa máquina rotativa, no caso do ventilador, pode ser resultado da constituição dos seus elementos. As pás do ventilador podem provocar desequilíbrio devido ao desgaste das mesmas com o tempo, sujidade do processo, efeito balanço térmico entre a entrada e saída de fluxo e fixação das pás no rotor, sendo outro fator importante a sua base de fixação ou apoio.

O gráfico 3 apresenta um exemplo prático de desequilíbrio, no qual se pode verificar uma alta amplitude de vibração exatamente na frequência de rotação do equipamento.

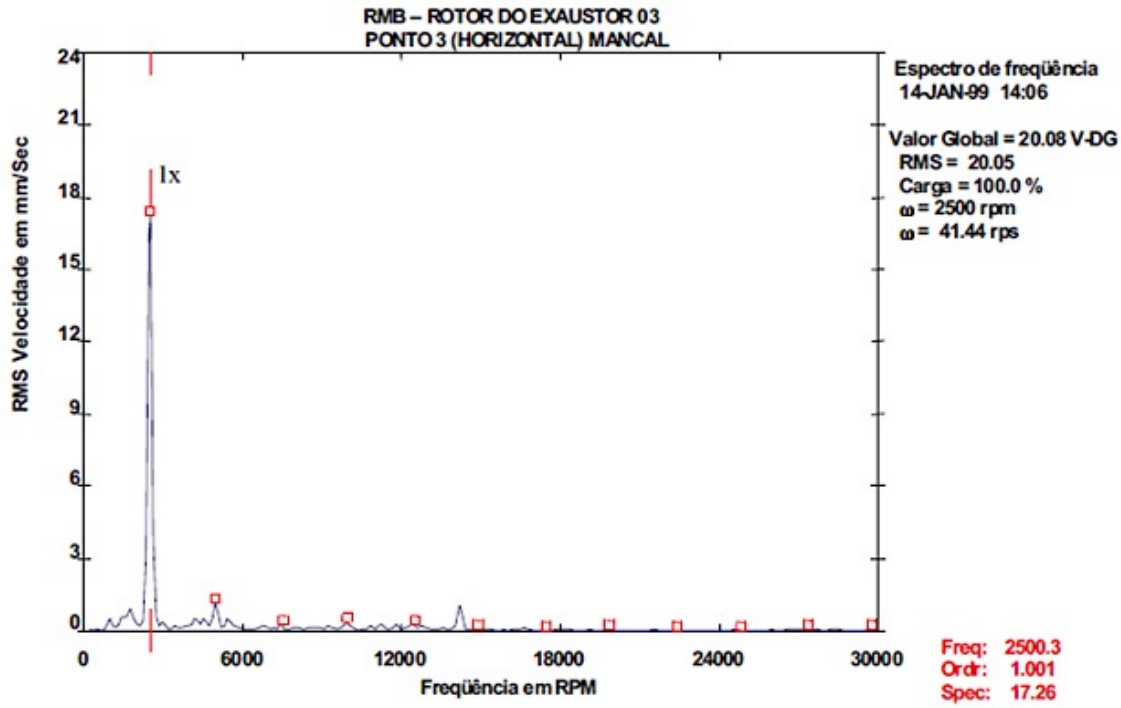


Figura 15 - Espetro com evidência de desequilíbrio no rotor do exaustor [34]

2.4.6.2. Desalinhamento

O desalinhamento é outra grande causa de desgastes prematuros nos componentes dos equipamentos. Este acontece nos pontos de ligação entre os equipamentos e pode ser de três tipos: angular; paralelo e a conjugação dos dois.

Podemos detetar alta vibração na frequência de rotação do equipamento e suas harmônicas.

Desalinhamento ângular: ocorre quando a linha central de dois veios faz um ângulo e se interceptam (Figura 12). Apresenta alta vibração radial no eixo, podendo também apresentar altas vibrações nas harmónicas seguintes.

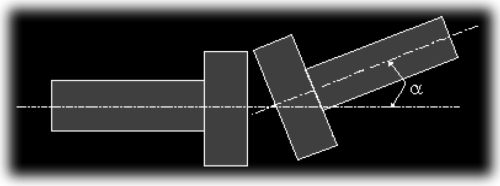


Figura 16 - Desalinhamento angular [31]

O gráfico 4 apresenta um exemplo de um espetro no ponto axial de um motor elétrico com desalinhamento angular, enfatizando-se aos picos de frequência da rotação do motor.

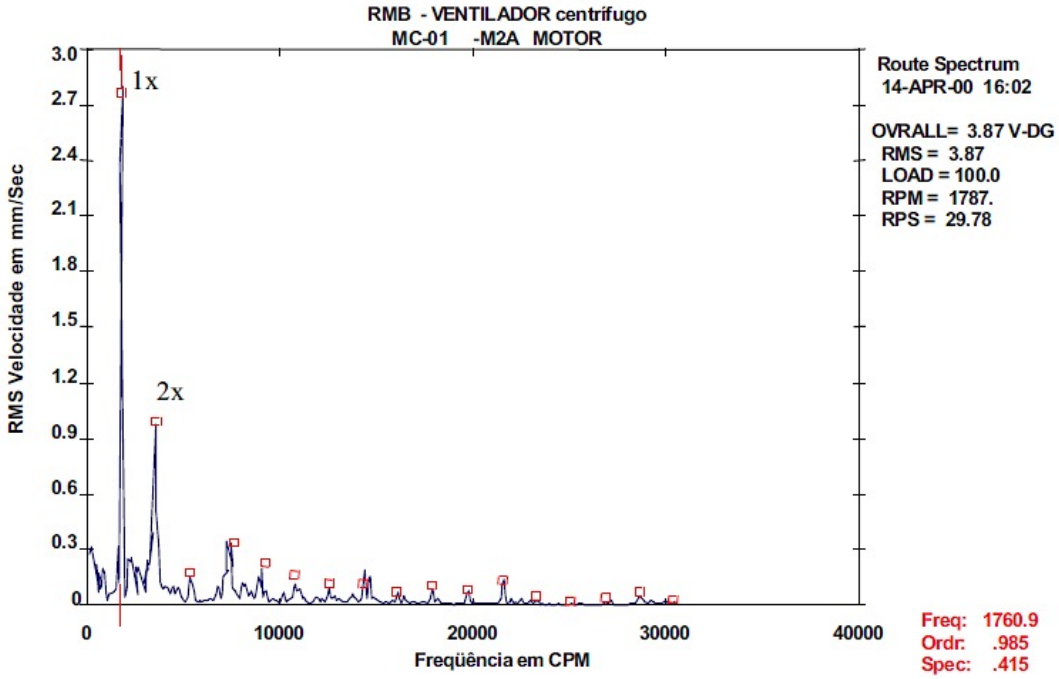


Figura 17 - Espetro representativo de um desalinhamento angular [34]

Desalinhamento paralelo: Apesar de os veios estarem alinhados existe um deslocamento (δ) entre eles. A vibração dominante aparece na direção radial na segunda harmónica, sendo que na direção axial poderá também apresentar alta vibração exatamente na frequência de rotação.

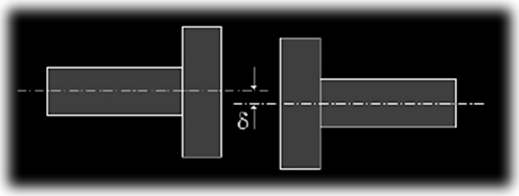


Figura 18 - Desalinhamento paralelo [31]

A Figura 13 representa um esquema de desalinhamento paralelo e o gráfico 5 o espetro correspondente.

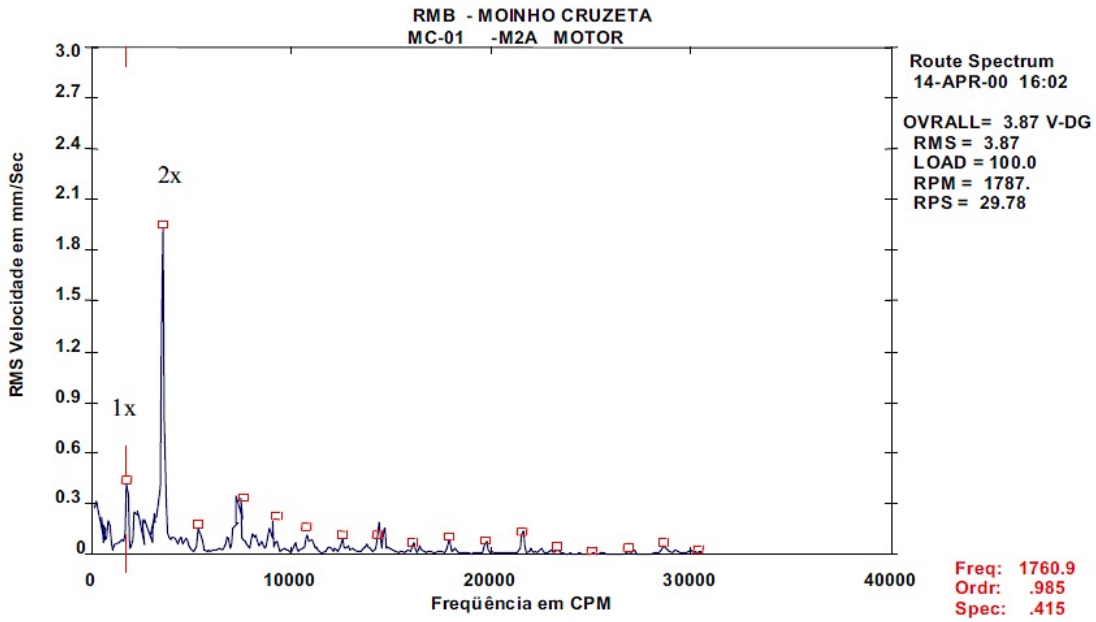


Figura 19 - Espetro representativo de um desalinhamento paralelo [34]

No entanto a forma de desalinhamento mais comum é o desalinhamento combinado (Angular e Paralelo). Este tipo de desalinhamento configura uma sobreposição de efeitos dos dois tipos de desalinhamento anteriores.

2.4.6.3. Empenos

Um eixo empenado comporta-se como um eixo desalinhado, por essa razão a sintomatologia aplicável é a mesma que foi indicada para o desalinhamento.

2.4.6.4. Folgas e desapertos

As folgas mecânicas causam vibrações geralmente em frequências múltiplas e pares da rotação do eixo e também de altas ordens (gráfico 6).

A característica mais importante é o aumento de vibração na direção de fixação, quase sempre na vertical, seguida do aparecimento de uma vibração em 1/2x RPM.

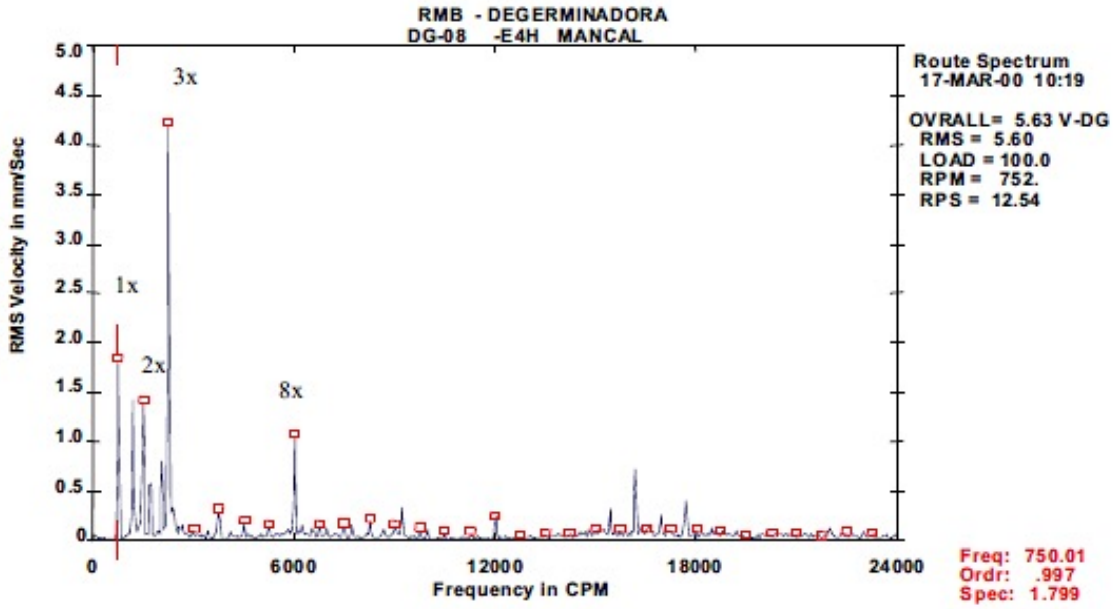


Figura 20 - Espectro característico de folga mecânica no apoio do equipamento, evidenciando os vários picos harmónicos [34]

Assim, as folgas mecânicas podem ser classificadas em três tipos:

Tipo I – Referem-se a folgas estruturais relacionadas com falta de rigidez na fundação ou nos apoios do equipamento. Neste grupo também se incluem deformações na base de apoio do equipamento. As vibrações amplificadas por este tipo de defeitos são geralmente predominantes na direção vertical e são mais evidentes na base de apoio do equipamento.

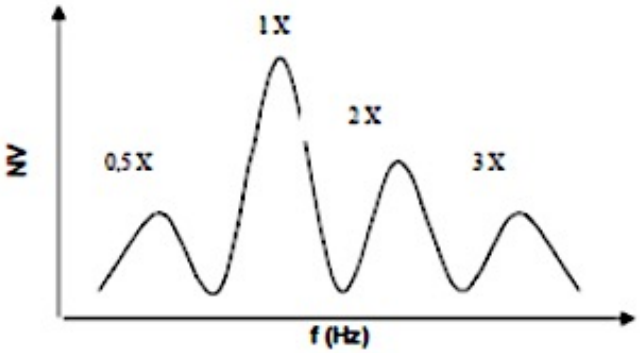


Figura 21 - Espetro característico Tipo I [31]

Tipo II - Neste grupo enquadram-se as folgas na fixação dos apoios do veio em rotação. A força devido ao desequilíbrio quando dirigida para cima e para baixo gera a frequência na segunda harmónica, num sensor colocado na vertical do apoio. Do mesmo modo quando a folga for lateral, também ocorre a frequência na segunda harmónica no sensor disposto na horizontal.

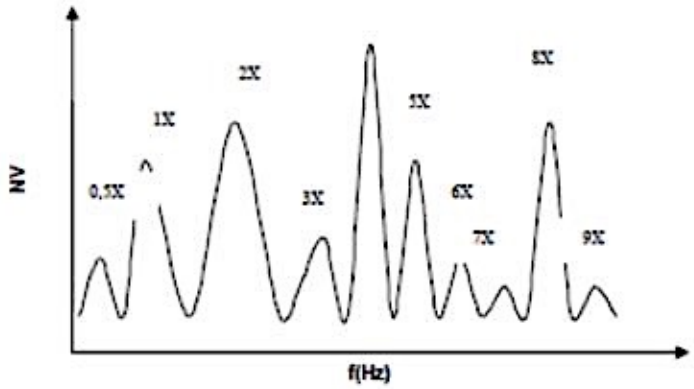


Figura 22 - Espetro característico Tipo II [31]

Tipo III - São folgas geradas por fixação inadequada entre as partes da máquina. Com acção das forças dinâmicas do rotor surgem efeitos não lineares, alterando periodicamente a rigidez do sistema. Assim, as vibrações terão características idênticas ao batimento cortado. Aparecerão componentes sub-harmónicas.

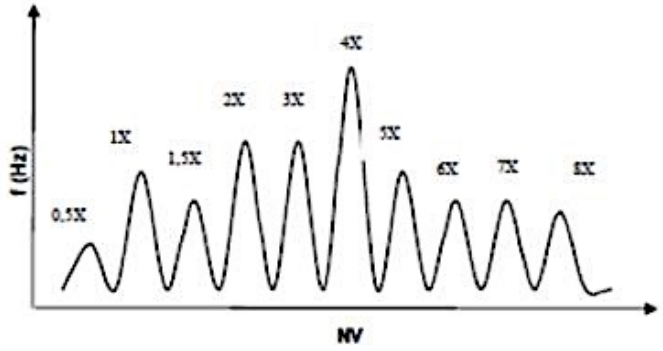


Figura 23 - Espetro característico Tipo III [31]

Repare-se que as principais causas para a existência de folgas mecânicas são: montagem incorreta; desgaste excessivo; problema na fundação e componentes fraturados.

2.4.6.5. Defeitos nos rolamentos

Um rolamento novo e perfeito praticamente não apresenta vibrações. Ao longo da vida do rolamento vão surgindo desgastes, e com eles, as vibrações nas frequências típicas de cada um dos elementos internos do rolamento.

Os rolamentos com defeitos sobre pistas, esferas ou rolos, usualmente causam vibrações em altas frequências. Estas frequências são várias vezes a velocidade de rotação do eixo, porém não são um múltiplo inteiro desta rotação. A razão para as altas frequências e as instabilidades

ocasionadas, normalmente encontradas em apoios de rolamentos defeituosos, pode ser explicada, analisando a natureza das forças de excitação geradas pelos elementos do rolamento.

Os defeitos na gaiola do rolamento, originam vibrações em frequências bem mais baixas do que as correspondentes aos defeitos das esferas, e das pistas interna, ou externa. Os impactos dos elementos rolantes defeituosos com as pistas, podem também excitar vibrações parecidas com aquelas que aparecem quando batemos num sino ou campainha. Ou seja, aparecem no espectro frequências naturais inerentes aos elementos do rolamento ou mesmo da carcaça do apoio.

Com as técnicas atuais é possível verificar a extensão e a causa da deterioração de rolamentos, tais como: defeitos de fabricação, desgastes, lubrificação deficiente, manuseio ou operação inadequada do rolamento, acompanhando os níveis de vibração nos componentes das frequências correspondentes aos defeitos.

Primeiramente é importante referir que um rolamento é constituído pelos seguintes elementos.

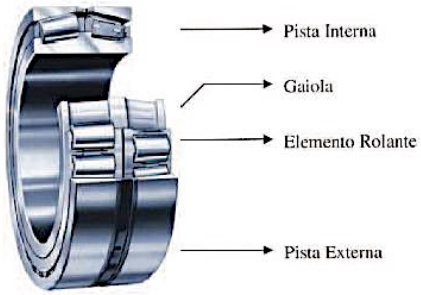


Figura 24 - Constituição de um rolamento [25]

As frequências associadas ao rolamento são:

- ✓ Frequência de rotação do motor (Fr).
- ✓ Frequência da pista externa do rolamento (BPFO).
- ✓ Frequência da pista interna do rolamento (BPFI).
- ✓ Frequência do elemento rolante (BSF).
- ✓ Frequência da gaiola (FTF).

Para determinar as frequências típicas dos rolamentos, é necessário conhecer as dimensões internas mostradas na figura 16, que são:

- ✓ $\beta = \alpha$ = ângulo de contacto do elemento rolante com a gaiola;

- ✓ BD = Drolm = Diâmetro do elemento rolante;
- ✓ PD = Dp = Diâmetro primitivo do rolamento.

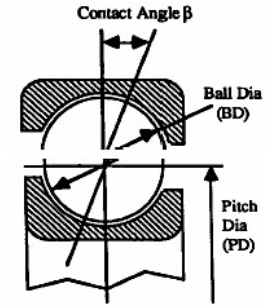


Figura 25 - Dimensões de um rolamento [5]

Posto isto, Bonaldi [5] apresenta as fórmulas que fornecem as frequências características do rolamento, que caracterização os padrões de falha:

$$D_P = \frac{D+d}{2} \rightarrow Diâmetro\ primitivo\ (equação\ 10)$$

$$BPFI = \frac{N_{rolm} \times f}{2} \times \left(1 + \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.pista\ interior\ (equação\ 11)$$

$$BPFO = \frac{N_{rolm} \times f}{2} \times \left(1 - \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.pista\ exterior\ (equação\ 12)$$

$$BSF = \frac{D_p \times f}{D_{rolm}} \times \left(1 - \left(\frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right)^2\right) \rightarrow Freq.corpos\ rolantes\ (equação\ 13)$$

$$FTF = \frac{f}{2} \times \left(1 - \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.gaiola\ (equação\ 14)$$

Sendo, *f*, a frequência de rotação do sistema, observa-se acima, que as frequências associadas aos rolamentos são múltiplas diretas dos rolamentos. As frequências, além da frequência de rotação, devem ser encontradas, portanto com o auxílio de catálogos e softwares específicos dos fabricantes de rolamentos.

A evolução dos defeitos nos rolamentos pode ser dividida em quatro etapas, identificadas de estágios, descritas a seguir e ilustradas na figura 17. [1]

Estágio 1: os primeiros sinais aparecem em frequências ultra-sônicas – 20 a 60 kHz. Os sinais nestas frequências podem ser avaliados em aceleração.

Estágio 2: com o surgimento de pequenos defeitos, ocorrem impactos nos elementos internos do rolamento excitando frequências naturais na faixa de 500 a 2.000 Hz. No espectro, as frequências naturais aparecem acompanhadas de bandas laterais. O valor da medição em aceleração cresce.

Estágio 3: as frequências fundamentais de defeitos e/ou as suas harmônicas começam a aparecer no espectro. Com o aumento do desgaste, cresce o número de harmônicas e de bandas laterais, tanto em torno das frequências naturais como em torno das frequências de defeitos. Os valores medidos continuam a crescer. O desgaste é agora visível e quando se estender por toda pista do rolamento, existirão muitas bandas laterais com grandes amplitudes. Neste estágio, o rolamento deve ser substituído, gráfico 10.

Estágio 4: já tendendo ao colapso, a amplitude na primeira harmónica cresce muito e com ela, as muitas harmônicas da rotação do eixo. Neste estágio, os componentes correspondentes as frequências naturais começam a desaparecer e são substituídos por uma faixa larga de frequências correspondentes a vibração aleatória.

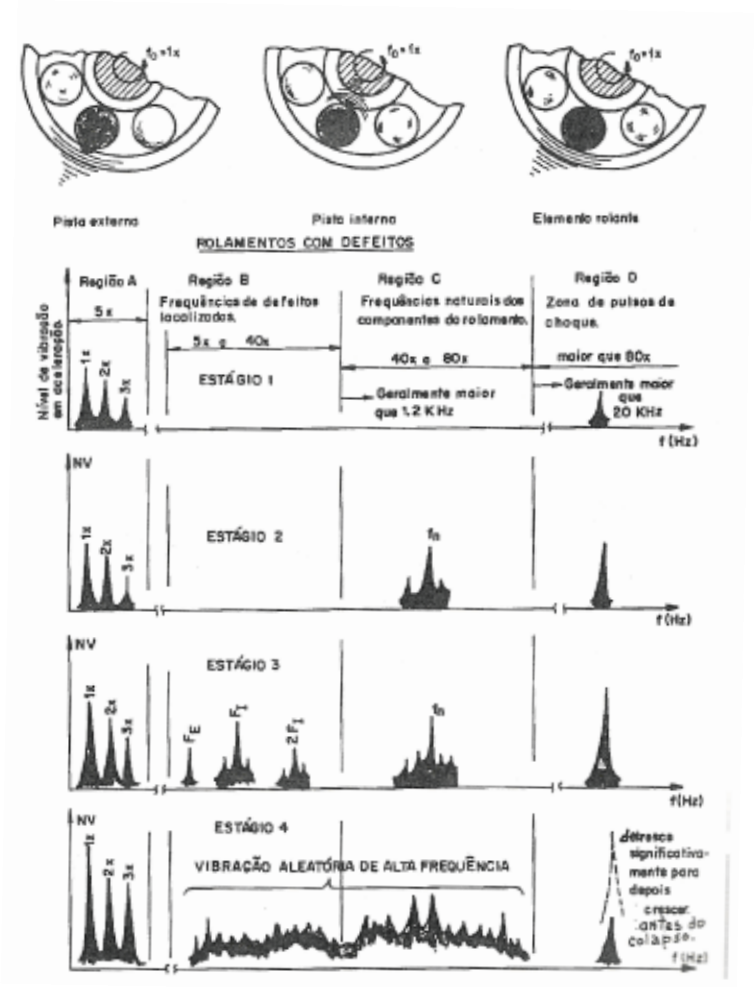


Figura 26 - Níveis de vibração para rolamentos defeituosos [1]

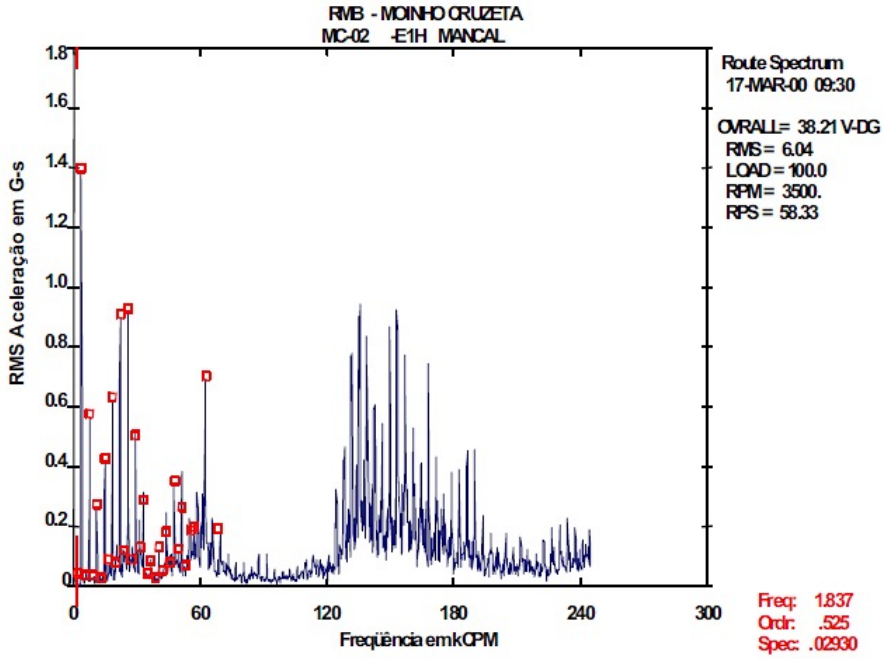


Ilustração 27 - Espetro característico de falha do rolamento [34]

2.4.6.6. Fluido hidrodinâmico

Bombas, turbinas, compressores, ventiladores e outras máquinas de fluxo apresentam vibrações e ruídos devido às reacções do fluxo nas partes fixas e móveis da máquina. Estas vibrações podem apresentar-se de duas maneiras:

- ✓ Componente discreta na frequência de passagem (número de pás do rotor vezes a rotação do rotor, ou com a frequência de interacção das pás do rotor com as pás directrizes).
- ✓ Energia vibratória espalhada na região de alta frequência provocada por cavitação, recirculação e turbulência do fluxo.

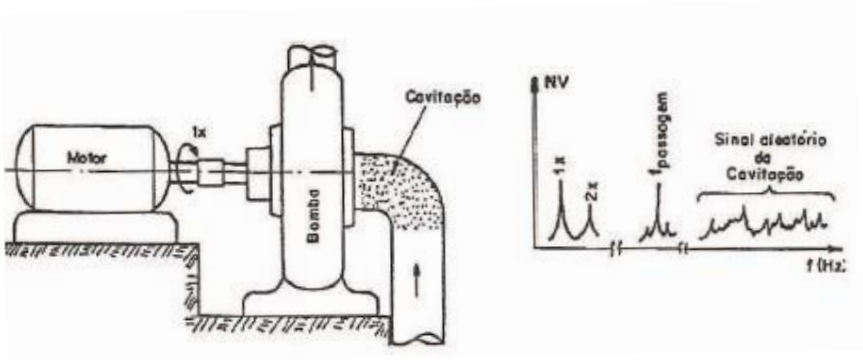


Figura 28 - Espetro característico da cavitação numa bomba [1]

A cavitação geralmente ocorre quando a máquina está a funcionar fora de seu ponto de operação. No processo de cavitação, as bolhas de ar implodem violentamente criando ondas de pressão que chegam às estruturas gerando vibrações. Como nas implosões, as vibrações são aleatórias e localizadas na faixa de altas frequências no espectro, algumas vezes o componente discreto da passagem das pás sobrepõe-se à região aleatória das turbulências.

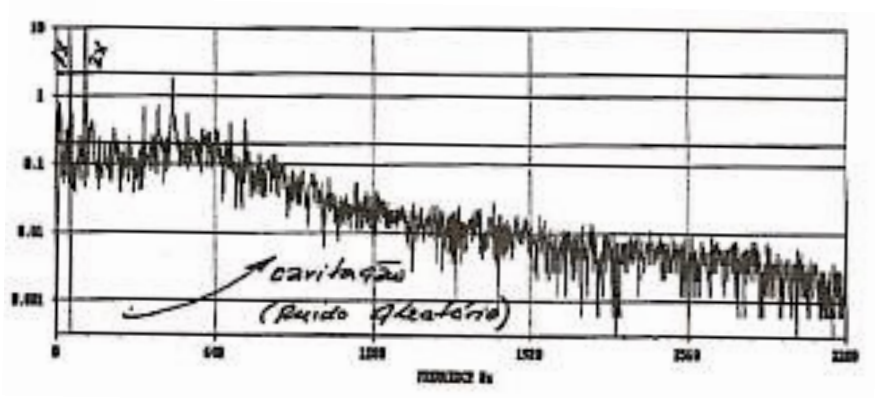


Figura 29 - Cavitação numa bomba centrifuga [1]

O fluxo turbulento aparece em circulações de fluido com altos números de Reynolds ou quando se misturam fluxos de alta e baixa velocidade. Em ventiladores, pode ocorrer turbulência nas variações da pressão ou de velocidade da passagem do ar através do tubo de saída. Esta desorganização do fluido causa turbulência que gerará vibração aleatória na estrutura da máquina, figura 19. Este fenómeno geralmente acontece em baixa frequência.

Normalmente, máquinas que usam pás no rotor, ou no distribuidor têm uma frequência típica, a frequência de passagem das pás, que deve ser acompanhada. Ela representa a passagem das pás por um ponto fixo, geralmente onde ocorre uma variação de pressão, por exemplo numa pá fixa. A amplitude da vibração no componente da frequência de passagem das pás varia com a carga. Portanto, toda a medida de vibração nesse componente deve ser feita na mesma condição de carga. Numa condição de funcionamento normal da máquina geralmente o nível neste componente é baixo. Se o processo induzir instabilidade, imediatamente a vibração neste componente aumenta, e aparecem bandas laterais.

Picos altos na frequência de passagem das pás podem ser inerentes a: folgas desiguais entre as pás rotativas e os difusores estacionários; coincidência da frequência de passagem das pás com frequências naturais das próprias pás ou de componentes estruturais da máquina; posicionamento excêntrico do rotor dentro da carcaça; fluxo com variações abruptas de direção; obstruções do fluxo.

2.5. Termografia

O calor é a energia térmica em transição. Como todas as outras formas de energia, este não pode ser criado nem destruído, pode, no entanto, ser convertido de e para outras formas de energia como, por exemplo, energia elétrica em bombas de calor, dispositivos termoelétricos e geradores de vapor.

Todos os corpos, independentemente do seu estado físico ou composição, estão emitindo e recebendo radiação eletromagnética continuamente ao elevar ou diminuir a energia interna de suas moléculas [19].

A termografia sem contacto é uma técnica de deteção da distribuição de energia térmica emitida pela superfície de um, ou vários corpos ou objetos, por radiação. Esta é uma técnica não invasiva, capaz de detetar, visualizar e gravar diferentes níveis de distribuição de temperatura através da superfície de um objeto. A termografia sem contacto permite o estudo da temperatura dos corpos, através da radiação infravermelha emitida pelos mesmos usando uma câmara termográfica [16]. Na maioria dos processos e atividades industriais, o parâmetro temperatura é essencial para o controlo e monitorização dos equipamentos.

A termografia é aplicável em qualquer situação onde o conhecimento do padrão térmico através de uma superfície forneça dados significativos de uma estrutura, processo ou sistema, nomeadamente [32]:

- ✓ Sistemas Elétricos;
- ✓ Sistemas Mecânicos;
- ✓ Sistemas de Fluídos e Vapor;
- ✓ Indústria Automóvel;
- ✓ Indústria de processo;
- ✓ Perdas de Energia (Edifícios, Fornos e Caldeiras);
- ✓ Eletrónica;
- ✓ Aeronáutica;
- ✓ Vigilância e Segurança;
- ✓ Aplicações Médicas: Medicina e Medicina Veterinária.

É uma ferramenta com forte implementação na área da manutenção e pode apresentar vantagens significativas em fase de desenvolvimento de novos produtos onde a temperatura seja uma variável crítica.

2.5.1. Espetro eletromagnético

A energia de um objeto quente é irradiada com diferentes níveis, em todo o espetro eletromagnético.

O espetro eletromagnético divide-se em diversas faixas espetrais, que vão desde comprimentos de onda mais curtos, incluindo raios gama e raio-X, até comprimentos de onda mais longos, incluindo micro-ondas e ondas de rádio transmissão [21].

Existem ainda as faixas espetrais ultravioleta, visível e infravermelho, tal como se pode observar na figura 20.

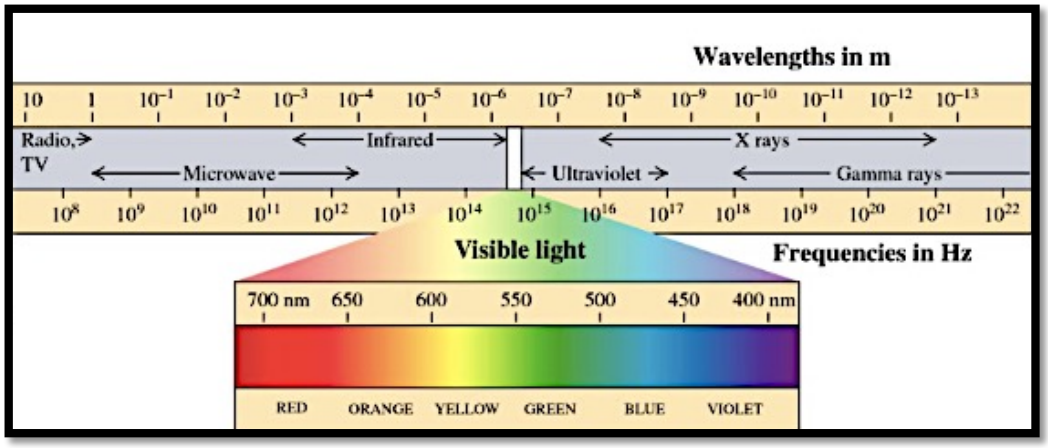


Figura 30 - Espetro eletromagnético [21]

2.5.2. Características da radiação infravermelha

A radiação infravermelha é um tipo de energia electromagnética idêntica à radiação visível, ondas rádio e raios-X, que se desloca à velocidade da luz sob a forma de onda sinusoidal diferindo apenas no comprimento de onda, e onde todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto a emitem e a absorvem. A radiação infravermelha localiza-se no espectro electromagnético entre a luz visível e as ondas rádio, entre is 750 nm e 350 nm [8].

De acordo com a Lei de Kirchoff, num estado de equilíbrio, a energia radiante emitida por um corpo é igual à energia absorvida, logo, a radiação infravermelha incidente sobre uma superfície é totalmente transmitida, refletida, e ou absorvida.

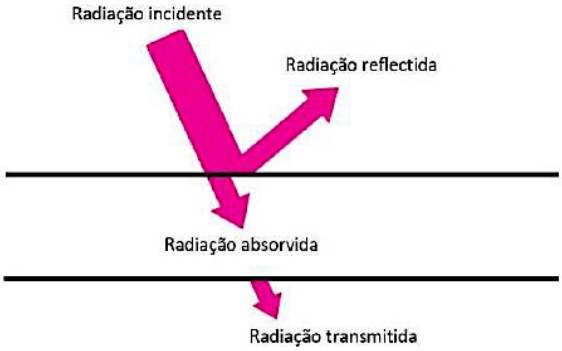


Figura 31 – Balanço de energia radiante para um corpo real [8]

Como demonstrado na figura 21, toda a radiação incidente interage com a superfície de um corpo real, parte dela é refletida (θ) e a restante penetra no corpo, podendo esta última contribuir para uma alteração da temperatura da superfície, dependendo da fracção que é absorvida (α) e da restante transmitida (τ) através da superfície [15].

A soma dos três fatores adimensionais deve ser igual à unidade, para qualquer comprimento de onda, pela seguinte relação [24]:

$$\alpha + \theta + \tau = 1 \quad (equação\ 15)$$

Segundo alguns autores a superfície em estudo pode ser classificada em função dos valores destas propriedades, da seguinte forma [20, 21]:

Corpo negro	$\boldsymbol{\alpha = 1; \theta = \tau = 0}$
Corpo opaco	$\boldsymbol{\tau = 0; \theta + \alpha = 1}$
Corpo transparente	$\boldsymbol{\tau = 1; \theta \approx \alpha \approx 0}$
Corpo brilhante	$\boldsymbol{\theta = 1; \tau \approx \alpha \approx 0}$

Um objeto também tem a capacidade de radiar ou emitir energia infravermelha em comparação com um corpo negro (ε=1) à mesma temperatura e comprimento de onda, definindo-se assim a emissividade ε [32].

A emissividade varia com as propriedades da superfície, do material e, para alguns materiais, varia com a temperatura do objeto. Materiais não metálicos (PVC, cimento e substâncias orgânicas) têm alta emissividade para a faixa do infravermelho distante e esta não depende da temperatura, 0,8 < ε < 0,95. Metais com superfície brilhantes, têm baixa emissividade, que varia com a temperatura [12].

A maioria dos sólidos, superfícies pintadas ou orgânicas e metais oxidados são corpos cinzentos com emissividade elevada. Superfícies de metal polidas e brilhantes, e alguns materiais semicondutores, são corpos cinzentos com baixa emissividade e alta refletividade. Camada de plástico fino, vidro, gases e materiais óticos são corpos não cinzentos cuja emissividade varia com o comprimento de onda [10].

2.5.3. Fatores que influênciam a medição de radiação infravermelha

A análise termográfica requer alguns cuidados e precauções, pois esta, pode levar a algumas conclusões erradas. A avaliação de erros de medição é muito importante para a precisão do serviço termográfico.

Os erros podem ser classificados como erros de método, erros de calibração e erros eletrónicos. Em condições reais, os erros da medição podem ocorrer devido a [9]:

- ✓ Incorreta avaliação da emissividade do objeto, temperatura atmosférica, temperatura ambiente e da distância entre o objeto e a câmara;
- ✓ Influência da radiação (direta e/ou refletida pelo objeto) que chega ao detetor da câmara;
- ✓ Incorreta avaliação da transmissão e radiação atmosférica.

A emissividade depende do comprimento de onda λ, da temperatura T, do material, do estado da superfície e da direção da observação. A influência da radiação emitida pelo ambiente aumenta quando diminui a emissividade. A influência da radiação do Sol sobre a precisão da termografia é bastante difícil de avaliar, uma vez que a vizinhança do objeto pode abranger diferentes valores de emissividade [9].

2.5.4. Termografia por infravermelhos

A termografia por infravermelhos é a técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda (IV), em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Para tal, é utilizado um equipamento que capta a radiação térmica emitida pela superfície em estudo sem a necessidade de qualquer contacto.

A termografia por infravermelhos é uma técnica não destrutiva com diversas aplicações, mas necessita que se verifique três condições para a sua aplicabilidade [33]:

- ✓ O objeto ou superfície tem de apresentar uma temperatura diferente do meio em que se encontra inserido de modo a realçar a sua localização;
- ✓ Se na presença de um gradiente térmico, o objeto com as mesmas propriedades em toda a sua superfície apresentar flutuações de temperatura numa determinada zona, então estaremos possivelmente perante um defeito ou uma omissão de material;
- ✓ Na ausência das condições anteriores pode ser aplicada uma fonte de calor ou de frio na superfície com diferentes taxas e temperaturas de modo a realçar anomalias ou defeitos.

A presença de defeitos a uma certa profundidade da superfície interfere com o fluxo de calor que a atravessa, causando variações locais da temperatura superficial, as quais podem ser detetadas através da aplicação da termografia por infravermelhos [18].

A imagem térmica apenas mostra o padrão de temperatura superficial, ou seja, a radiação emitida e a refletida pela superfície.

A análise e interpretação de resultados provenientes da termografia por infravermelhos são um processo relativamente complexo pois existem algumas variáveis envolvidas que são difíceis de quantificar. Surge assim, a necessidade de efectuar alguns testes preliminares de viabilidade do estudo termográfico de modo a limitar a influência destas variáveis nos resultados.

Meola [18] desenvolveu uma abordagem teórica para a verificação prévia da aplicabilidade da termografia por infravermelhos na deteção de defeitos inclusos em materiais com o principal objectivo de eliminar a necessidade de realização destes testes preliminares, regra geral dispendiosos em termos de tempo e custos, e concluiu que a deteção de anomalias está dependente de três fatores, fator geométrico do defeito, fator térmico do defeito, e fator de deteção/medição do equipamento termográfico.

Tal como foi anteriormente referido, a emissividade da superfície é a variável que maior influência tem no valor da radiação captada pela câmara termográfica.

A refletividade da superfície também apresenta uma influência significativa especialmente quando se trata de uma superfície de baixa emissividade pois induz uma maior variação da temperatura superficial devido à reflexão térmica [29; 30]. A reflexão de uma fonte pontual situada na vizinhança pode assim induzir um erro na medição e conduzir a uma avaliação incorrecta da envolvente analisada.

A absorção da radiação infravermelha pela atmosfera afeta os valores recolhidos [2], especialmente quando a distância de medição for superior a 10 metros, facto que demonstra a importância do comprimento de onda a captar.

A cor da superfície, embora não afeta a emissividade, tem maior influência quando as diferenças de temperatura são mais acentuadas [3].

As condições climatéricas (temperatura e humidade relativa), tem um grande impacto nas alterações registadas em imagens térmicas, especialmente devido à evaporação superficial ser bastante sensível a estas variáveis climáticas [2].

Existem ainda outros fatores que poderão causar distorções na medição da temperatura superficial através da termografia por infravermelhos, nomeadamente;

- ✓ Temperatura ambiente;
- ✓ Temperatura da vizinhança;
- ✓ Humidade relativa;
- ✓ Infiltração ou presença de água, chuva;
- ✓ Impacto do sol e outras fontes de calor;
- ✓ Velocidade do vento ou outros fatores que influenciam a convecção;
- ✓ Sombreamentos;
- ✓ Ângulo de captação;
- ✓ Distância de medição;
- ✓ Existência de obstáculos entre a câmara e a superfície.

A cada ponto ou *pixel* da imagem térmica corresponde uma área específica da superfície cujo valor varia em função da distância entre o equipamento e a superfície em estudo. Com o aumento da distância, aumenta a dimensão mínima detectável, fazendo com que o campo de captação (FoV - *Field of View*) tenha uma área maior distribuída por cada *pixel,* figura 22. Assim, a escolha da distância a realizar o estudo é um parâmetro a ter em atenção pois radiação captada nessa área é uma média da radiação real emitida, o que traduz uma perda de detalhe da imagem.

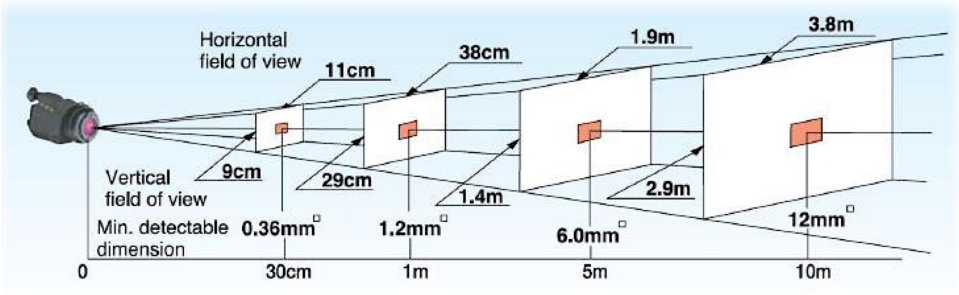


Figura 32 - Resolução da imagem térmica [22]

2.5.5. Termografia qualitativa e quantitativa

A análise qualitativa deve ser utilizada sempre que se pretende uma abordagem superficial do problema, efetuando-se leituras termográficas onde, apenas pela observação e sem grandes detalhes de medição, se pode avaliar termicamente o objeto em estudo [22, 32].

Apesar da simplificação inicial, os ensaios devem ser realizados por uma pessoa qualificada e capaz de interpretar os resultados, para saber qual o tipo de imagem esperada quando não existe nenhuma anomalia. Para evitar erros de interpretação, aconselha-se que, sempre que possível, sejam efetuadas leituras termográficas para referência de zonas não afetadas do objeto em estudo. Desde que as condições do ensaio e envolvente sejam idênticas, o estudo do objeto defeituoso pode ser feito por comparação com a análise de referência [24].

Já na análise quantitativa, são calculadas as temperaturas superficiais através de uma imagem termográfica e parâmetros analíticos [22, 32].

O ensaio termográfico requer mais detalhe e condições de ensaio mais rígidas, demorando mais tempo, mas é mais eficaz que a análise qualitativa, uma vez que permite medir temperaturas.

Os resultados da análise quantitativa são gravados e anotam-se todos os parâmetros que se considerem essenciais para análise posterior.

A câmara termográfica deve estar calibrada, uma vez que se pretendem valores reais da temperatura do objeto em estudo.

2.5.6. Termografia ativa e passiva

O estudo da termografia pode ser abordado de duas formas: termografia passiva ou termografia activa.

2.5.6.1. Termografia ativa

Na termografia activa, a superfície em estudo é aquecida ou arrefecida artificialmente de modo a produzir um contraste térmico em zonas que se encontram em equilíbrio térmico. A captação da imagem termográfica é realizada durante o período de arrefecimento até ao estado de equilíbrio térmico. O contraste térmico pode ser induzido recorrendo a variadas fontes de energia que divergem na forma como interferem com a superfície em estudo. Ibarra- Castanedo et al. [14] classifica-as como externa, quando a energia incide sobre a superfície do objeto

propagando-se através do material até encontrar a anomalia; ou como interna, onde a energia é injectada directamente no modelo de modo a realçar os defeitos existentes.

Na termografia activa com estimulação externa recorre-se frequentemente a sistemas ópticos, tais como lâmpadas de halogéneo (aquecimento periódico), ou a *flashes* pulsados (aquecimento de impulso modelado). As técnicas aplicadas diferem no tipo de sinal utilizado, distinguindo-se a termografia de amplitude modelada ("*Lock-in Thermography*") e a termografia de impulso ("*Pulsed Thermography*"), figura 23. Os defeitos internos actuam como uma barreira à propagação de calor, alterando a amplitude e a fase da resposta recolhida na superfície através da câmara de infravermelhos [14].

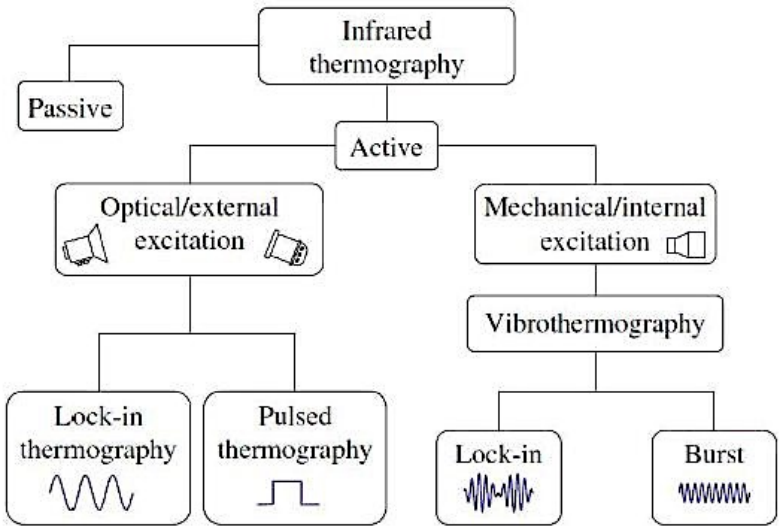


Figura 33 - Técnicas comuns em termografia [14]

A técnica aplicada em termografia activa de estimulação interna, a termografia de ultra-som ou vibrotermografia, utiliza um sistema ultra-sónico que provoca a vibração das partículas sem a necessidade de aquecer a superfície. As ondas ultra-sónicas deslocam-se através do material e dissipam a energia maioritariamente nas anomalias, provocando assim uma libertação local de calor, que por sua vez se desloca para a superfície, sendo detetado pela câmara de infravermelhos. A vibrotermografia subdivide-se, de modo análogo à técnica activa de solicitação externa, em função do tipo e amplitude do sinal ultra-sónico como: vibrotermografia de amplitude modelada ("Lock-in Vibrothermography"), ou vibrotermografia por impulso ("Burst vibrothermography") [14].

2.5.6.2. Termografia passiva

No caso da termografia passiva o estudo ocorre sem a interferência de qualquer fonte artificial externa de aquecimento (ou arrefecimento) ao estado natural da superfície, a qual se encontra a uma temperatura normalmente superior à temperatura ambiente, onde é considerada como fonte natural a irradiação solar ou o calor proveniente do próprio processo. A principal vantagem desta abordagem é que o único equipamento necessário é a câmara de infravermelhos.

Na termografia passiva as diferenças de temperatura relativamente à vizinhança são pequenas, normalmente 1 ºC a 2 ºC, mas tendo em conta a evolução dos equipamentos cuja resolução facilmente deteta variações na ordem dos 0.1 a 0.2 ºC, as aplicações passaram do campo qualitativo para a análise quantitativa [8].

2.5.7. Vantagens e limitações da termografia

Uma das vantagens da termografia por infravermelhos é não haver a necessidade do contacto directo entre a câmara e a superfície em estudo, podendo a distância entre ambos variar de alguns milímetros até alguns metros, permitindo assim o estudo de objecto e zonas consideradas potencialmente perigosas, sem qualquer perigo para o equipamento e respectivo operador. Deste modo é possível realizar o estudo sem que as instalações ou os sistemas estejam desligados, tornando este tipo de ensaio não destrutivo (NDT) muito eficiente em termos de tempo e de custos. Outra vantagem das câmaras termográficas é a sua grande capacidade de monitorização, onde é possível fazer o controlo simultâneo e em tempo real de diversos pontos no mesmo local [8].

Além disso, a escala de medição pode ser variada através do ajuste da abertura das lentes da câmara, mas também recorrendo à aplicação de vários filtros, controlando assim a sensibilidade do sistema e a sua resposta ajustada à radiação térmica captada.

Atualmente os equipamentos de termografia por infravermelhos além de apresentarem capacidade de deteção de pequenas flutuações de temperatura, útil em termos de análise quantitativa, são cada vez mais compactos e facilmente transportáveis, aumentando assim quer o leque de aplicações quer a sua utilização em movimento.

Para além dos custos elevados de aquisição das camâras termográficas a obtenção e análise da imagem térmica requer uma atenção cuidada sendo necessária a qualificação do técnico que regista e interpreta os resultados.

Vantagens	Limitações
Inspecção rápida e em tempo real;	Custo equipamento;
Segura (sem contacto);	Presença de obstáculos;
Fácil interpretação qualitativa;	Necessidade pessoal qualificado para interpretação quantitativa;
Diagnóstico de defeitos em vasta escala;	Influência de parâmetros de difícil controlo;
Não necessita de iluminação externa (ensaios nocturnos);	Dificuldade de aquecimento uniforme numa grande área (em Termografia Activa);
Equipamento leve e portátil (variadas aplicações);	Influência de objectos na vizinhança;
Utilização em movimento;	Problemas com a emissividade;
Detecção de pequenas variações de temperatura.	

Figura 34 - Vantagens e desvantagens da termografia [8]

Uma das limitações da termografia deve-se ao efeito da atenuação da radiação infravermelha na atmosfera causada pela absorção de energia por partículas em suspensão, dióxido de carbono e vapor de água, e subsequente difusão em direções aleatórias podendo afectar os resultados obtidos, embora estes efeitos possam ser desprezados para os casos onde a distância entre o sistema de infravermelhos e o objeto é pequena.

Outros problemas poderão surgir quando a termografia por infravermelhos é aplicada no exterior, a presença de obstáculos entre a câmara de infravermelhos e o objeto poderá levar a alguns erros de análise.

2.5.8. Equipamentos

Ao longo dos últimos anos desenvolveram-se três tipos de sistemas para medição de temperatura por infravermelhos: os termómetros pontuais ou de ponto quente, os *scanners* de linha e as câmaras termográficas [8].

Os termómetros pontuais, tal como o nome indica, apenas fornecem a temperatura de um ponto na superfície, e embora não forneçam uma imagem térmica são aplicados em muitas técnicas não destrutivas.

Os *scanners* de linha captam a radiação infravermelha numa série de prismas e espelhos internos permitindo assim obter um perfil de temperatura ao longo de uma linha na superfície. A imagem térmica é construída com a repetição sucessiva do processo de captação até atingir a imagem completa.

As câmaras termográficas (figura 25) são instrumentos que captam e convertem a radiação infravermelha emitida por uma superfície numa imagem térmica a duas dimensões

numa escala de cores ou escala de cinza, representativa da temperatura a que se encontra a superfície.



Figura 35 - Camâra termográfica [22]

A câmara termográfica possui um detector que gera um sinal eléctrico em função da radiação que recebe, que por sua vez, é tratado por uma unidade de controlo que posteriormente disponibiliza a imagem térmica resultante num monitor. Assim, a temperatura da superfície em estudo é medida indirectamente a partir da radiação incidente no detector. Este equipamento é constituído por vários componentes:

- ✓ Lente
- ✓ Detector
- ✓ Processador electrónico
- ✓ Controlos
- ✓ Ecrã
- ✓ Armazenamento de informação
- ✓ Processamento de dados
- ✓ Software para gerar relatórios
- ✓ Filtros

2.5.9. Aplicações da termografia

A termografia por infravermelhos pela sua característica não destrutiva é uma técnica que vem sendo empregue em muitas áreas e em variadas aplicações. Os sistemas de termografia por infravermelhos ao longo dos anos têm-se tornado cada vez mais leves e compactos, aumentando assim o campo de actuação pois podem ser facilmente transportados.

A aplicação da termografia tem vindo a aumentar significativamente em diversas áreas. Medicina, arqueologia, geologia, sistemas mecânicos, instalações elétricas, meteorologia,

sistemas de fluídicos, oceanografia são algumas das áreas onde a aplicação da termografia tem sido utilizada como instrumento de manutenção.

2.5.9.1. Aplicação em sistemas fluídicos

A termografia pode ser utilizada também na monitorização da condição de funcionamento e da operação dos componentes integrantes de sistemas de fluídicos. Problemas de caudais de fluídos, fugas e bloqueios em sistemas de vapor podem ser detetados, bem como, problemas em sistemas de fluídos quentes ou frios, danificação e defeitos no isolamento de refratários que leva a uma mudança na temperatura de operação [24].

Em sistemas de vapor, utiliza-se, esta técnica não destrutiva, para inspecionar as linhas de transmissão de vapor, purgadores e válvulas de vapor, permutadores de calor, caldeiras e outros equipamentos que utilizem vapor. De modo a detetar bloqueios nas linhas de transmissão e nos permutadores de calor devem procurar-se diferenças de temperatura significativas. Nas válvulas fechadas e linhas de vapor subterrâneas, a termografia é útil para detetar eventuais fugas de vapor [24].

A indústria petroquímica está entre os setores que apostam mais em sistemas de vapor devido à sua elevada intensidade energética, requerendo uma monitorização térmica cuidadosa para adquirir níveis de eficiência elevados para cada processo [24].

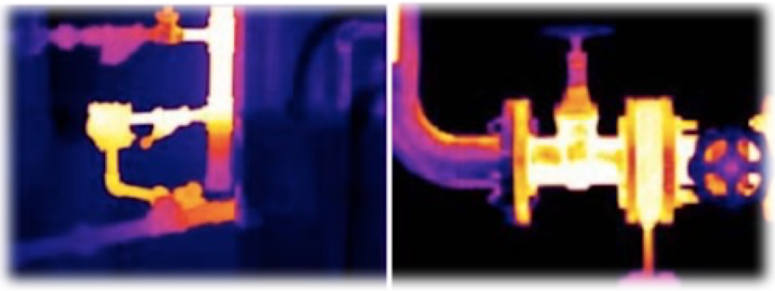


Figura 36 - Imagem termográfica de sistema de vapor [24]

Nos sistemas fluídicos, a inspeção de fornos e caldeiras é essencial de modo a eliminar fontes de perdas de energia. As perdas de energia podem ocorrer por oxidações, fugas de ar ou pela danificação do refratário [24].

2.5.9.2. Aplicação em sistemas mecânicos

Em muitas indústrias, os sistemas mecânicos são essenciais para as operações a realizar, podendo afetar tanto a quantidade como a qualidade do produto final. Como referido anteriormente, o principal método de inspeção de sistemas mecânicos é a análise de vibrações, mas a termografia é, também, uma excelente fonte complementar para estudos de monitorização de equipamentos mecânicos.

Quando os componentes mecânicos estão em operação são gerados atritos que por sua vez se traduzem num aumento temperatura. Forças originadas por fricção, desalinhamentos, lubrificação e tensão das correias de transmissão podem originar aquecimento excessivo ou até mesmo provocar danos nos equipamentos. As inspeções são normalmente direcionadas a ligações elétricas, acoplamentos, rotor e estator de motores e geradores, rolamentos, correias de transmissão e engrenagem, figura 27.

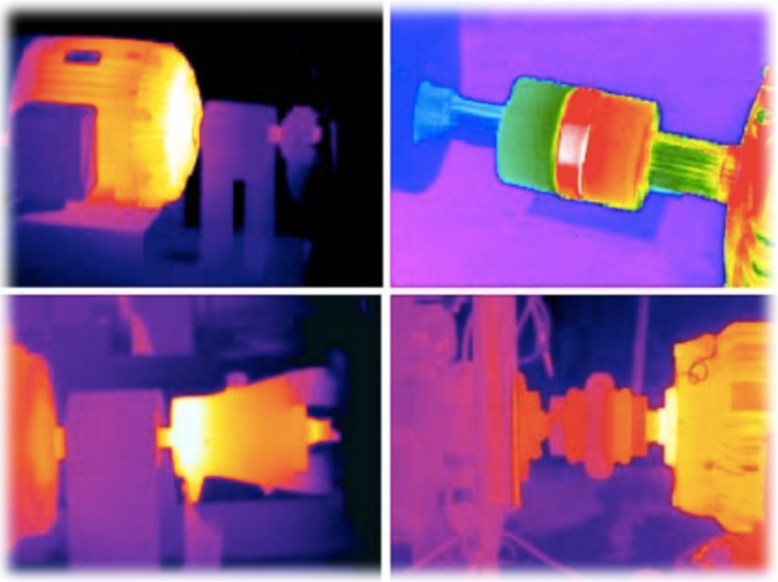


Figura 37 - Imagens termográficas de sistemas mecânicos [24]

As ligações elétricas devem ser inspecionadas periodicamente, devendo estar todas as ligações à mesma temperatura. Por sua vez, a inspeção das carcaças dos motores, a imagem termográfica deverá apresentar uma temperatura uniforme. Motores que apareçam mais quentes poderão indicar problemas nos enrolamentos ou curto-circuitos.

Na inspeção de rolamentos, caso eles se encontrem quentes podem indicar problemas de lubrificação ou um elevado desgaste do mesmo. Um rolamento em bom estado apresenta uma temperatura de funcionamento de cerca de 60°C. Se existir um diferencial de temperaturas alto entre dois rolamentos, pode-se suspeitar de desalinhamento ou desequilíbrio.

O desalinhamento de motores provoca forças que causam um aumento de temperatura nas uniões do acoplamento sendo essa temperatura maior quanto maior for o desalinhamento.

Caixas de engrenagem e correias de transmissão em boas condições devem funcionar a uma temperatura próxima da temperatura ambiente. O aumento de calor é gerado por forças de fricção, desalinhamento e lubrificação imprópria [24].

2.5.9.3. Aplicação em instalações elétricas

A importância da segurança nas instalações elétricas é fundamental, quer a nível doméstico quer a nível industrial. A temperatura é a principal variável detetável no processo de falha de uma instalação elétrica, sendo a termografia uma técnica de manutenção eficaz. O aumento de temperatura num componente elétrico aumenta o risco de incêndio numa instalação, podendo causar avarias irreparáveis em equipamentos fundamentais e provocar acidentes em pessoas e bens.

Quando a corrente elétrica passa através de um condutor, é gerado calor. Todos os componentes elétricos começam a deteriorar-se após a instalação, devido à carga elétrica, vibrações, corrosão e envelhecimento. As anomalias aparecem com o aumento da temperatura durante um largo período de tempo, antes da ocorrência de uma falha. O aquecimento anormal associado à resistência elevada ou à sobrecarga do sistema é a causa principal de muitos problemas elétricos.

Uma inspeção termográfica em instalações elétricas identifica problemas causados devido à elevada resistência causada por superfícies com contacto deficiente, a um circuito em sobrecarga e problemas de desequilíbrio de cargas.

O contacto deficiente deve-se a ligações soltas, corroídas ou oxidadas e por falhas de componentes. As sobrecargas podem-se dever a erros de projeto, falhas de montagem e falta de manutenções preventivas. Por sua vez, um desequilíbrio de cargas mostra uma errada distribuição de carga num sistema trifásico, sendo que uma das fases transporta mais corrente que as outras, se existir neutro, este aparecerá sobrecarregado [24].

Os equipamentos normalmente inspecionados são motores, geradores, transformadores, disjuntores, interruptores, fusíveis, cabos elétricos, quadros elétricos e todos os dispositivos de passagem de corrente em carga. A inspeção termográfica tem de ser feita com a instalação elétrica em carga, sendo necessária uma visão desimpedida do ponto de medição.

Ligações soltas ou deterioradas

Sempre que existe um contacto defeituoso numa ligação elétrica, cria-se uma resistência de contacto. Esta condição leva à geração por "efeito de joule" de uma energia térmica proporcional à resistência de contacto e ao tempo durante o qual passa a corrente, elevando a temperatura no ponto de defeito.

A corrosão e deterioração de ligações elétricas podem ser causadas por causas ambientais, enquanto a vibração, a fadiga e a idade fazem com que as ligações criem folgas.

Como se observa na figura 28, a termografia é muito útil para a deteção de ligações soltas ou deterioradas, mostrando pontos quentes em elementos de aperto, como por exemplo, parafusos.

A deteção e a correção deste tipo de falhas são essenciais de modo a evitar incêndios e interrupções que podem ser críticas em operações de fabrico e comerciais. Em caso de anomalia as ligações devem ser desmontadas, limpas, reparadas e montadas novamente e em seguida alvo de uma nova inspeção termográfica [24].

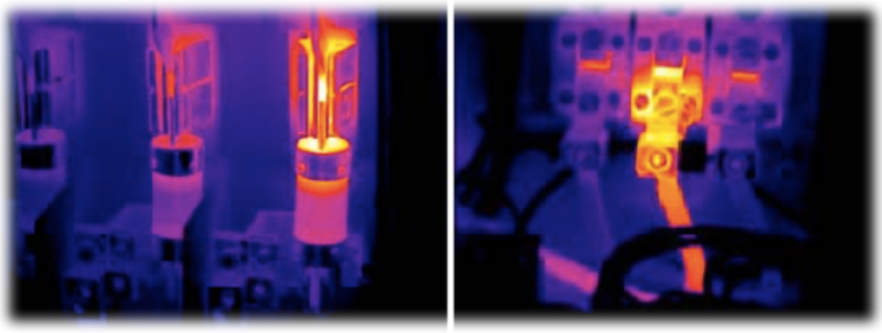


Figura 38 - Imagem termografica de uma ligação com folga

Circuitos em sobrecarga

Através de imagens termográficas é possível detetar e localizar sobrecargas sem necessidade de contacto.

O excesso de corrente origina que os condutores funcionem mais quentes, aquecendo ao longo de todo o seu comprimento. A temperatura dos condutores deverá ser uniforme em todas as fases e deve ser confirmado com auxilio de um amperímetro.

Erros de projeto, como por exemplo, demasiados aparelhos ligados simultaneamente num mesmo circuito, falhas de montagem e falta de manutenção são as causas principais para ocorrência de sobrecargas.

As medidas de proteção contra sobrecargas passam por colocar instrumentos como disjuntores magnetotérmicos e corta circuitos fusíveis que interrompam automáticamente e seletivamente os circuitos em caso de anomalia.

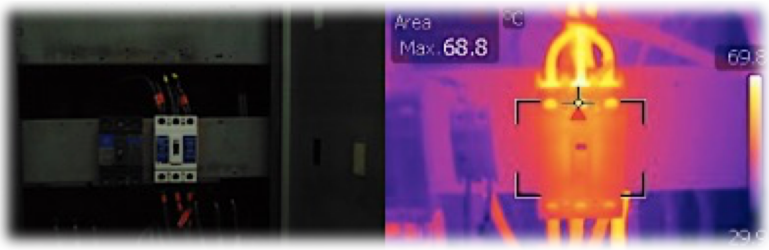


Figura 39 – Imagem termográfica de sobrecarga de uma contatora

Circuitos com desequilíbrio de cargas

Os desequilíbrios de corrente ocorrem quando as intensidades de corrente que circulam pelas três fases de um sistema trifásico não são iguais, devido à má distribuição das cargas da instalação. O desequilíbrio provoca uma corrente no condutor neutro, levando a um aumento de temperatura geral nos componentes da instalação. O desequilíbrio de cargas deve ser previsto na fase de projeto das instalações elétricas, de modo a evitar problemas graves, quer em equipamentos, quer para a segurança das pessoas.

O desequilíbrio pode ser provocado por diferentes causas: problemas na qualidade de energia, subtensões devido a excesso de carga ligada, um defeito de isolamento em cablagem ou um mau dimensionamento de cargas na instalação elétrica [15].

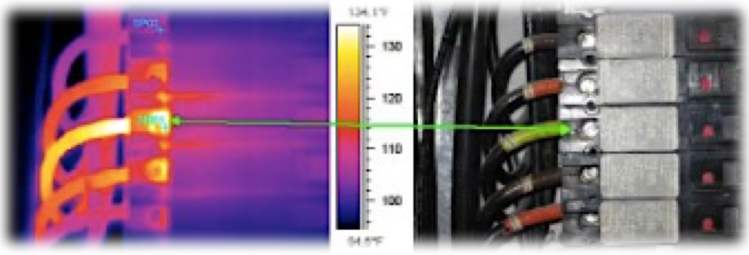


Figura 40 - Imagem termográfica de desiquilibro de carga

Na figura 30 observam-se diferentes temperaturas nas diferentes fases do equipamento elétrico, indiciando um problema de desequilíbrio de cargas.

Equipamentos defeituosos

A monitorização da temperatura de equipamentos elétricos é útil para indicar a existência ou evolução de problemas internos dos mesmos. O aquecimento de um equipamento elétrico depende da sua capacidade térmica.

O controlo da temperatura de operação é muito importante, porque o funcionamento a um nível de temperatura acima do nível máximo de temperatura permitido pela sua classe de isolamento leva à danificação do equipamento e à diminuição da segurança da instalação. Por exemplo, um incremento de 10°C sobre a temperatura máxima especificada para um motor reduz a sua esperança de vida em 50% [24].

Na origem de problemas podem estar erros de projeto, aplicações indevidas e operações desapropriadas. As causas desses problemas podem ser sobrecargas, lubrificação, humidade, sujidade e envelhecimento.

Capítulo 3

Determinação das frequências características

De acordo com a disponibilidade do N/M Corvo, em Maio de 2016 foram efetuadas a análise de vibrações a seis bombas presentes na instalação do navio, sendo quatro relativas ao sistema de refrigeração, uma do sistema de lastro e uma de circulação de óleo da caldeira. Também foram realizadas medições ao motor eléctrico do ventilador do ar condicionado e à sua base de apoio.

As medições efetuadas antes e depois da docagem do navio, têm como objetivo identificar os equipamentos que necessitam de intervenção, prever os spares necessários à intervenção e por fim verificar os resultados da mesma a cada um destes, informação apresentada no capitulo seguinte.

Previamente foram calculadas algumas frequências características dos equipamentos, tais como, frequências associadas à rotação, pás da turbina do ventilador e rolamentos.

Na tabela 3 e 4 são apresentados os cálculos efetuados para quatro harmónicas da frequência característica do conjunto e das pás do ventilador do motor elétrico.

Cálculos efetuados para as frequências características do conjunto:

$$f(1ª harmónica) = \frac{rpm}{60}\ (Hz) \rightarrow (equação\ 16)$$

$$f(4ª harmónica) = f(1ª harmónica) \times 4 \rightarrow (equação\ 17)$$

	Rotação (rpm)	1ª Harmónica (Hz)	2ª Harmónica (Hz)	3ª Harmónica (Hz)	4ª Harmónica (Hz)
Baixa temperatura	1450	24,2	48,4	72,6	96,8
Lastro e esgoto	1471	24,5	49	73,5	98
Água do mar	1450	24,2	48,4	72,6	96,8
Caldeira	2900	48,3	96,6	144,9	193,2
Ar condicionado	2920	48,7	97,4	146,1	194,8

Tabela 3 - Frequência característica do conjunto

Para determinação das frequências características das pás do ventilador utilizaram-se as seguintes equações:

$$f(1ª harmónica) = \frac{rpm}{60} \times Nº\ de\ pás(Hz) \rightarrow (equação\ 18)$$

$$f(4ª harmónica) = f(1ª harmónica) \times 4 \rightarrow (equação\ 19)$$

	Rotação (rpm)	Número de pás	1ª Harmónica (Hz)	2ª Harmónica (Hz)	3ª Harmónica (Hz)	4ª Harmónica (Hz)
Baixa temperatura	1450	5	121	242	363	484
Lastro e esgoto	1471	9	220,5	441	661,5	882
Água do mar	1450	9	217,8	435,6	653,4	871,2
Caldeira	2900	7	338,1	676,2	1014,3	1352,4
Ar condicionado	2920	10	487	974	1461	1948

Tabela 4 - Frequência característica das pás do ventilador

Por sua vez, para o cálculo das frequências características dos rolamentos utilizaram-se as equações seguintes para os diferentes rolamentos.

$$D_P = \frac{D + d}{2} \rightarrow Diâmetro\ primitivo\ (equação\ 20)$$

$$BPFI = \frac{N_{rolm} \times f}{2} \times \left(1 + \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.pista\ interior\ (equação\ 21)$$

$$BPFO = \frac{N_{rolm} \times f}{2} \times \left(1 - \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.pista\ exterior\ (equação\ 22)$$

$$BSF = \frac{D_p \times f}{D_{rolm}} \times \left(1 - \left(\frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right)^2\right) \rightarrow Freq.corpos\ rolantes\ (equação\ 23)$$

$$FTF = \frac{f}{2} \times \left(1 - \frac{D_{rolm}}{D_P} \times \cos\alpha\right) \rightarrow Freq.gaiola\ (equação\ 24)$$

Nas tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 estão presentes as várias frequências características dos rolamentos existentes em cada um dos conjuntos motor/bomba.

		Rolamento	Características	Freq.(Hz)
Refrigeração de baixa temperatura (24,2 Hz)	**Motor elétrico**	6311 C3	Dp=35,03mm	BPFI=119,2
			α=0º	BPFO=74,4
			Drolm. = 8,12mm	BSF=91,6
			Nºrolm.= 8	FTF=9,3
		6311 C3	Dp=35,03mm	BPFI=119,2
			α=0º	BPFO=74,4
			Drolm. = 8,12mm	BSF=91,6
			Nºrolm. = 8	FTF=9,3
	Bomba	6310-2RSR-C3	Dp= 32,28mm	BPFI=119,3
			α=0º	BPFO=74,3
			Drolm. = 7,49mm	BSF=91,6
			Nrolm. = 8	FTF=9,3

Tabela 5 - Frequência caracteristica dos rolamentos (Bomba de refrigeração de baixa temperatura)

		Rolamento	Características	Freq.(Hz)
Lastro e Esgoto (24,5 Hz)	**Motor elétrico**	6212 2RS C3	Dp=34,05mm	BPFI=145,0
			α=0º	BPFO=100,0
			Drolm. =6,25mm	BSF=118,4
			Nrolm. = 10	FTF=10,0
		6312 C3	Dp=37,79mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm. = 8,74mm	BSF=92,8
			Nrolm. = 8	FTF=9,4

	Bomba	6311 2RS1	Dp=35,03mm	BPFI=119,2
			α=0º	BPFO=74,4
			Drolm. = 8,12	BSF=91,6
			Nºrolm= 8	FTF=9,3
		6309 2RS1	Dp=29,13mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm. = 6,87mm	BSF=92,8
			Nrolm=8	FTF=9,4

Tabela 6 - Frequência caracteristica dos rolamentos (Bomba de lastro e esgoto)

		Rolamento	**Características**	**Freq.(Hz)**
Refrigeração principal água salgada (24,2 Hz)	**Motor elétrico**	6313	Dp= 40,35mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm. = 9,37mm	BSF=92,8
			Nrolm=8	FTF=9,4
		6313	Dp= 40,35mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm. = 9,37mm	BSF=92,8
			Nrolm=8	FTF=9,4
	Bomba	7313-BECPB	Dp= 40,04mm	BPFI=120,7
			α=40º	BPFO=75,3
			Drolm. = 9,37mm	BSF=92,8
			Nrolm=12	FTF=9,4

		6212-2RS1	Dp=34,05mm	BPFI=145,0
			α=0º	BPFO=100,0
			Drolm. =34,05	BSF=118,4
			Nrolm. = 10	FTF=10,0

Tabela 7 - Frequência caracteristica dos rolamentos (Bomba de refrigeração de água salgada)

		Rolamento	Características	Freq.(Hz)
Circulação de óleo térmico caldeira (48,3 Hz)	**Motor elétrico**	6308 C3	D=90mm	BPFI=238,0
			α=0º	BPFO=148,4
			-	BSF=98.4
			-	FTF=18,5
		6308 C3	D=90mm	BPFI=238,0
			α=0º	BPFO=148,4
			-	BSF=98.4
			-	FTF=18,5
	Bomba	6306 C4	Dp= 20,47mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm.=4,68mm	BSF=92,8
			Nrolm=8	FTF=9,4
		6306 C4	Dp= 20,47mm	BPFI=120,7
			α=0º	BPFO=75,3
			Drolm.=4,68mm	BSF=92,8
			Nrolm=8	FTF=9,4

Tabela 8 - Frequência caracteristica dos rolamentos (Bomba de circulação de óleo térmico)

		Rolamento	Características	Freq.(Hz)
Ventilador de ar condicionado	**Motor Elétrico (48,7 Hz)**	6308-2Z/C3	D=90mm	BPFI=238,0
			α=0º	BPFO=148,4
			-	BSF=98.4
			-	FTF=18,5
		6208-2Z/C3	D=23,62mm	BPFI=262,6
			α=0º	BPFO=175,7
			Drolm. = 4,68mm	BSF=210,5
			Nrolm=9	FTF=19,5

Tabela 9 - Frequência caracteristica dos rolamentos (Bomba de circulação de óleo térmico)

Resultados obtidos em Maio 2017

3.1. Análise de vibrações

Nas medições efetuadas aos equipamentos utilizou-se um transdutor de velocidade colocado nos pontos indicados esquematicamente nas tabelas referentes às características e resultados de cada um dos equipamentos.

Através dos dados coletados não só foi possível quantificar o nível de vibração através do seu valor global (RMS), mas também pela sua amplitude ou Valor de Pico.

Como referido anteriormente, cada defeito tem um conjunto de características próprias que o permitem identificar no espectro de sinal. São exemplo:

- ✓ Desiquilíbrio: Frequência coincidente com a frequência de rotação do eixo do equipamento (1X RPM);
- ✓ Desalinhamento: Pode ser ângular, "offset" ou combinado. No primeiro, a frequência de vibração é geralmente a de rotação do eixo do equipamento (1X RPM) porém, em casos severos, poderá aparecer uma frequência de 2ª ordem ou mesmo ordens superiores. No segundo é produzida uma vibração em que o componente 2X RPM tem maior amplitude que o de 1X RPM;
- ✓ Folgas: Originam harmónicas a 1X RPM, 2X RPM, 3X RPM, 4X RPM, ...

- ✓ Defeitos em rolamentos: Podem ocorrer nas suas diferentes partes e são identificados pela presença de frequências características de cada uma dessas partes, calculadas a partir das equações 20 a 24;
- ✓ Cavitação: Detetável com altas frequências aleatórias.

3.1.1. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1

Na tabela 10 são apresentados os dados relativos ao motor elétrico e bomba centrifuga de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 (LT1). Nesta também estão presentes os valores globais da análise de vibrações, em mm/s, para cada ponto de medição, bem como uma comparação com a ISO 2372.

Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1

Motor eléctrico	
Tipo	DHBS 125-125/315
Potência (kW)	22
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	1450
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	5
Rolamento (1) ventilador	6311 C3
Rolamento (2)	6311 C3
Bomba centrifuga	
Tipo	DHBS 125-125/315
Capacidade (m^3/h)	140
Rolamento	6310-2RSR-C3



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,27	< 2,80
V1EM	0,68	< 1,12
H2EM	0,65	< 1,12
V2EM	0,59	< 1,12
A2EM	0,94	< 1,12
A3P	0,76	< 1,12
H3P	1,60	< 2,80
V3P	1,15	< 2,80

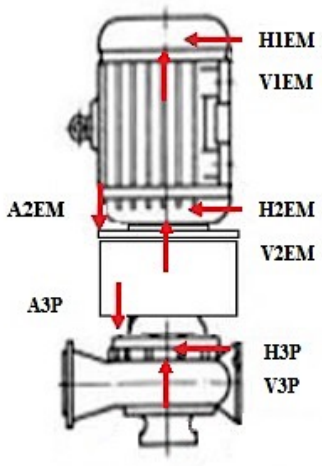


Tabela 10- Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 (Maio 2017)

De acordo com a norma mencionada, os dados coletados para os pontos de medição, H1EM, H3P e V3P, apresentam valores satisfatórios. Todos os restantes valores são considerados bons para esta máquina.

Nos gráficos 11 e 12 é apresentado o espetro de sinal obtido nos pontos de medição considerados satisfatórios, H1EM e H3P, respetivamente.

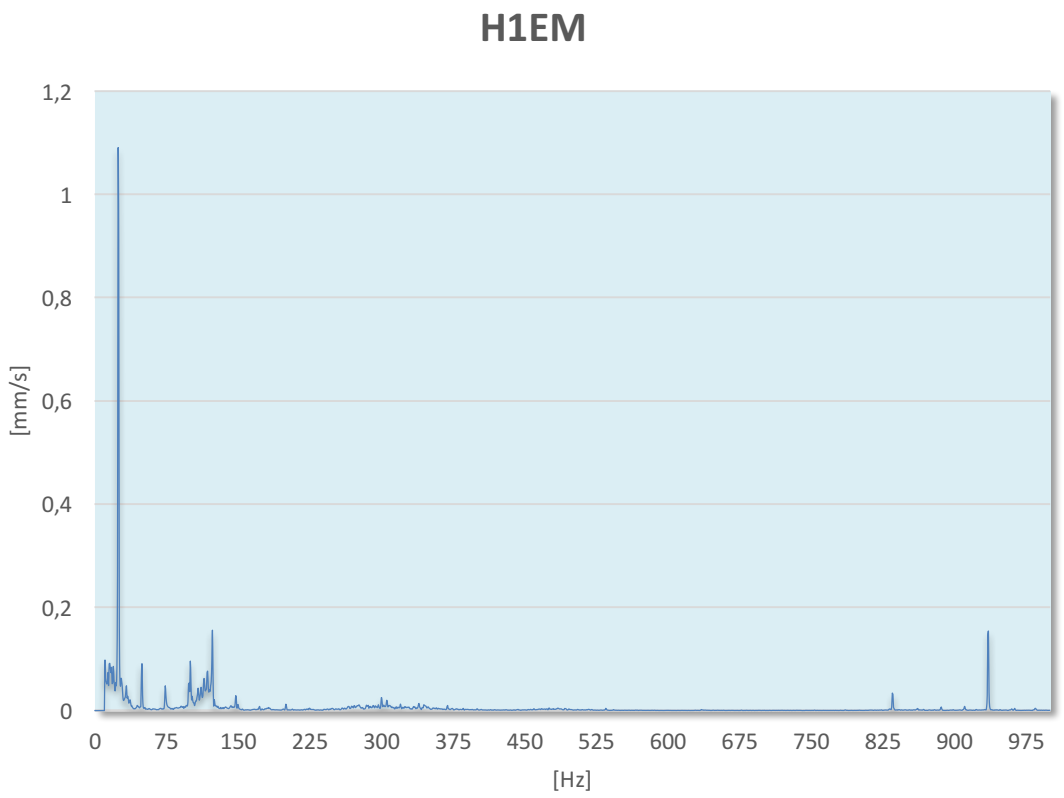


Gráfico 1 - Espectro de frequência no ponto de medição H1EM - LT1 - (Maio 2017)

No gráfico 11, referente ao ponto de medição H1EM, observa-se a primeira harmónica do conjunto, a 24,4 Hz com um valor de pico de cerca de 1,1 mm/s, estando a segunda e terceira harmónica do conjunto localizadas a 48,8 Hz e 73,8 Hz, respetivamente, com uma baixa intensidade.

A primeira harmónica referente à frequência característica das pás do ventilador é notável no espetro, embora com pouca intensidade, com uma frequência de cerca de 123 Hz.

Nas frequências de 119 Hz, 835 Hz e 935 Hz existem alguns picos de fraca intensidade.

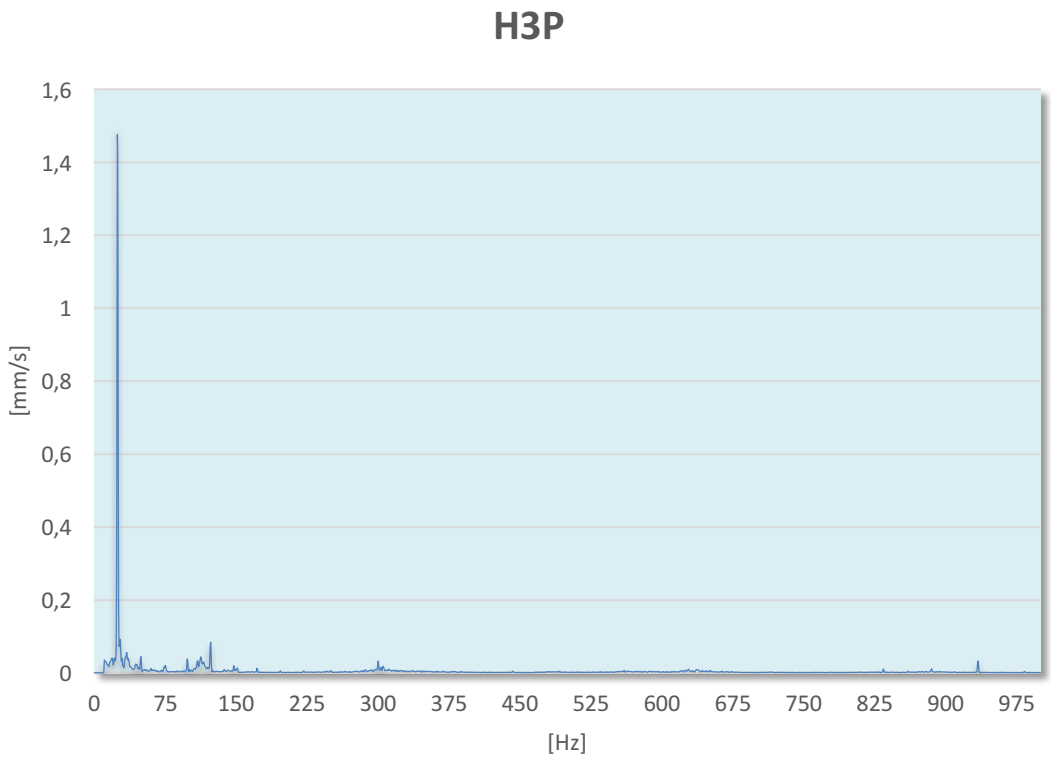


Gráfico 2 - Espectro de frequência no ponto de medição H3P - LT1 - (Maio 2017)

No gráfico 12, está presente a primeira harmónica da frequência características do conjunto com um valor pico de 1,4 mm/s.

A 123 Hz observa-se um pico de baixa intensidade representativo da frequência característica das pás.

3.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2

Na tabela 11 são apresentados os dados relativos ao motor elétrico e bomba do grupo de refrigeração de baixa temperatura Nº2 (LT2). Novamente são apresentados os valores vibracionais para cada ponto de medição e feita uma comparação com a norma.

Bomba de água de refrigeração baixa temperatura Nº2

Motor eléctrico	
Tipo	DHBS 125-125/315
Potência (kW)	22
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	1450
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	5
Rolamento (1) ventilador	6311 C3
Rolamento (2)	6311 C3
Bomba centrifuga	
Tipo	DHBS 125-125/315
Capacidade (m^3/h)	140
Rolamento	6310-2RSR-C3



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	0,98	< 1,12
V1EM	0,95	< 1,12
H2EM	0,48	< 1,12
V2EM	0,70	< 1,12
A2EM	1,15	< 2,80
A3P	1,00	< 1,12
H3P	0,56	< 1,12
V3P	0,81	< 1,12

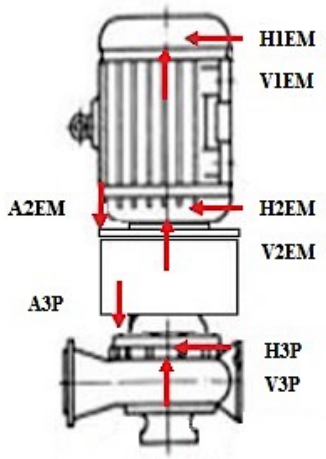


Tabela 11 - Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 (Maio 2017)

Observou-se, na tabela 11, que de uma forma geral os valores são considerados normais para este tipo de máquina. Tendo apenas a vibração axial no ponto 2 apresentado um valor satisfatório.

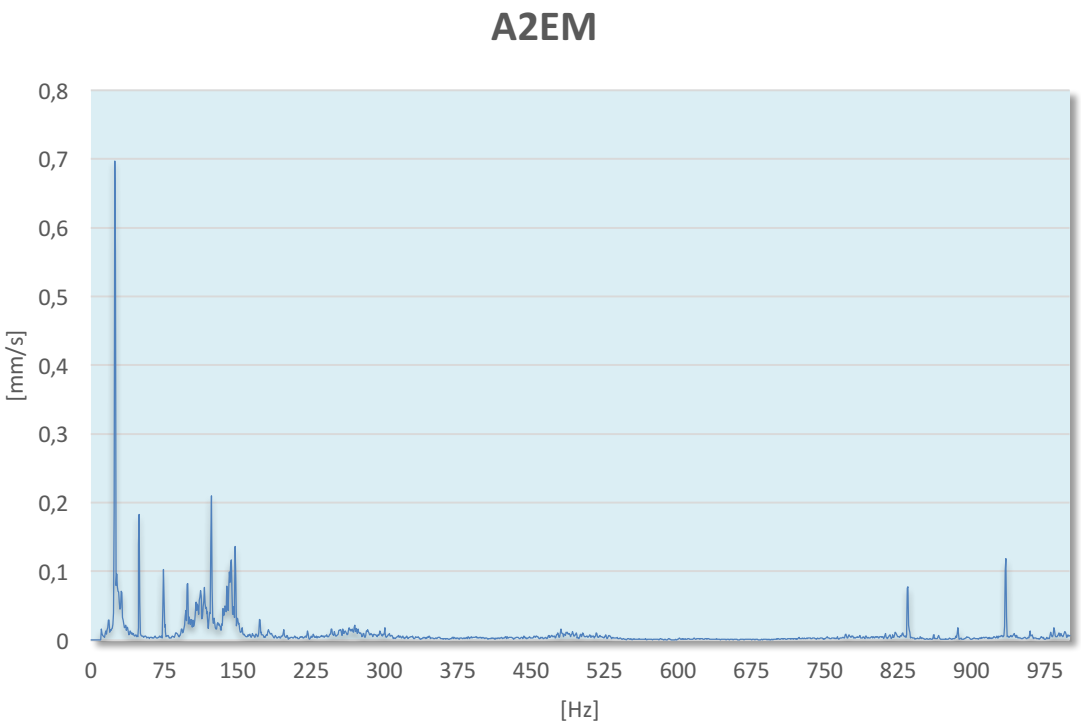


Gráfico 3 - Espectro de frequência no ponto de medição A2EM – LT2 - (Maio 2017)

No espetro referente a A2EM, observou-se que a primeira harmónica do conjunto a 24,4 Hz apresenta um valor de pico de 0,7 mm/s. Apesar de baixa amplitude, também estão presentes a segunda, terceira e quarta harmónica do conjunto nos 48,8 Hz, 73,8 Hz e 98 Hz, respetivamente.

A primeira harmónica, referente à frequência característica das pás do ventilador, é visível a cerca de 123 Hz.

Nas frequências de 119 Hz, 835 Hz e 935 Hz observam-se alguns picos mas de baixa intensidade.

3.1.3. Bomba de lastro e esgoto

Na tabela 12 estão presentes os dados relativos ao motor elétrico e bomba do grupo de lastro e esgoto. Nesta mesma tabela também são apresentados os valores globais para cada ponto de medição e a localização dos mesmos.

Bomba de lastro e esgoto

Motor eléctrico	
Tipo	BEVI El-motor 200L-4
Potência (kW)	30
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50
Rotação (rpm)	1471
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	9
Rolamento (1) ventilador	6212 2RS C3
Rolamento (2)	6312 C3
Bomba centrifuga	
Tipo	SL 125/330
Capacidade (m^3/h)	200
Consumo (kW)	22,1
Rolamento	6311 2RS1
Rolamento	6312 C3
Rolamento	6309 2RS1



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,72	< 2,80
V1EM	2,20	< 2,80
H2EM	1,25	< 2,80
V2EM	1,39	< 2,80
A2EM	2,65	< 2,80
A3P	1,88	< 2,80
H3P	1,69	< 2,80
V3P	3,26	< 7,10

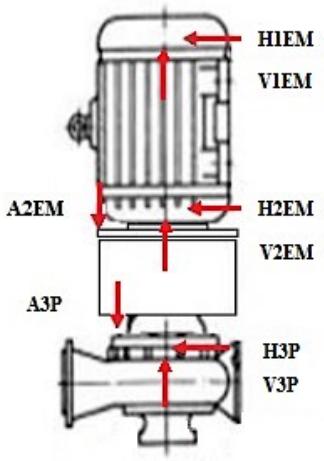


Tabela 12 - Bomba de Lastro e Esgoto (Maio 2017)

De acordo com os valores obtidos no ensaio, o conjunto apresenta valores satisfatórios, excepto o ponto V3P que é considerado, segundo a norma ISO 2372, insatisfatório.

De seguida são apresentados graficamente os espetros de frequência nos pontos V1EM, A2EM e V3P.

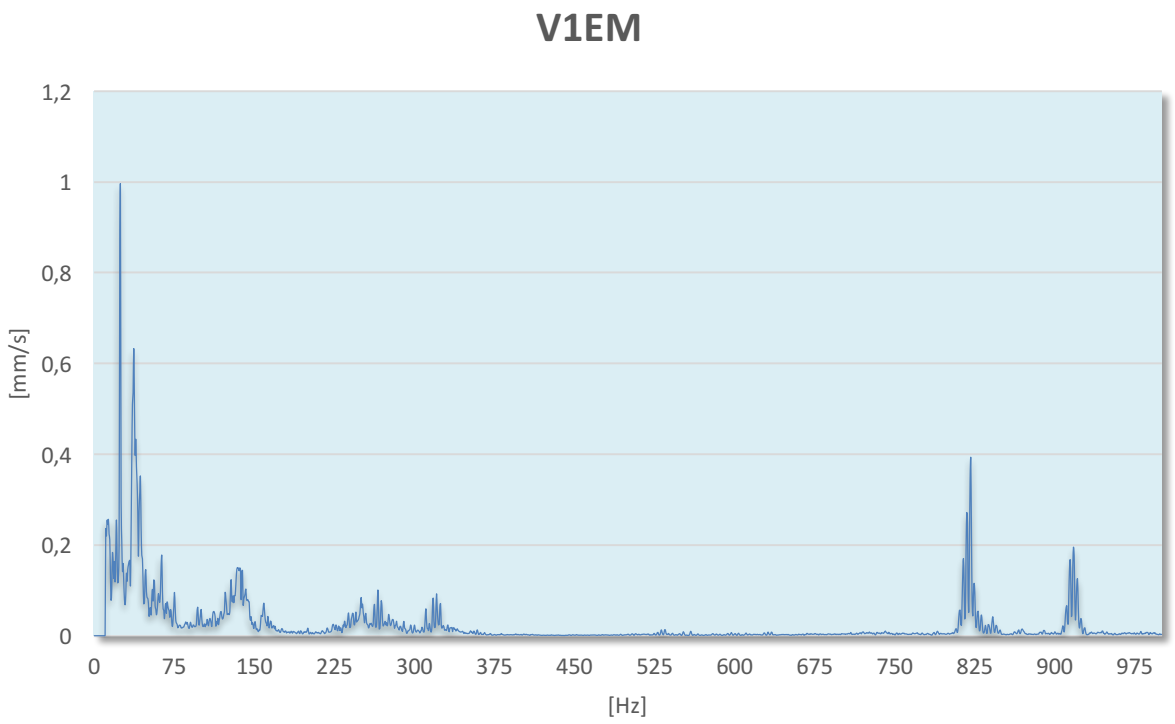


Gráfico 4 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em V1EM (Maio 2017)

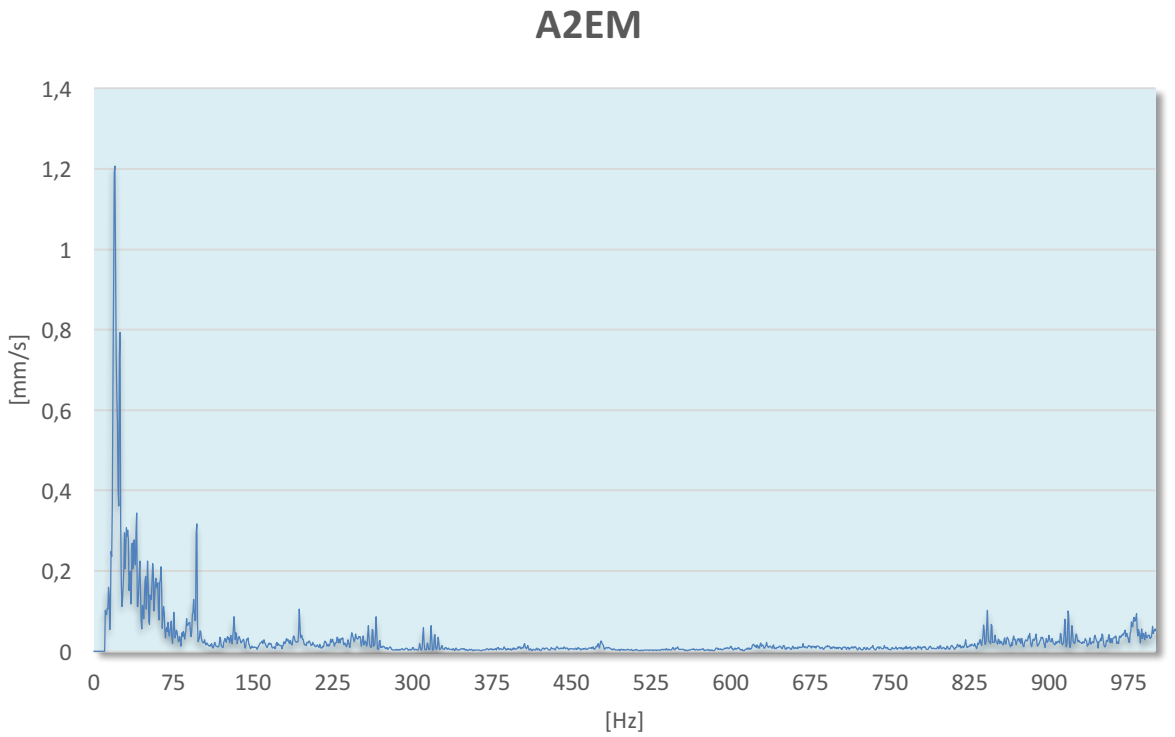


Gráfico 5 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em A2EM (Maio 2017)

Em ambos os espetros de frequência, acima representados, estão presentes as frequências características de primeira e segunda ordem do conjunto e algumas frequências aleatórias.

De notar, que em A2EM está presente um pico a 19 Hz, antes da frequência característica de rotação do conjunto.

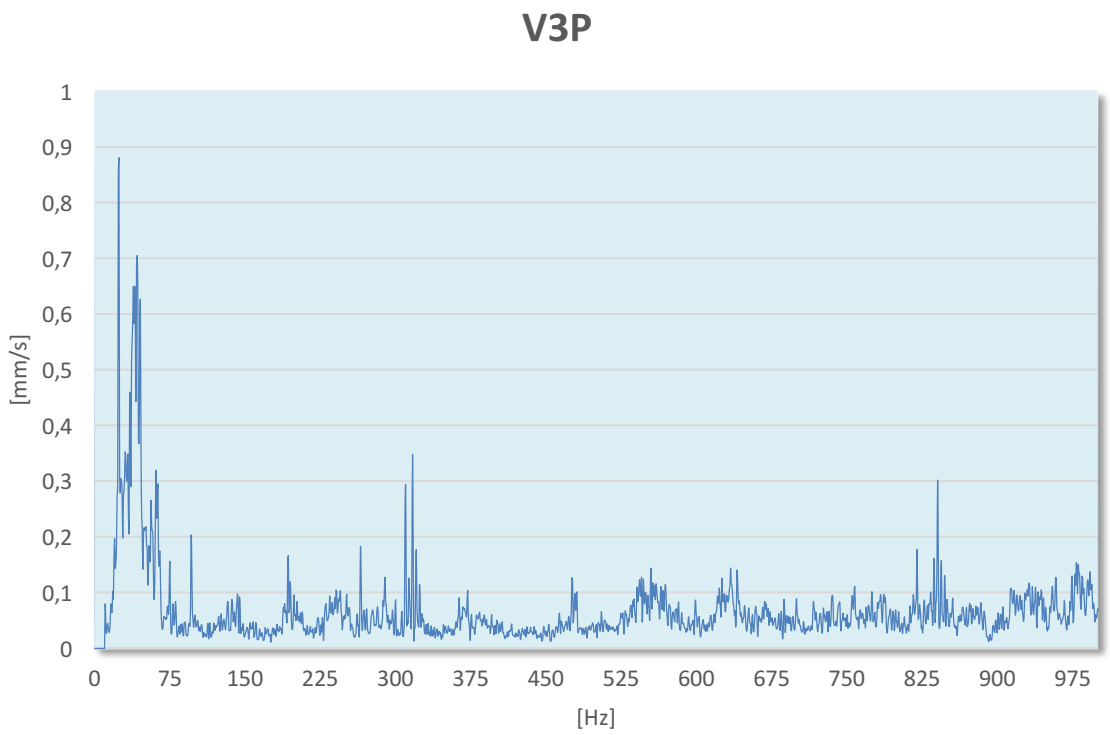


Gráfico 6 - Espetro referente à bomba de lastro e esgoto em V3P (Maio 2017)

Em V3P o nível de vibração é elevado e considerado insatisfatório. Da análise do espetro verifica-se a existência de muitas frequências com valores de amplitude não muito elevados. Considerando a posição do ponto de medição poderemos estar a observar algum fenómeno relacionado com a passagem do fluído na bomba.

3.1.4. Bomba de água do mar EB

Na tabela 13, apresenta-se os dados relativos ao conjunto motor elétrico e bomba centrifuga de água do mar (estibordo*/EB), bem como, os valores globais obtidos na análise de vibrações efetuada e a sua comparação com a norma.

Bomba de água do mar EB

Motor eléctrico	
Tipo	Norm El-motor 225S-4
Potência (kW)	37
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50
Rotação (rpm)	1450
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	9
Rolamento (1) ventilador	6313
Rolamento (2)	6313
Bomba centrifuga	
Tipo	SL 150-330
Capacidade (m^3/h)	360
Consumo (kW)	33,4
Rolamento	7313-BECPB
Rolamento	6212-2RS1



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,03	< 1,12
V1EM	0,92	< 1,12
H2EM	0,73	< 1,12
V2EM	0,78	< 1,12
A2EM	0,46	< 1,12
A3P	0,52	< 1,12
H3P	0,47	< 1,12
V3P	0,78	< 1,12

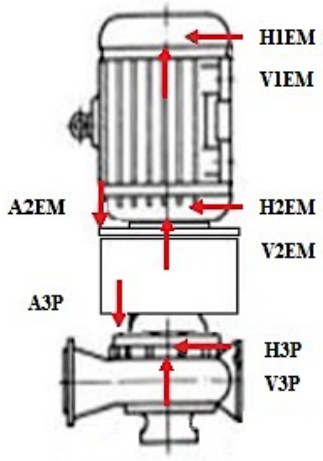


Tabela 13 - Bomba Água do Mar EB (Maio 2017)

* Disposição na casa da máquina

Todos os valores de RMS coletados são considerados bons segundo a norma mencionada nesta dissertação, ISO 2372.

A representação gráfica do espetro de frequência no ponto H1EM está reproduzida no gráfico 17.

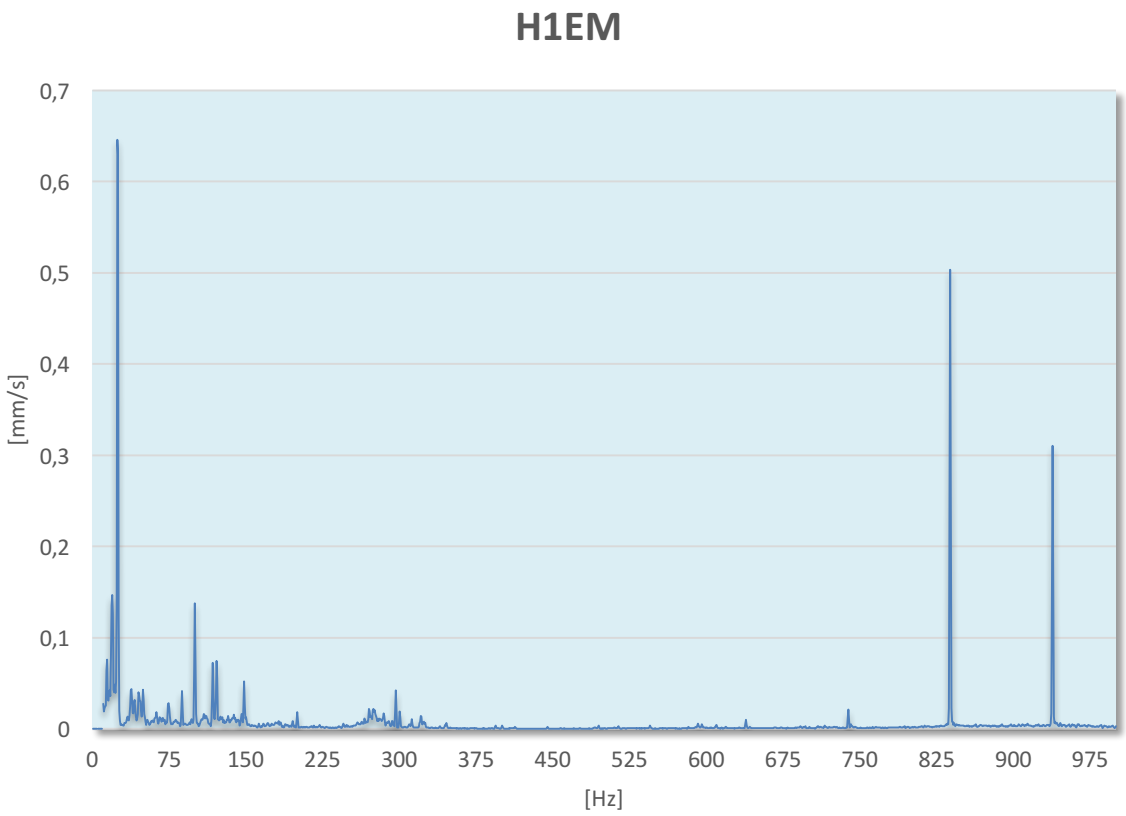


Gráfico 7 – Espetro referente à bomba de água do mar EB em H1EM (Maio 2017)

Da análise do espetro verifica-se que a frequência de rotação do conjunto, localiza-se a 24,4 Hz com um valor 0,65 mm/s. Existindo também outros valores de vibração nas seguintes frequências, 19,3 Hz, 100 Hz, 838 Hz e 938 Hz.

3.1.5. Bomba de água do mar BB

Os dados relativos ao conjunto motor elétrico e bomba centrifuga de água do mar (bombordo*/BB), bem como, os valores globais para cada ponto de medição são apresentados na tabela 14.

Bomba de água do mar BB

Motor eléctrico	
Tipo	Norm El-motor 225S-4
Potência (kW)	37
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50
Rotação (rpm)	1450
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	9
Rolamento (1) ventilador	6313
Rolamento (2)	6313
Bomba centrifuga	
Tipo	SL 150-330
Capacidade (m^3/h)	360
Consumo (kW)	33,4
Rolamento	7313-BECPB
Rolamento	6212-2RS1



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	0,89	< 1,12
V1EM	1,07	< 1,12
H2EM	0,63	< 1,12
V2EM	0,82	< 1,12
A2EM	0,53	< 1,12
A3P	0,74	< 1,12
H3P	0,46	< 1,12
V3P	0,52	< 1,12

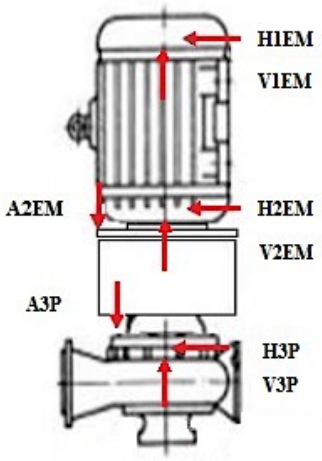


Tabela 14 - Bomba Água do Mar BB (Maio 2017)

* Disposição na casa da máquina

Todos os valores globais coletados são considerados bons para este tipo de máquina. O espetro de sinal no ponto V1EM encontra-se no gráfico 18.

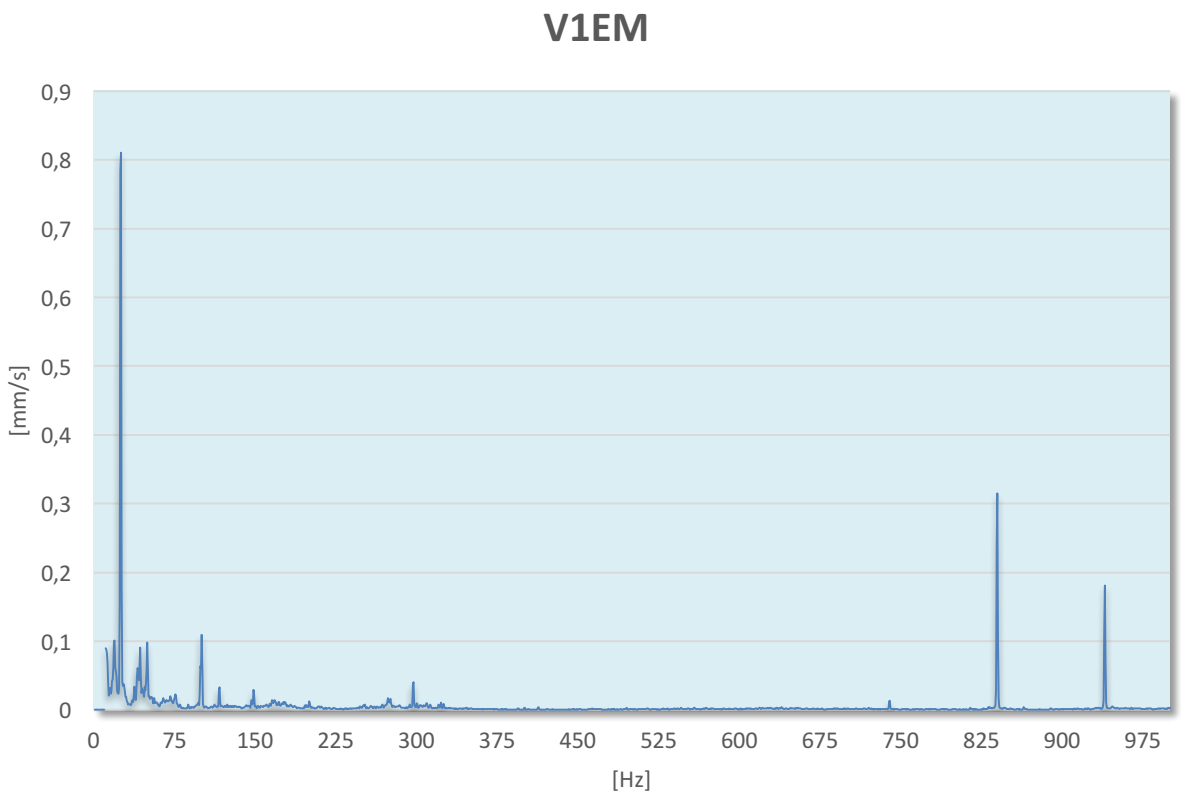


Gráfico 8 - Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em V1EM (Maio 2017)

No espetro referente ao ponto V1EM, constatou-se que frequência característica do conjunto, 24,4 Hz, apresenta uma amplitude de 0,8 mm/s e a segunda harmónica do conjunto a 49 Hz com uma amplitude de 0,1 mm/s.

Existem outros valores de vibração nas seguintes frequências, 100 Hz, 839 Hz e 939 Hz com amplitudes diferentes.

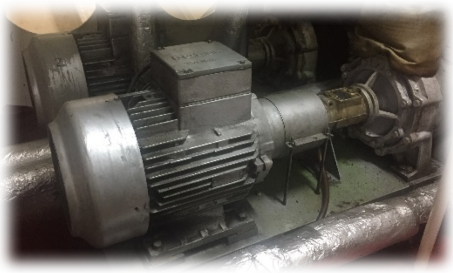
3.1.6. Bomba de circulação de óleo térmico

Na tabela 15 estão os dados relativos ao conjunto motor elétrico e bomba centrifuga de circulação de óleo da caldeira Nº2.

O nível vibracional para cada um dos pontos medidos e a sua localização, também estão presentes na tabela 15.

Bomba circulação de óleo térmico Nº2

Motor eléctrico	
Motor	ALLWEILER AG
Tipo	NTT 40-250 (Ø242) U5A-W4
Potência (kW)	11
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	2900
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	2
Nº Pás Ventilador	7
Rolamento (1) ventilador	6308 C3
Rolamento (2)	6308 C3



Bomba centrifuga	
Tipo	40-250
Capacidade (m^3/h)	22
Consumo (kW)	9,2
Rolamento 1	6306 C4
Rolamento depois bucim	6306 C4

Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe I
H1EM	4,49	< 4,50
V1EM	3,07	< 4,50
H2EM	3,77	< 4,50
V2EM	4,86	> 4,50
A2EM	6,78	> 4,50
V3C	13,47	> 4,50
V4C	0,71	< 0,71
V5P	0,39	< 0,71
A5P	0,81	< 1,80

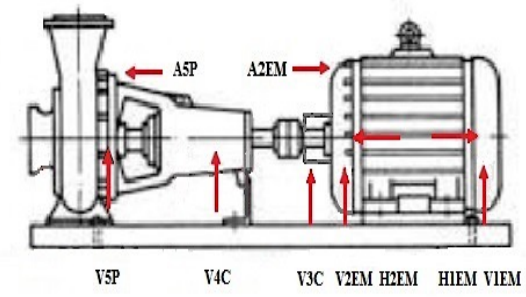


Tabela 15 - Bomba de circulação de óleo térmico (Maio 2017)

Dado os valores obtidos para este equipamento deparamo-nos com a necessidade de uma intervenção urgente. Os níveis vibracionais para o motor elétrico são elevados e insatisfatórios.

Os espetros de frequência para nos pontos H1EM, V2EM e V3C estão presentes nos gráficos 19, 20 e 21, respetivamente.

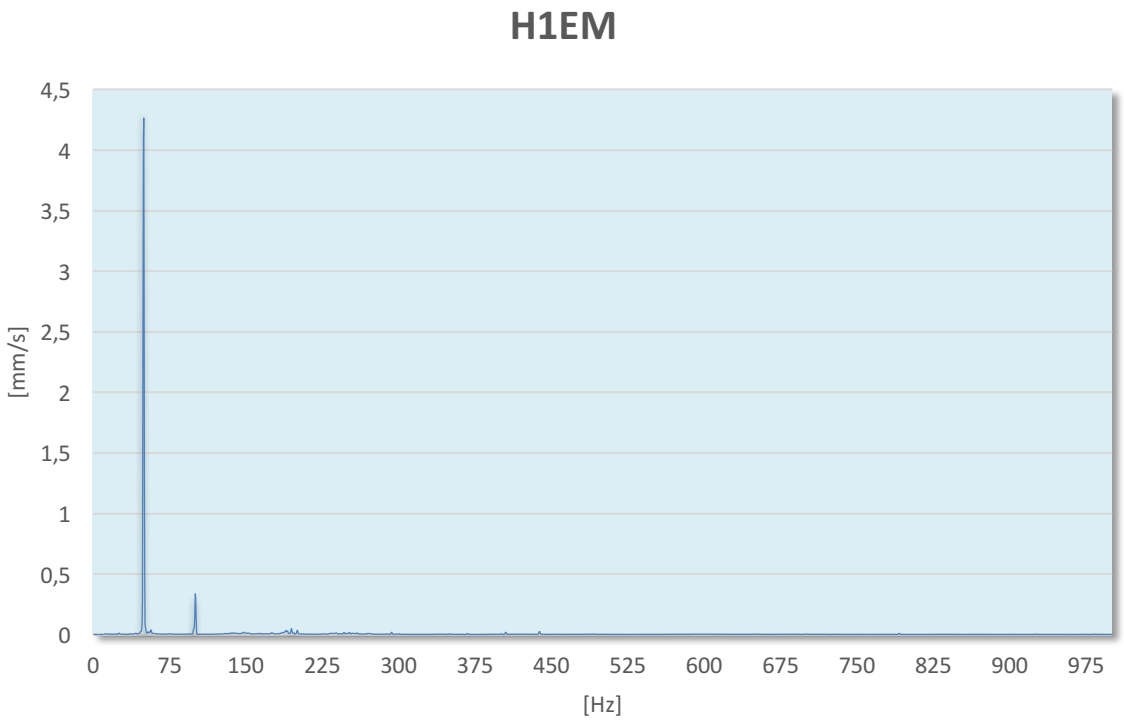


Gráfico 9 – Espetro referente à bomba de óleo térmico em H1EM (Maio 2017)

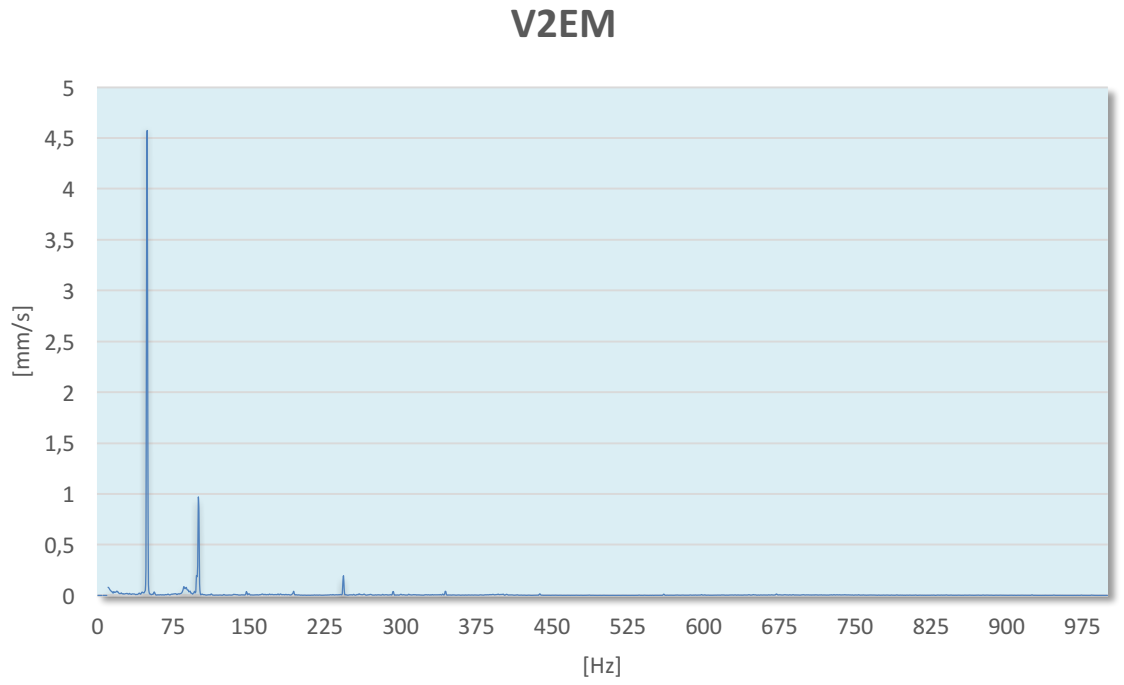


Gráfico 10 - Espetro referente à bomba de óleo térmico em V2EM (Maio 2017)

Ambos os pontos de medição, H1EM e V2EM, apresentam um espetro idêntico. Estão presentes duas frequências com amplitude elevada, uma que diz respeito à primeira harmónica do conjunto, 49,4 Hz, e uma segunda harmónica do conjunto, a cerca de 100 Hz. Ambos os pontos apresentam níveis de vibração inaceitáveis.

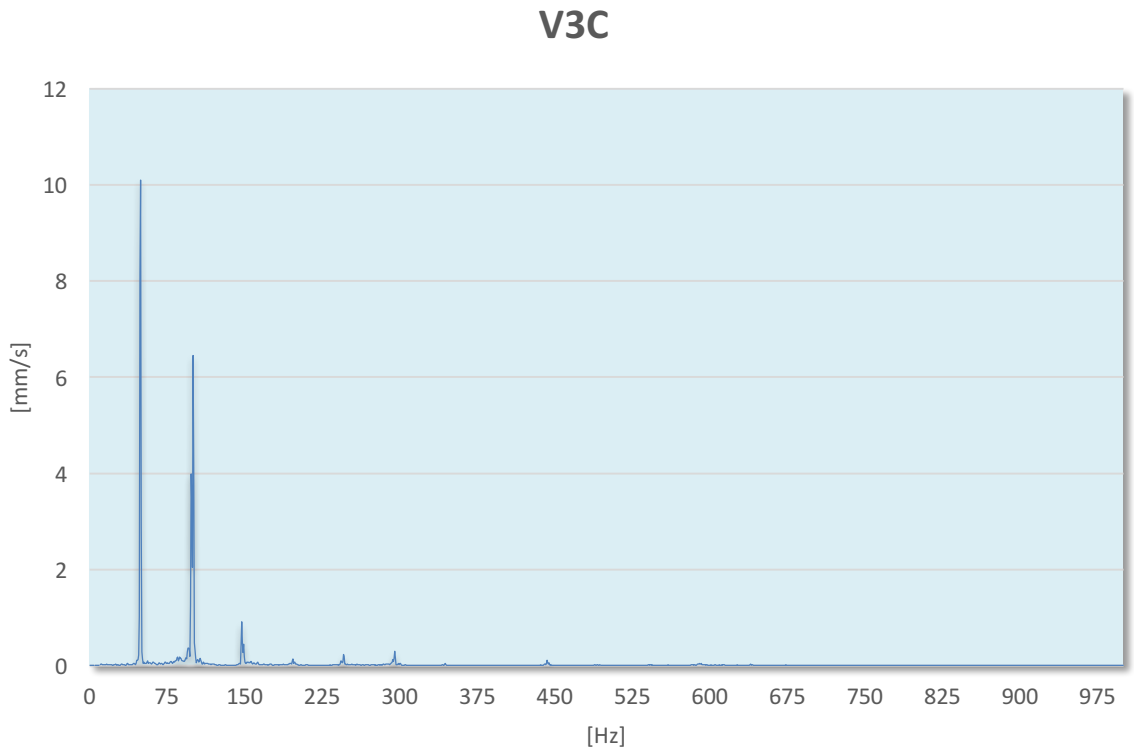


Gráfico 11 - Espetro referente à bomba de óleo térmico em V3C (Maio 2017)

Por sua vez, no ponto V3C, junto ao acoplamento do conjunto motor/bomba, junta-se uma terceira harmónica a 148 Hz. O nível de vibração neste ponto é severo, com um valor global de 13,5 mm/s.

Como referido, é necessário uma intervenção urgente a este equipamento.

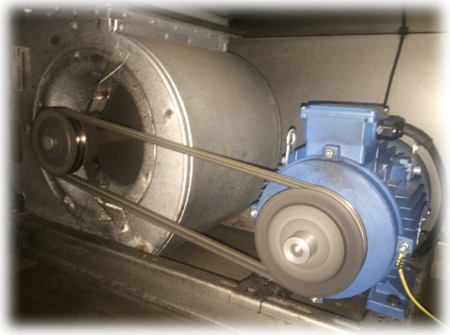
3.1.7. Ar condicionado

Os dados relativos ao motor elétrico e ventilador de ar condicionado, a localização dos pontos de medição, bem como, os valores globais em cada um deles estão presentes na tabela 16.

Neste estudo apenas foram coletados dados no motor elétrico e na respetiva base de assentamento do motor. De notar, que a carcaça do motor é de alumínio e a base de assentamento do motor elétrico apresentam um material aço inox, havendo dificuldade na fixação do sensor.

Ventilador ar condicionado dos alojamentos

Motor eléctrico	
Tipo	MOT HE31 132 SB-2
Potência (kW)	7,5
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	2920
Nº Par Polos	2
Nº Pás Ventilador	10
Rolamento Polia	6308-2Z/C3
Rolamento N-end	6208-2Z/C3
Ventilador centrifugo	
Tipo	EUMM-22 EULB-22 (Unit size)-3 (Fan size) GJLB-5-034-1-1-1-1 GTLZ-60-5-034-3-0
Capacidade (m^3/h)	2,15
Consumo (kW)	5,7
Rotação (rpm)	3213



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe I
H1EM	12,58	> 4,5
V1EM	8,53	> 4,5
H2EM	6,49	> 4,5
V2EM	11,78	> 4,5
V3B	19,96	> 4,5
V4B	5,16	> 4,5

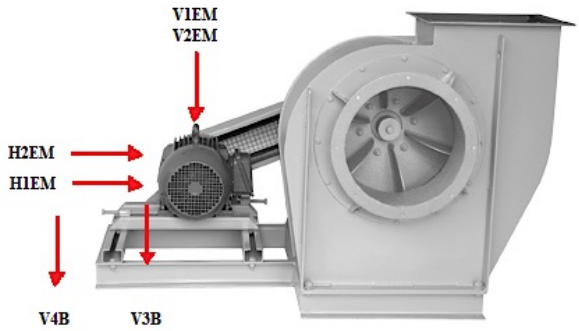


Tabela 16 - Ventilador Ar Condicionado dos Alojamentos (Maio 2017)

Todos os pontos analisados são considerados insatisfatórios. Contudo, toda a envolvente apresenta um nível vibracional elevado, transmitindo alguma vibração ao conjunto.

No gráfico 22 representa-se o espetro de sinal para o ponto de medição H1EM, considerado inaceitável.

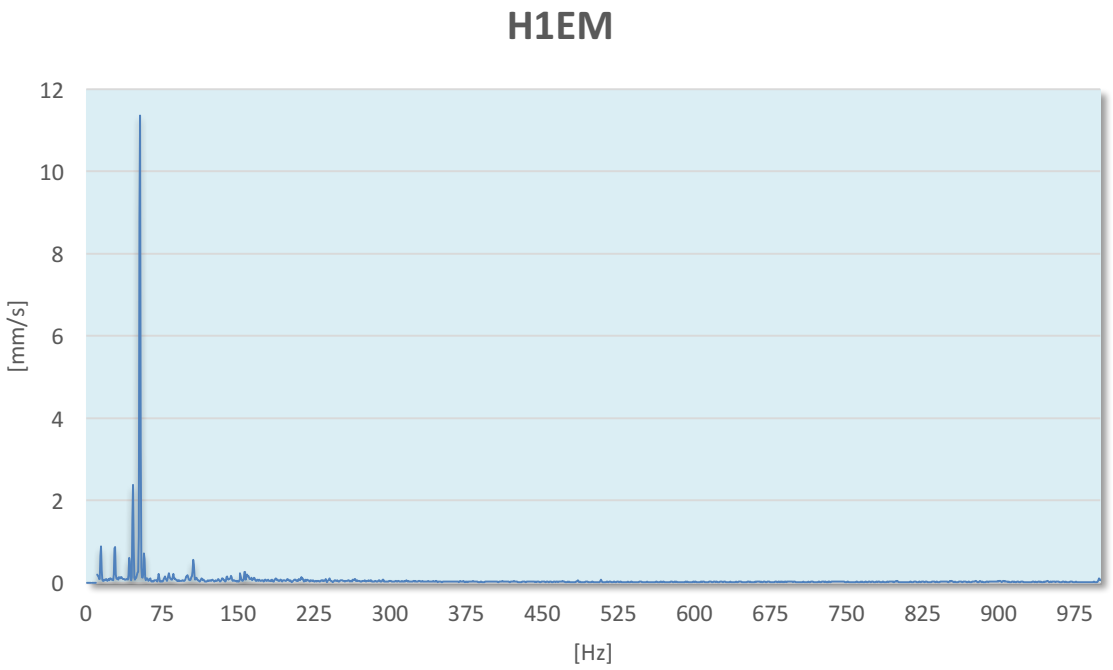


Gráfico 12 – Espetro de sinal referente ao ventilador ar condicionado em H1EM (Maio 2017)

No espetro de sinal apresentado, estão presentes duas frequências, a 14 Hz e 28 Hz, com a mesma amplitude. Existe, também, uma frequência de 46 Hz com uma amplitude de 2,4 mm/s e por fim, a frequência de rotação da máquina, 53 Hz com maior amplitude.

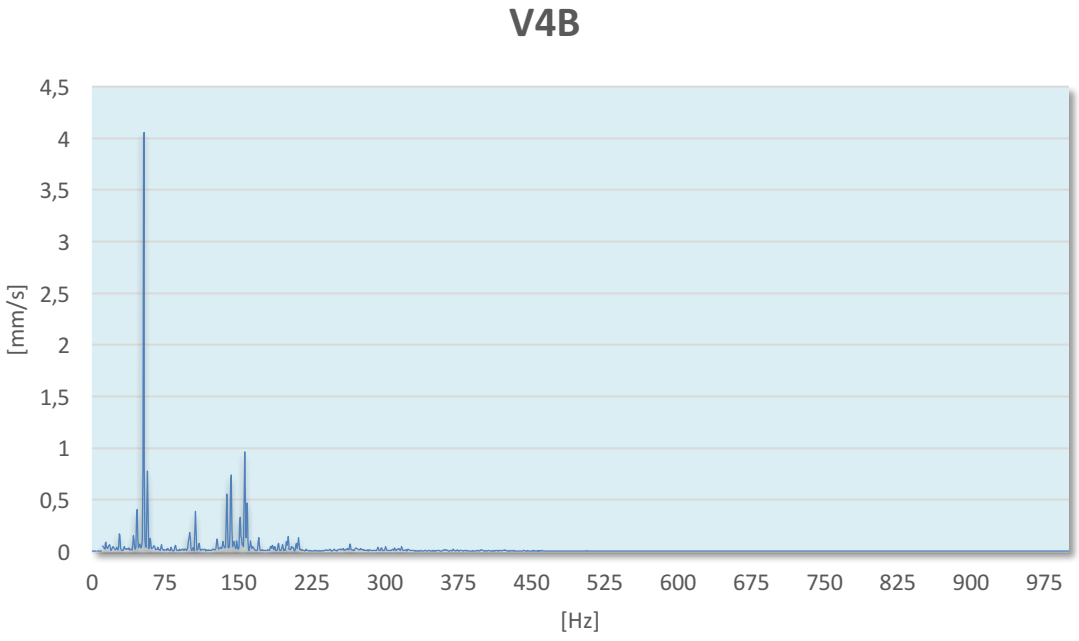


Gráfico 13 - Espetro de sinal referente à base do ventilador ar condicionado (Maio 2017)

Na base de assentamento existem algumas frequências aleatórias. Novamente, aos 53 Hz verifica-se a amplitude máxima do espetro.

3.2. Termografia

Como dito anteriormente, na maioria dos processos e atividades industriais, o parâmetro temperatura é muito importante. É uma ferramenta com forte implementação na área da manutenção e pode apresentar vantagens significativas no acompanhamento de processos e deteção precoce de falhas.

A termografia é aplicável em qualquer situação onde o conhecimento do padrão térmico através de uma superfície, forneça dados significativos de uma estrutura, processo ou sistema, nomeadamente:

- ✓ Sistemas Elétricos;
- ✓ Sistemas Mecânicos;
- ✓ Sistemas de Fluídos e Vapor;
- ✓ Eletrónica.

Posto isto, com ajuda do equipamento termográfico FLIR da ENIDH, foi possível obter alguns padrões térmicos de sistemas em funcionamento na instalação do N/M Corvo.

Consoante termografia passiva aplicada, concluiremos no capítulo 5 sobre a importância no acompanhamento e deteção de falhas de equipamentos.

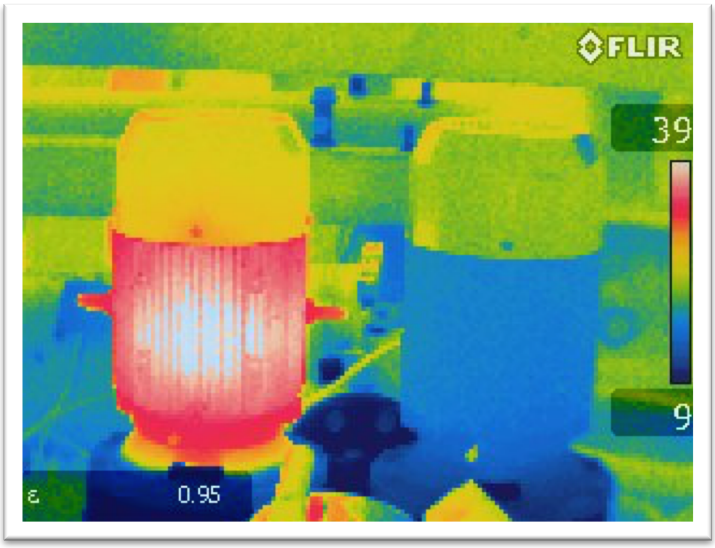


Figura 41 - Grupo de bombas circulação ao condensador do sistema de frio

Normalmente na instalação de navios mercantes existe redundância nos grupos de equipamentos.

Na figura 31 apresenta-se o grupo de bombas de circulação de água doce ao condensador do sistema de frio. Observa-se que a bomba situada à direita da imagem se encontra de 'stand-

by' e a bomba da esquerda em funcionamento com uma temperatura de funcionamento máxima de 39ºC. Da análise efetuada não se indentificam falhas no equipamento que se encontra a funcionar.

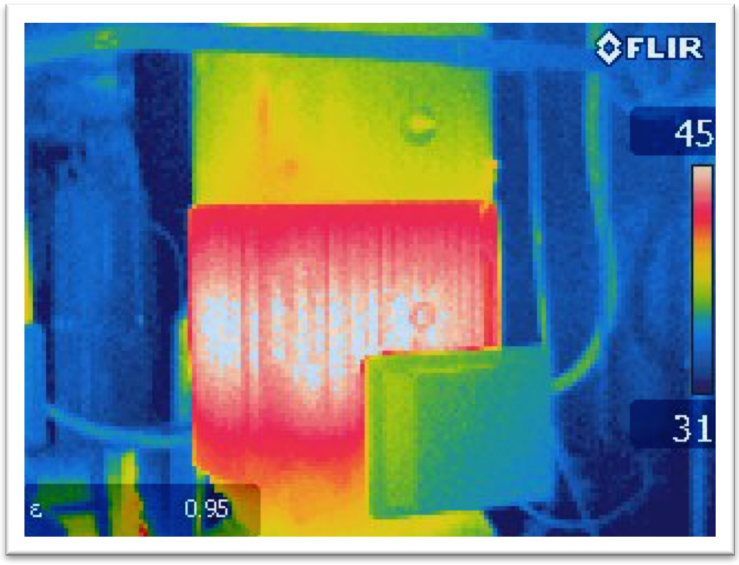


Figura 42 - Bomba de refrigeração de água de baixa temperatura

A imagem termográfica da figura 32 é alusiva à bomba de refrigeração de água de baixa temperatura. Esta apresenta uma temperatura uniforme no estator com cerca de 45 ºC. Tanto a caixa de ligações como a proteção da ventoinha do motor elétrico apresentam uma cor verde/amarelo correspondente a uma temperatura mais baixa.

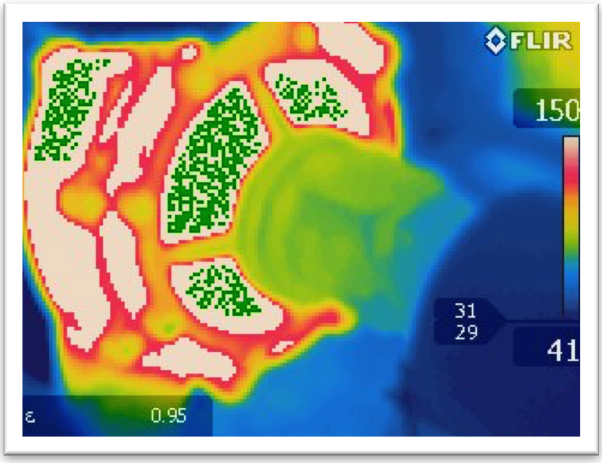


Figura 43 – Bomba de circulação de óleo térmico da caldeira

A bomba de circulação de óleo térmico da caldeira, ilustrada na figura 33, apresenta uma gama de temperaturas mais elevada, variando dos 41 ºC aos 150 ºC. O óleo térmico que alimenta o sistema de aquecimento funciona a uma temperatura de 190 ºC.

A voluta encontra-se a zona em que a temperatura é mais elevada. Neste tipo de bomba existe uma caixa de rolamentos junto ao corpo da bomba, esta apresenta uma temperatura de cerca de 100 ºC (zona verde). Da análise efetuada não se identificam falhas no equipamento em funcionamento.

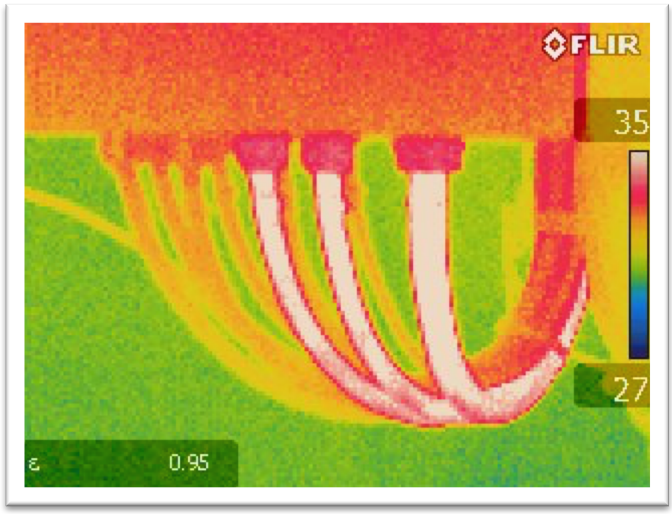


Figura 44 – Três fases da bomba de incêndio nº1

Com a bomba de incêndio nº1 em funcionamento observa-se uma distribuição de temperaturas uniforme nas três fases.

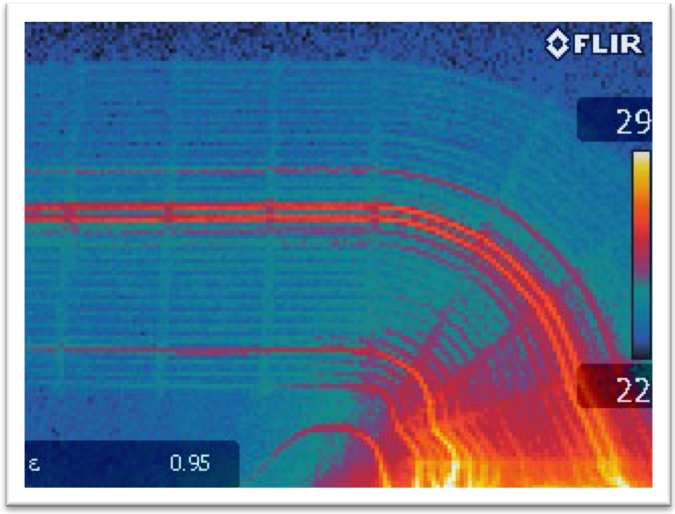


Figura 45 - Cabelagem diversa presente na instalação

A Figura 34 é composta com cabelagem diversa da instalação do navio. Analizando-a observa-se que alguns dos cabos estão a ser utilizados e apresentam uma temperatura uniforme.

Pertendiam-se identificar problemas na cabelagem, tendo-se verificado a não existência de falhas.

Capítulo 4

Resultados obtidos em Janeiro 2018

4.1. Análise de vibrações

No presente capitulo procede-se à apresentação dos dados coletados em Janeiro de 2018, após a intervenção técnica. Na intervenção efetuada foi tomada em consideração a análise efetuada aos dados coletados em Maio de 2017, assim como a programação de manutenção do programa existente a bordo.

Com auxilio das duas medições efetuadas será ainda possível efetuar uma reflexão sobre importância e evolução que esta técnica disponibiliza para a manutenção de instalações.

4.1.1. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1

Os dados relativos ao motor elétrico, bem como, os dados da bomba centrifuga de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 estão presentes na tabela 17. Os valores globais da análise de vibrações para cada ponto de medição são posteriores à intervenção técnica realizada.

Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1		
Motor eléctrico		
Tipo	DHBS 125-125/315	
Potência (kW)	22	
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50	
Rotação (rpm)	1450	
Nº Par Polos	4	
Nº Pás Ventilador	5	
Rolamento (1) ventilador	6311 C3	
Rolamento (2)	6311 C3	

Bomba centrifuga	
Tipo	DHBS 125-125/315
Capacidade (m^3/h)	140
Rolamento	6310-2RSR-C3

Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	0,90	< 1,12
V1EM	1,28	< 2,80
H2EM	0,49	< 1,12
V2EM	0,37	< 1,12
A2EM	0,99	< 1,12
A3P	0,74	< 1,12
H3P	0,96	< 1,12
V3P	1,54	< 2,80

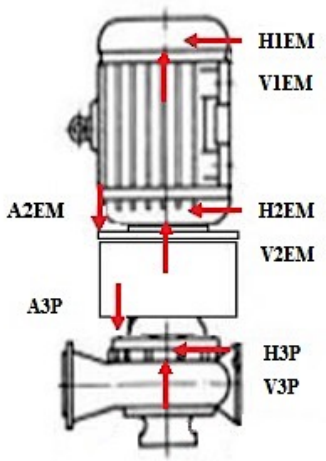


Tabela 17- Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1 (Janeiro 2018)

No geral os valores obtidos são considerados normais para este tipo de máquina. Apenas para os pontos de medição, V1EM e V3P são considerados valores satisfatórios.

Nos gráficos 24 e 25 estão representados os espetros de frequências respetivos aos pontos de medição considerados satisfatórios.

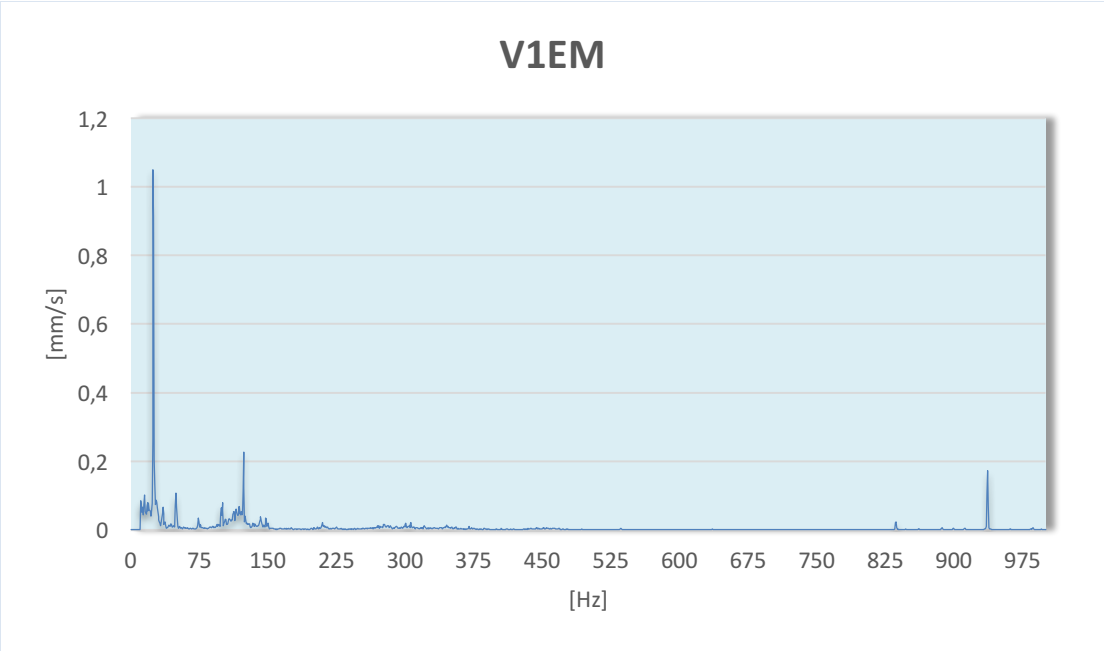


Gráfico 14 - Espectro de sinal no ponto de medição V1EM -LT1- (Janeiro 2018)

Nos valores respeitantes a V1EM, observa-se que a frequência de rotação do conjunto destaca-se com um valor de pico de cerca de 1,1 mm/s, por sua vez, a segunda e terceira harmónica do conjunto estão presentes a cerca 48,8 Hz e 73,8 Hz, respetivamente.

A frequência característica das pás do ventilador é visível no espetro de sinal com uma frequência de 123 Hz.

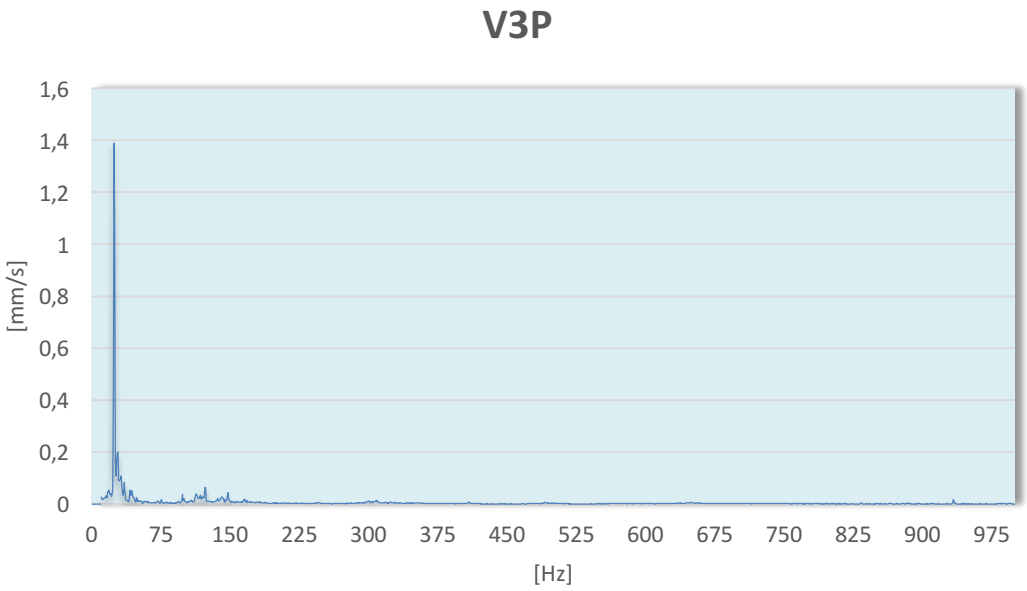


Gráfico 15 - Espectro de sinal no ponto de medição V3P –LT1- (Janeiro 2018)

No gráfico 25 apenas está assinalada a frequência de rotação do conjunto a 24,4 Hz com um valor de pico de cerca de 1,4 mm/s.

4.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2

Os dados relativos ao motor elétrico e bomba do grupo de refrigeração de baixa temperatura Nº2, bem como, os os valores globais da análise de vibrações efetuada no segundo estudo estão presentes na tabela 18.

Bomba de água de refrigeração baixa temperatura Nº2

Motor eléctrico	
Tipo	DHBS 125-125/315
Potência (kW)	22
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	1450
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	5
Rolamento (1) ventilador	6311 C3
Rolamento (2)	6311 C3
Bomba centrifuga	
Tipo	DHBS 125-125/315
Capacidade (m^3/h)	140
Rolamento	6310-2RSR-C3



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,10	< 1,12
V1EM	1,50	< 2,80
H2EM	0,70	< 1,12
V2EM	0,62	< 1,12
A2EM	0,74	< 1,12
A3P	0,61	< 1,12
H3P	0,85	< 1,12
V3P	0,72	< 1,12

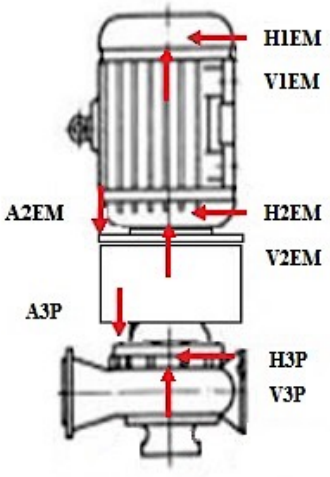


Tabela 18 - Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 (Janeiro 2018)

De uma forma geral, os valores obtidos são considerados normais para este tipo de máquina. Apenas V1EM apresenta um valor satisfatório.

O espetro de sinal referente ao ponto de medição V1EM é apresentado no gráfico 26.

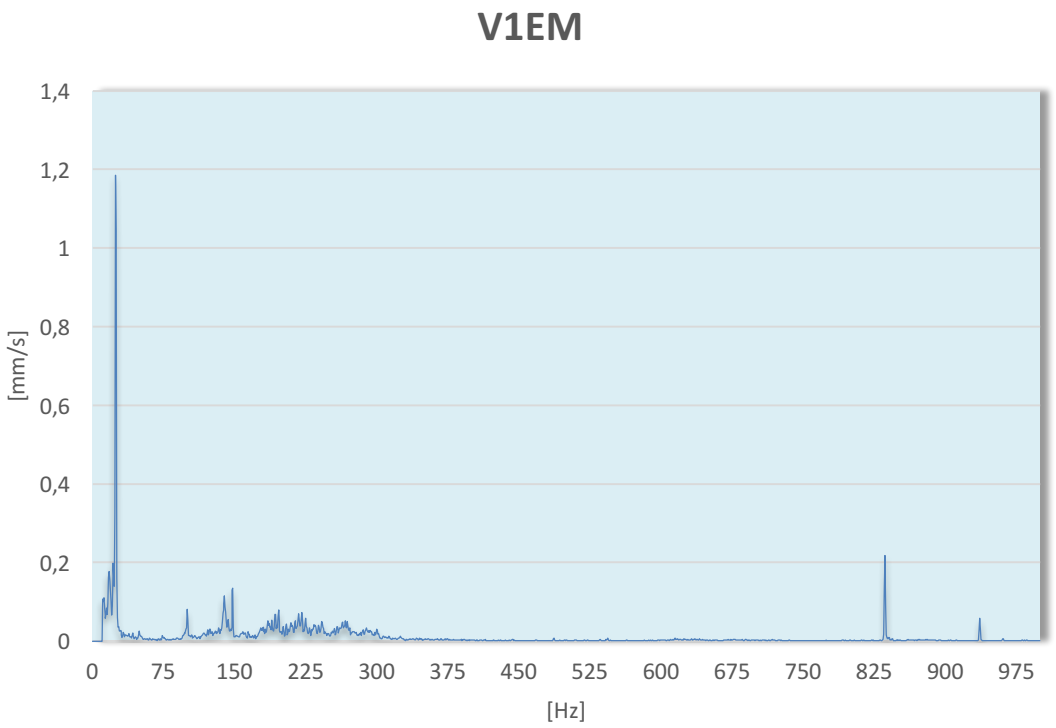


Gráfico 16 - Espectro de sinal no ponto de medição V1EM –LT2- (Janeiro 2018)

No espetro de sinal apresentado observa-se que o ponto com amplitude mais elevada corresponte à frequência de rotação do conjunto a 24,4 Hz.

Existem algumas frequências aleatórias dos 100 Hz aos 300 Hz e duas altas frequências a 836 Hz e 936 Hz.

4.1.3. Bomba de lastro e esgoto

Referentes a este ensaio vibracional, apresentam-se na tabela 19 as características e os valores globais, em mm/s, para cada ponto de medição do conjunto motor/bomba de lastro e esgoto.

Bomba de lastro e esgoto		
Motor eléctrico		
Tipo	BEVI El-motor 200L-4	
Potência (kW)	30	
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50	
Rotação (rpm)	1471	
Protecção	IP 55	
Nº Par Polos	4	
Nº Pás Ventilador	9	
Rolamento (1) ventilador	6212 2RS C3	
Rolamento (2)	6312 C3	
Bomba centrifuga		
Tipo	SL 125/330	
Capacidade (m^3/h)	200	
Consumo (kW)	22,1	
Rolamento	6311 2RS1	
Rolamento	6312 C3	
Rolamento	6309 2RS1	

Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,93	< 2,80
V1EM	2,45	< 2,80
H2EM	1,33	< 2,80
V2EM	1,76	< 2,80
A2EM	2,72	< 2,80
A3P	2,45	< 2,80
H3P	2,23	< 2,80
V3P	2,18	< 2,80

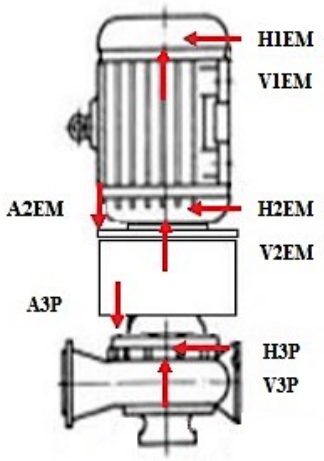


Tabela 19 - Bomba de Lastro e Esgoto (Janeiro 2018)

Os valores obtidos para esta máquina são considerados satisfatórios, apresentando-se de seguida o espetro referente aos pontos V1EM, A2EM e V3P, respetivamente.

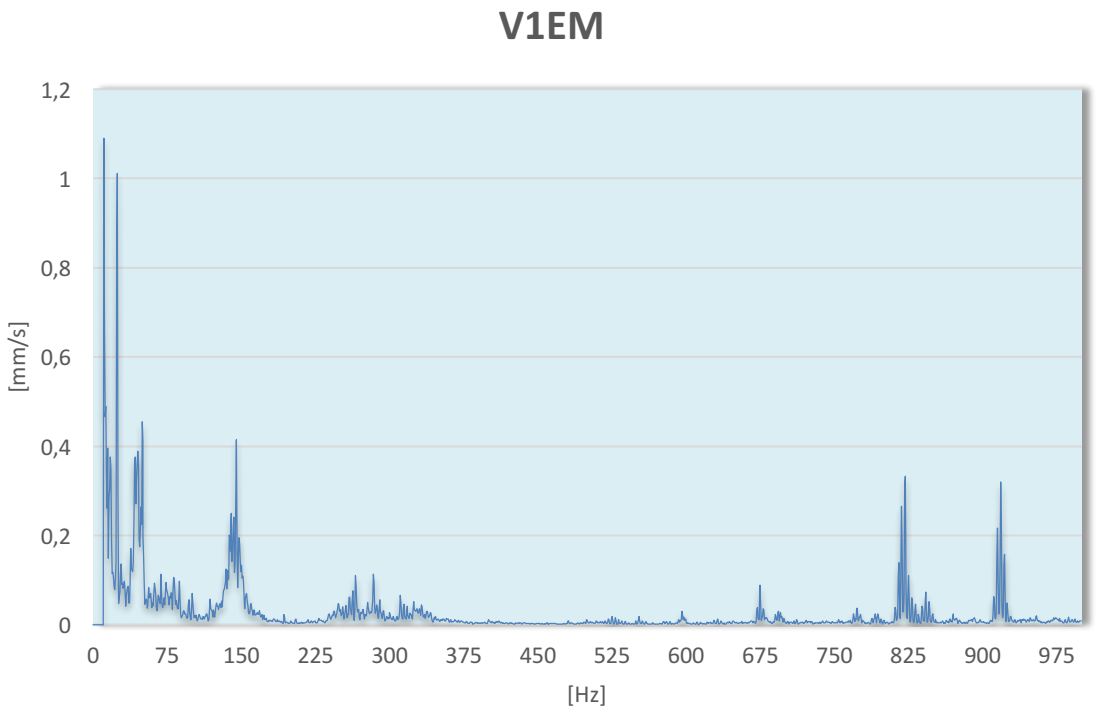


Gráfico 17 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em V1EM (Janeiro 2018)

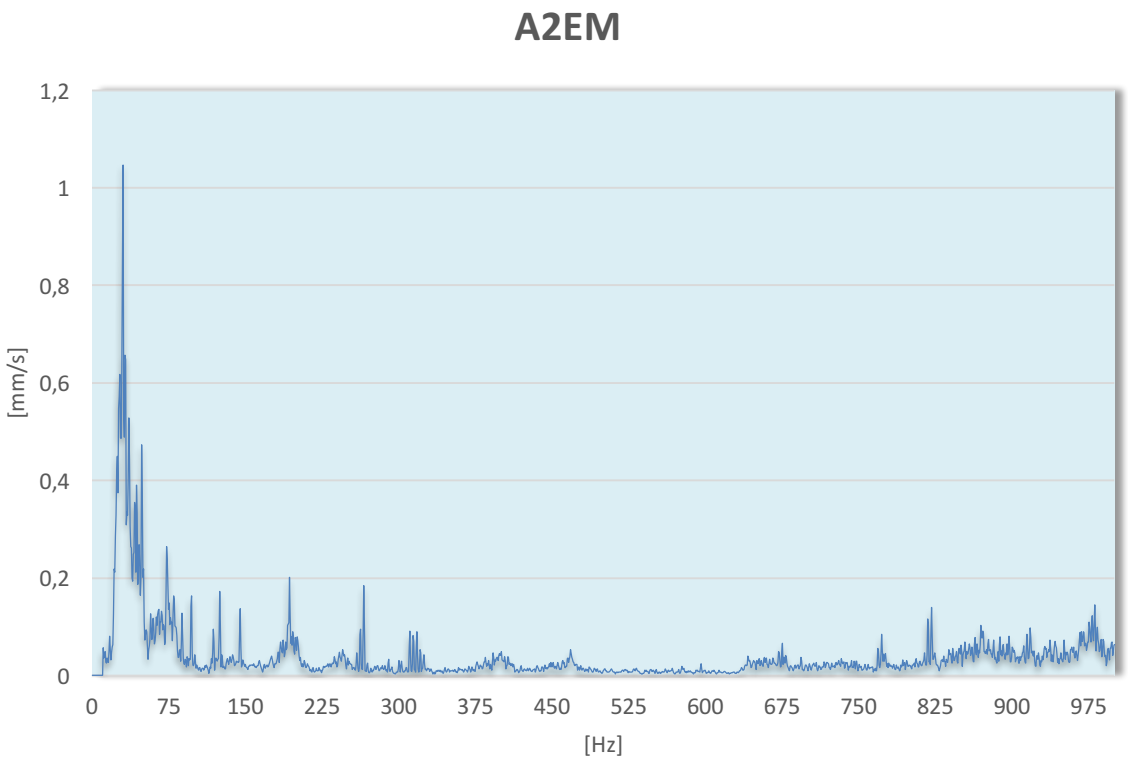


Gráfico 18 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em A2EM (Janeiro 2018)

Em ambos os espetros de sinal estão presentes as frequências características de primeira e segunda ordem do conjunto e algumas frequências aleatórias.

Em V1EM existem algumas frequências antes da frequência de rotação do conjunto.

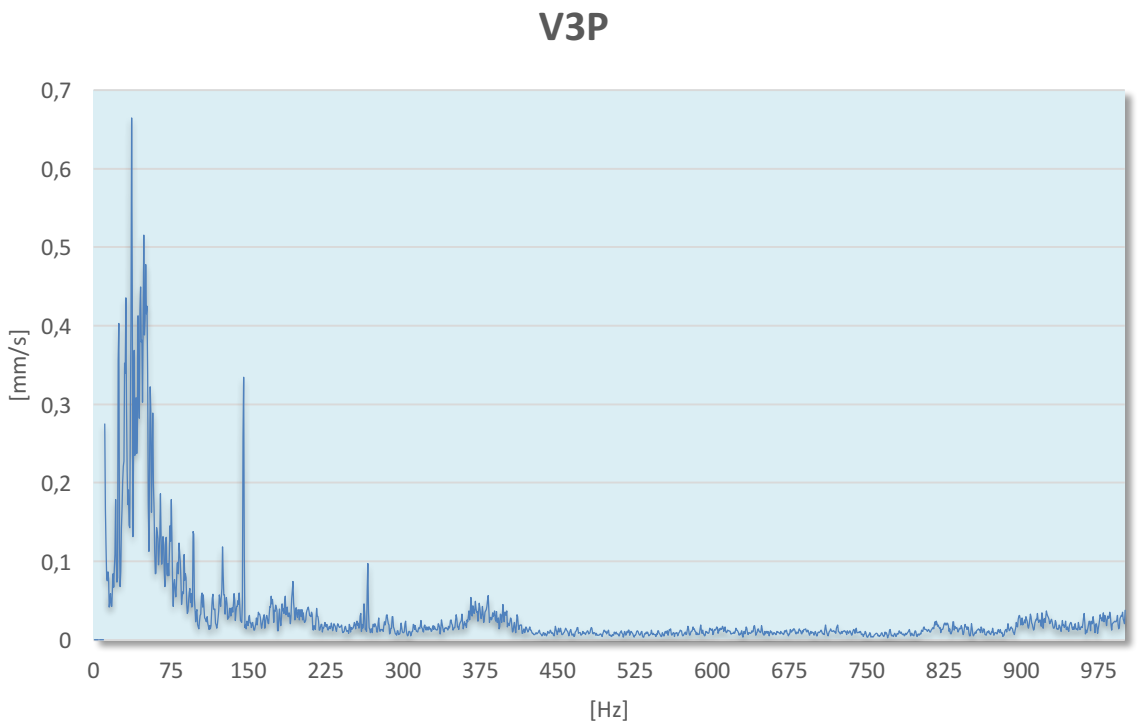


Gráfico 19 – Espetro de sinal referente à bomba de lastro e esgoto em V3P (Janeiro 2018)

No ponto de medição V3P são visíveis três harmónicas características do conjunto, sendo a segunda com maior intensidade, 0,5 mm/s.

Existem algumas baixas frequências aleatórias de grande intensidade, ocorrendo a 37 Hz a de maior intensidade, 0,65 mm/s.

4.1.4. Bomba de água do mar EB

Na tabela 20, apresenta-se os dados relativos ao conjunto motor elétrico e bomba centrifuga de água do mar estibordo (EB), bem como, os valores globais da análise de vibrações, em mm/s, para cada ponto de medição.

Bomba de água do mar EB*

Motor eléctrico	
Tipo	Norm El-motor 225S-4
Potência (kW)	37
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50
Rotação (rpm)	1450
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	9
Rolamento (1) ventilador	6313
Rolamento (2)	6313
Bomba centrifuga	
Tipo	SL 150-330
Capacidade (m^3/h)	360
Consumo (kW)	33,4
Rolamento	7313-BECPB
Rolamento	6212-2RS1



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,08	< 1,12
V1EM	0,92	< 1,12
H2EM	0,50	< 1,12
V2EM	0,85	< 1,12
A2EM	0,46	< 1,12
A3P	1,55	< 2,80
H3P	1,00	< 1,12
V3P	0,83	< 1,12

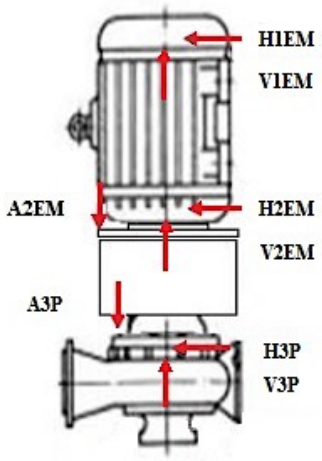


Tabela 20 - Bomba Água do Mar EB (Janeiro 2018)

* Disposição na casa da máquina

Em geral os valores globais coletados são considerados bons para este tipo de máquina. Apenas A3P é considerado satisfatório pelo que se apresenta de seguida o espetro de sinal referente.

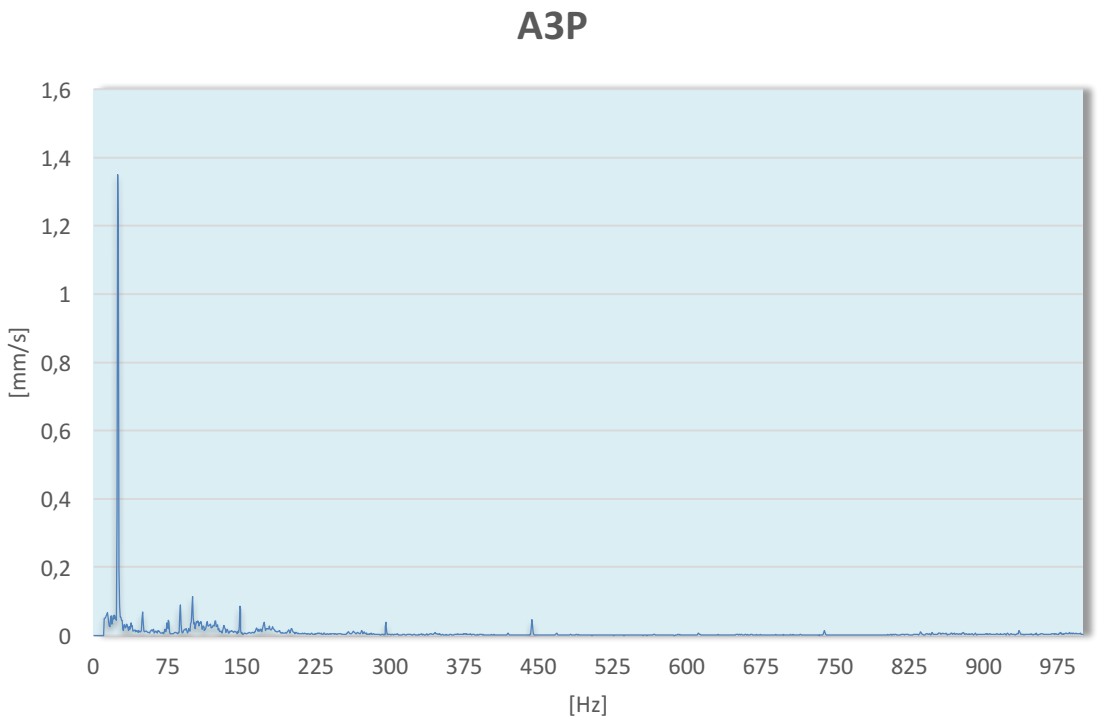


Gráfico 20 – Espetro referente de sinal à bomba de água do mar EB em A3P (Janeiro 2018)

Analisando o espetro acima, verificamos que frequência de rotação do conjunto apresenta um valor de pico de 1,35 mm/s.

Existem também outras vibrações aleatórias de baixa intensidade e pouco significativas, até aos 200 Hz

4.1.5. Bomba de água do mar BB

Na tabela seguinte estão presentes os dados relativos ao motor elétrico e bomba do grupo de água do mar bombordo BB.

Os valores globais na segunda análise de vibrações apresentam-se em mm/s, para cada ponto de medição.

Bomba de água do mar BB*

Motor eléctrico	
Tipo	Norm El-motor 225S-4
Potência (kW)	37
Tensão/frequência (V/Hz)	3X380 / 50
Rotação (rpm)	1450
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	4
Nº Pás Ventilador	9
Rolamento (1) ventilador	6313
Rolamento (2)	6313
Bomba centrifuga	
Tipo	SL 150-330
Capacidade (m^3/h)	360
Consumo (kW)	33,4
Rolamento	7313-BECPB
Rolamento	6212-2RS1



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe II
H1EM	1,20	< 2,80
V1EM	0,65	< 1,12
H2EM	0,54	< 1,12
V2EM	0,59	< 1,12
A2EM	0,67	< 1,12
A3P	0,96	< 1,12
H3P	1,55	< 2,80
V3P	1,20	< 2,80

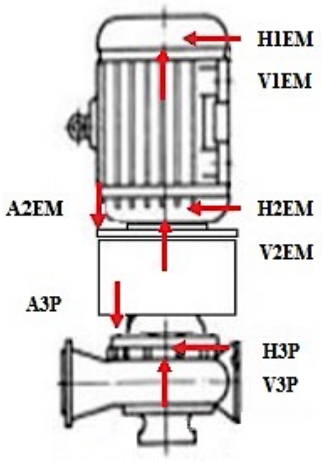


Tabela 21 - Bomba Água do Mar BB (Janeiro 2018)

* Disposição na casa da máquina

Os valores globais obtidos são considerados normais para este tipo de máquina. Apenas H1EM, H3P e V3P apresentam valores satisfatórios.

O espetro de sinal dos pontos de medição H3P e V3P são apresentados nos gráficos 31 e 32.

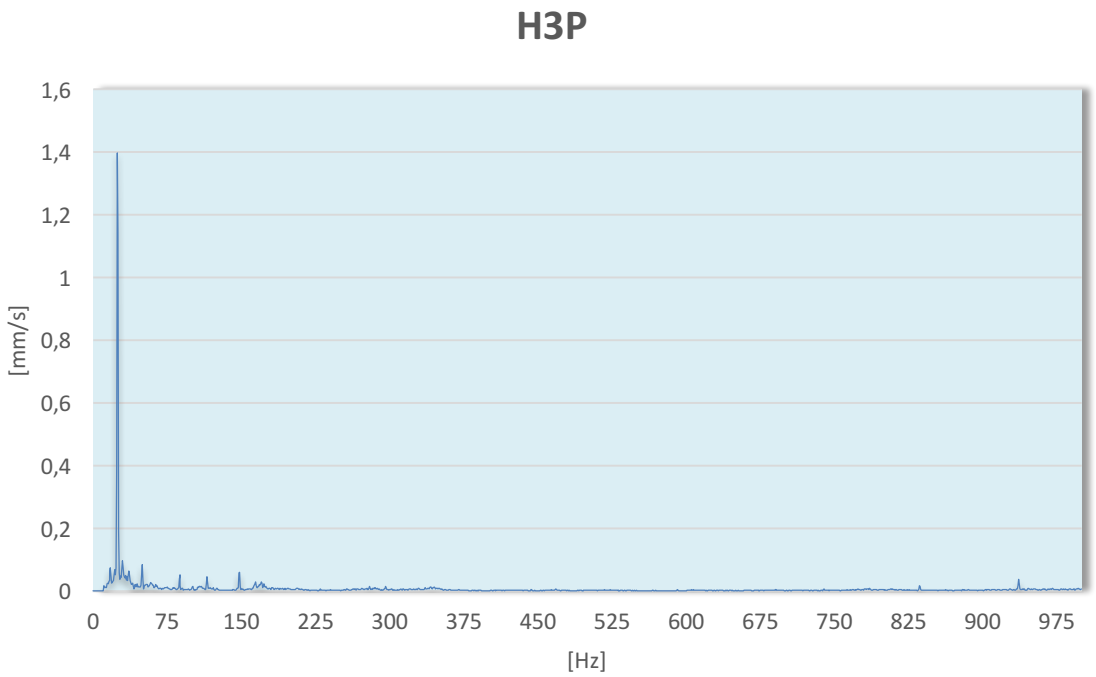


Gráfico 21 - Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em H3P (Janeiro 2018)

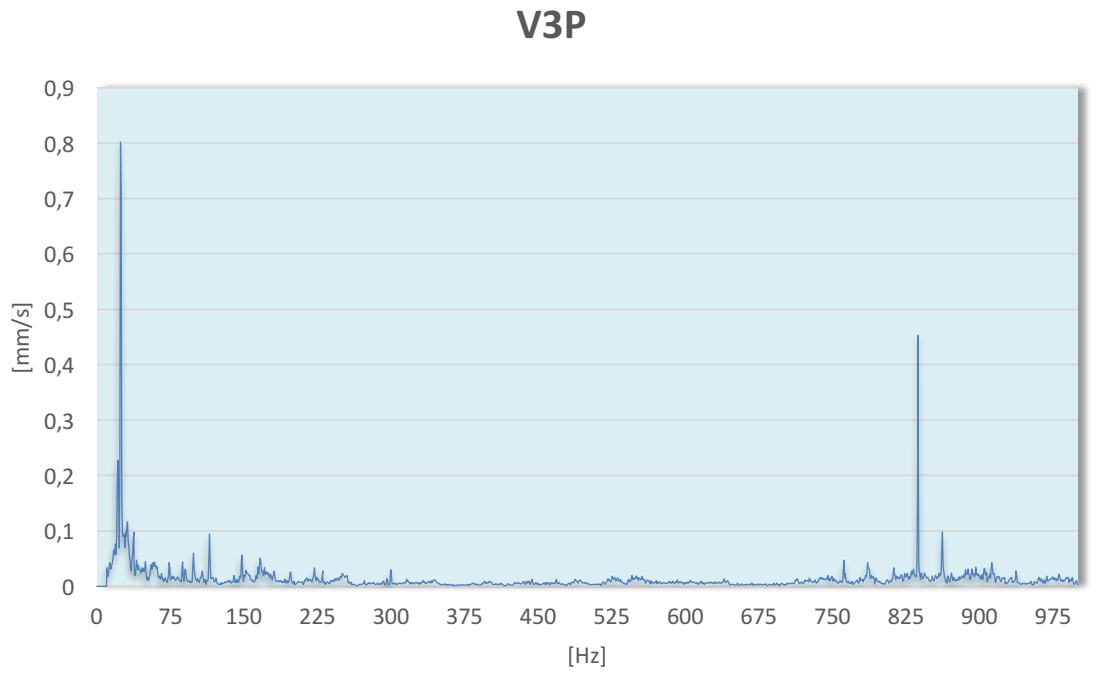


Gráfico 22 – Espetro de sinal referente à bomba de água do mar BB em V3P (Janeiro 2018)

Analisando os espetros anteriores, verificou-se em ambos que a frequência de rotação do conjunto, apresenta maior intensidade na posição horizontal.

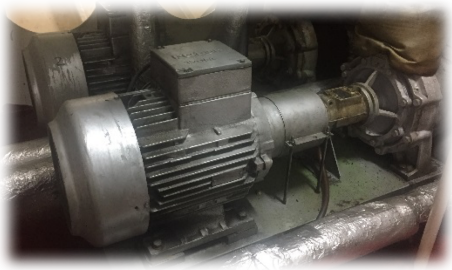
No ponto de medição V3P existem algumas frequências aleatórias e uma alta frequência a 837 Hz.

4.1.6. Bomba de circulação de óleo térmico

Novamente, na tabela 22 estão presentes os dados relativos ao conjunto motor elétrico e bomba centrifuga de circulação de óleo da caldeira Nº2. O nível global de vibração para cada um dos pontos são medidos em velocidade.

Bomba circulação de óleo térmico Nº2

Motor eléctrico	
Motor	ALLWEILER AG
Tipo	NTT 40-250 (Ø242) U5A-W4
Potência (kW)	11
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	2900
Protecção	IP 55
Nº Par Polos	2
Nº Pás Ventilador	7
Rolamento (1) ventilador	6308 C3
Rolamento (2)	6308 C3
Bomba centrifuga	
Tipo	40-250
Capacidade (m^3/h)	22
Consumo (kW)	9,2
Rolamento 1	6306 C4
Rolamento depois bucim	6306 C4



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe I
H1EM	1,31	< 1,80
V1EM	2,27	< 4,50
H2EM	1,97	< 4,50
V2EM	3,37	< 4,50
A2EM	4,10	< 4,50
V3C	2,45	< 4,50
V4C	0,94	< 1,80
V5P	0,33	< 0,71
A5P	0,64	< 0,71

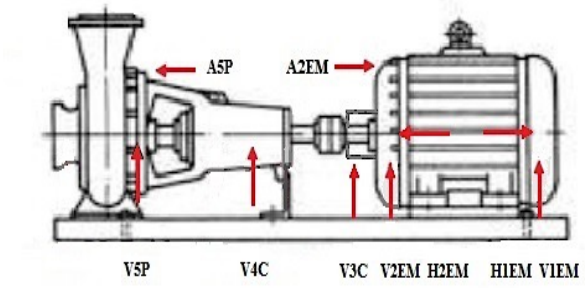


Tabela 22 - Bomba de circulação de óleo térmico (Janeiro 2018)

Principalmente no motor elétrico os valores obtidos são considerados insatisfatórios para este tipo de máquina. Na bomba centrifuga os valores vibracionais são considerados normais.

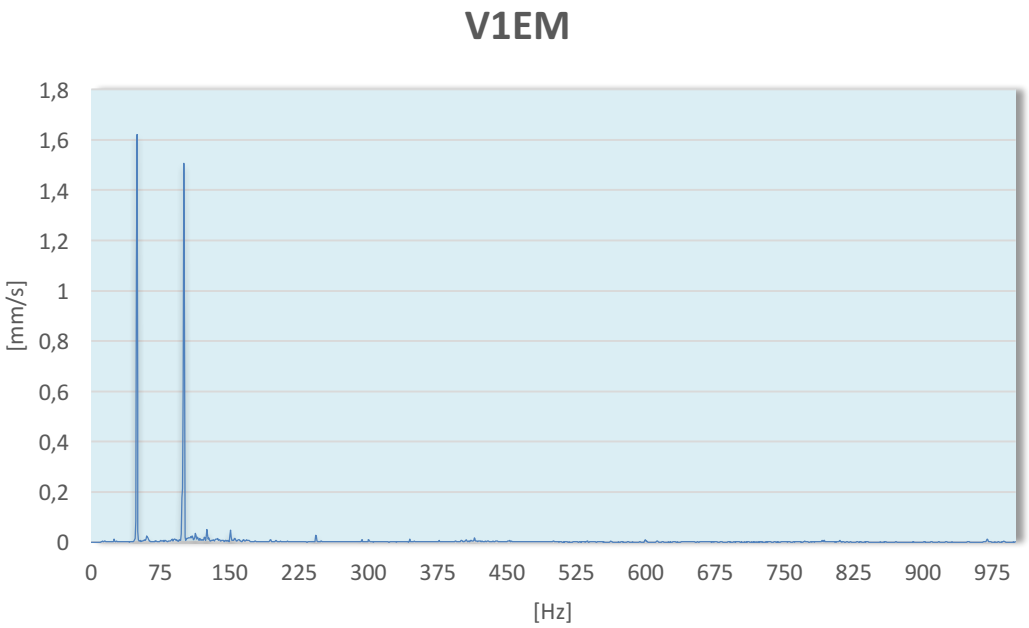


Gráfico 23 – Espetro de sinal referente à bomba de óleo térmico em V1EM (Janeiro 2018)

No espetro de sinal referente ao motor elétrico, em V1EM, é percetível a primeira e segunda harmónica do conjunto com elevada intensidade.

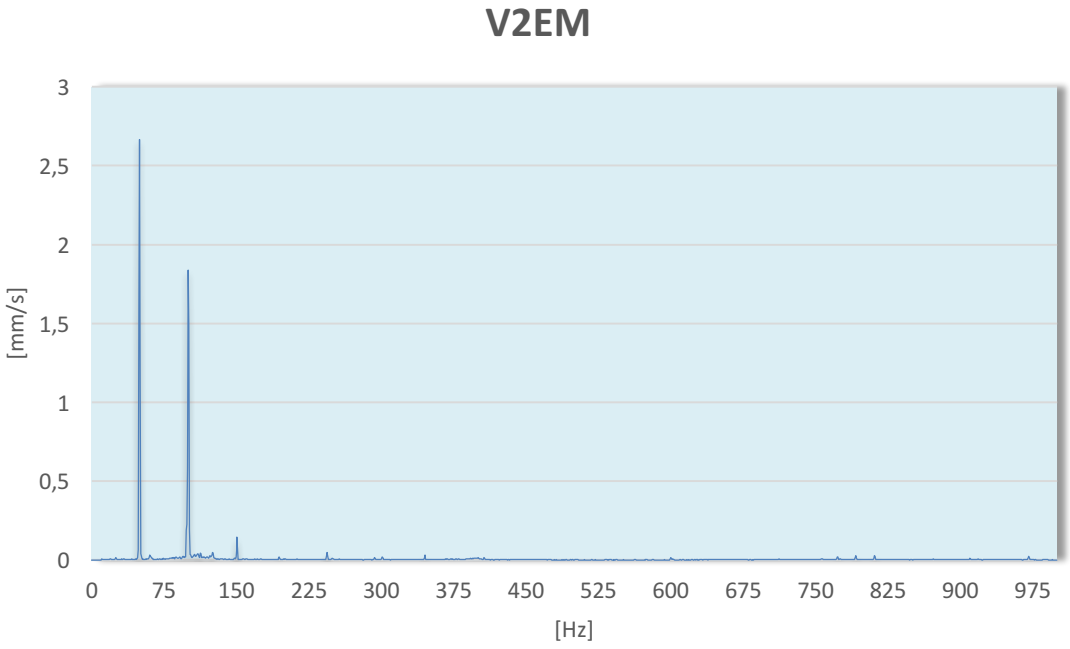


Gráfico 24 – Espetro de sinal referente à bomba óleo térmico em V2EM (Janeiro 2018)

No ponto de medição V2EM, gráfico 34, verifica-se a existência das três harmónicas do conjunto embora a terceira harmónica com menor intensidade.

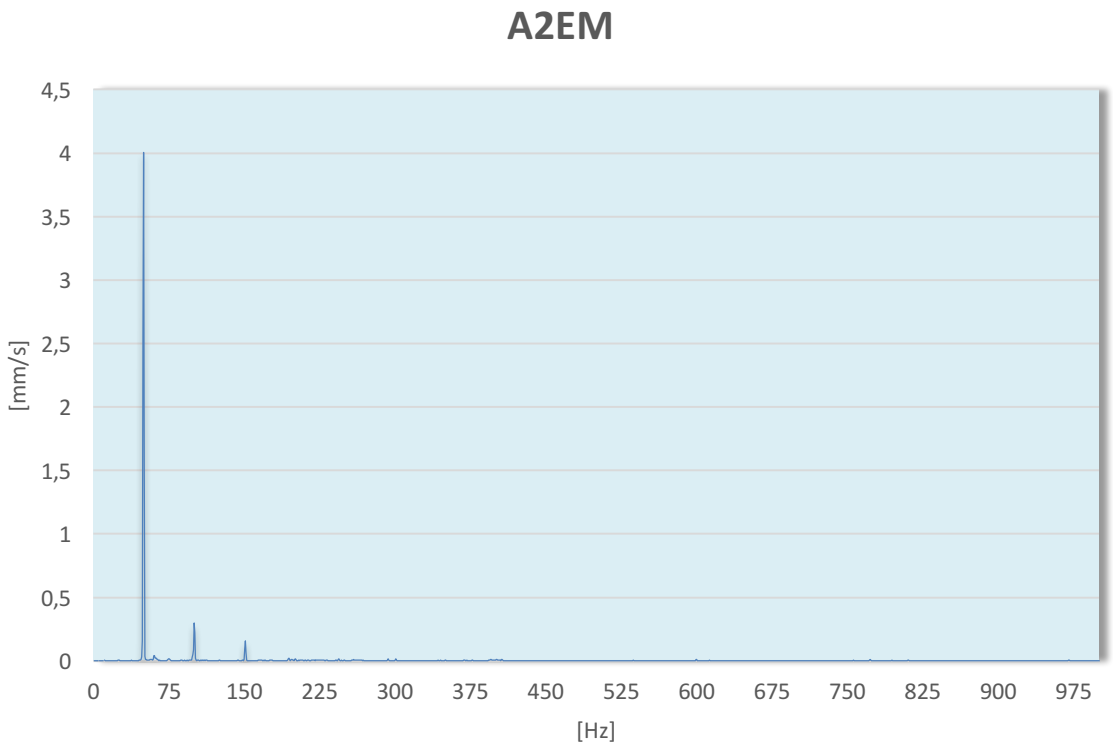


Gráfico 25 – Espetro de sinal referente à bomba de óleo térmico em A2EM (Janeiro 2018)

Na direção axial a frenquência de rotação apresenta uma amplitude elevada. Apesar da presença da segunda e terceira harmónica do conjunto, estas são de baixa intensidade comparativamente com direção vertical.

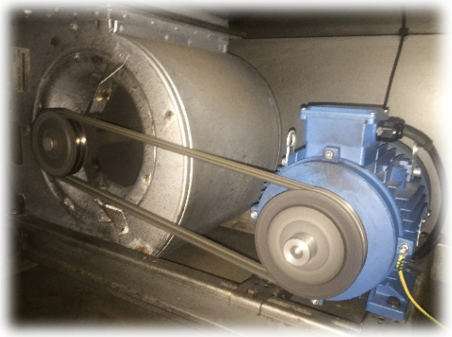
4.1.7. Ar condicionado

Na tabela seguinte apresenta-se os dados relativos ao motor elétrico e ventilador de ar condicionado. Nesta, também estão presentes os valores globais, em mm/s, para cada ponto de medição.

Como referido anteriormente, apenas foram coletados dados do motor elétrico e da respetiva base de assentamento do conjunto.

Ventilador ar condicionado dos alojamentos

Motor eléctrico	
Tipo	MOT HE31 132 SB-2
Potência (kW)	7,5
Tensão/frequência (V/Hz)	3X400 / 50
Rotação (rpm)	2920
Nº Par Polos	2
Nº Pás Ventilador	10
Rolamento Polia	6308-2Z/C3
Rolamento N-end	6208-2Z/C3
Ventilador centrifugo	
Tipo	EUMM-22 EULB-22 (Unit size)-3 (Fan size) GJLB-5-034-1-1-1-1 GTLZ-60-5-034-3-0
Capacidade (m^3/h)	2,15
Consumo (kW)	5,7
Rotação (rpm)	3213



Análise de vibrações

Pontos de medição	Nível global mm/s	ISO 2372 Classe I
H1EM	5,60	> 4,5
V1EM	5,38	> 4,5
H2EM	2,43	< 4,5
V2EM	3,97	< 4,5
V3B	10,70	> 4,5
V4B	3,54	< 4,5

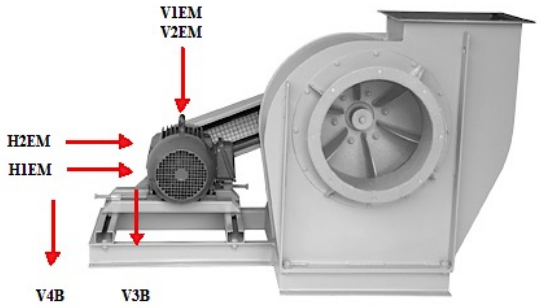


Tabela 23 - Ventilador Ar Condicionado dos Alojamentos (Janeiro 2018)

Os valores obtidos são considerados insatisfatórios. Como dito no estudo realizado em Maio de 2018 houve dificuldades na coleta de dados, pois este conjunto é composto por um material não ferroso.

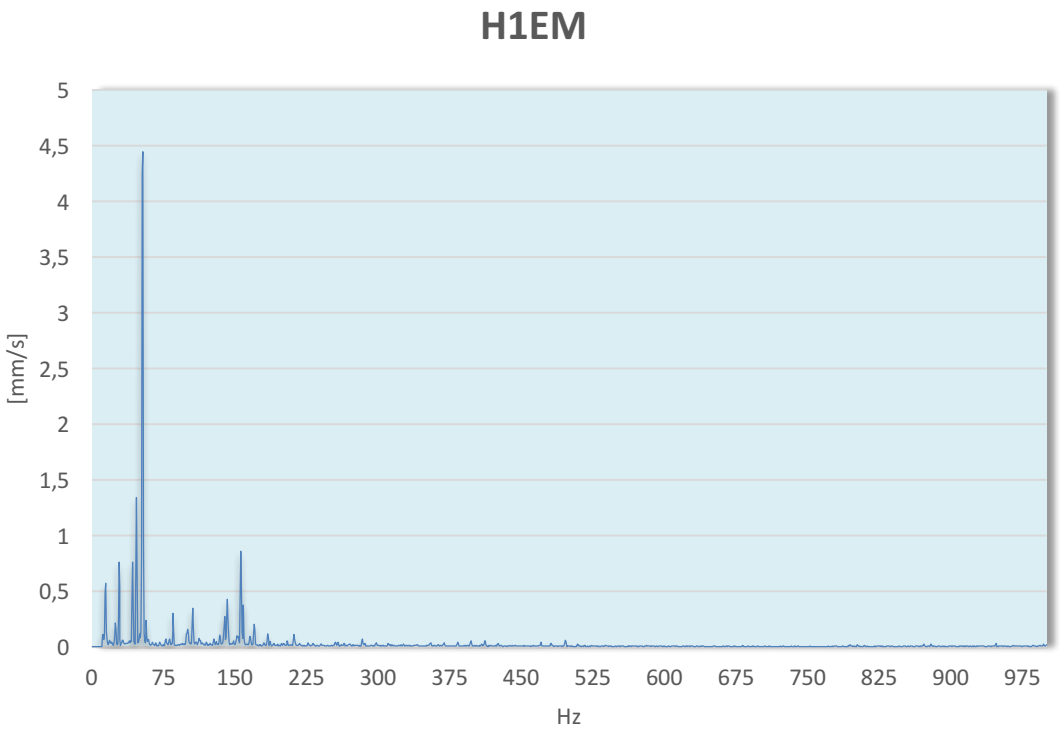


Gráfico 26 – Espetro de sinal referente ao ventilador ar condicionado em H1EM (Janeiro 2018)

No espetro de sinal do gráfico 36, estão presentes algumas frequências aleatórias antes e depois da frenquência característica do conjunto, situada a 53 Hz.

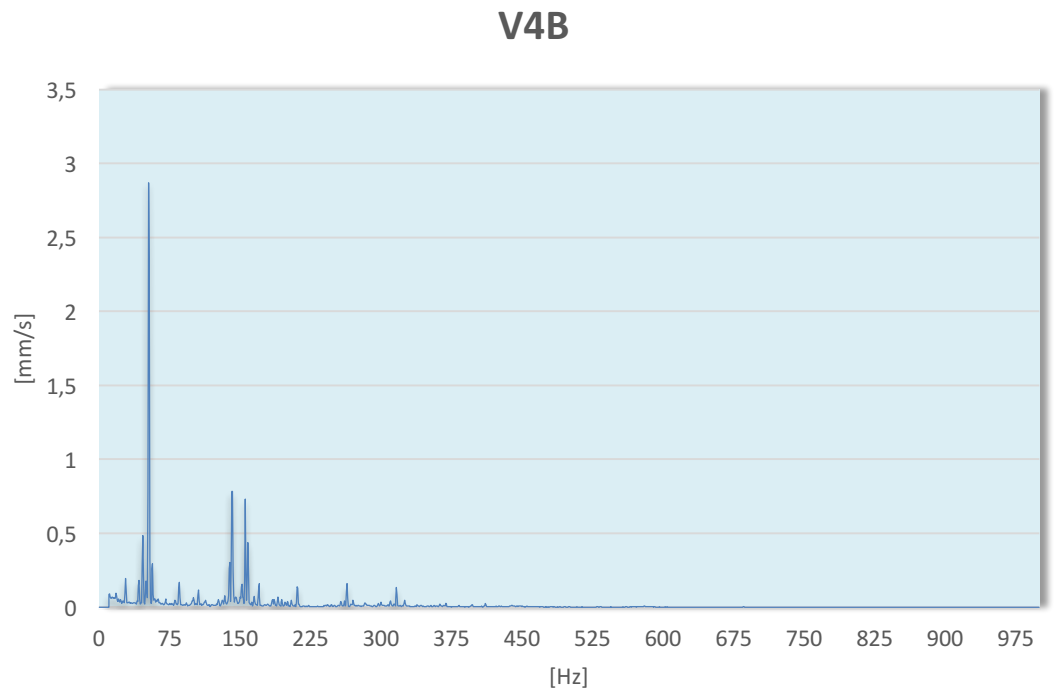


Gráfico 27 – Espetro de sinal referente à base do ventilador de ar condicionado (Janeiro 2018)

Na base de assentamento existem algumas frequências aleatórias. Novamente, aos 53 Hz observa-se a amplitude máxima do espetro.

4.2. Termografia

Na segunda visita à instalação do N/M Corvo prosseguiu-se com o trabalho termográfico, retirando algumas imagens que se apresentam de seguida.

Com a bomba de incêncio Nº2 em funcionamento, tirou-se uma imagem termográfica ao quadro elétrico respetivo a esta bomba.

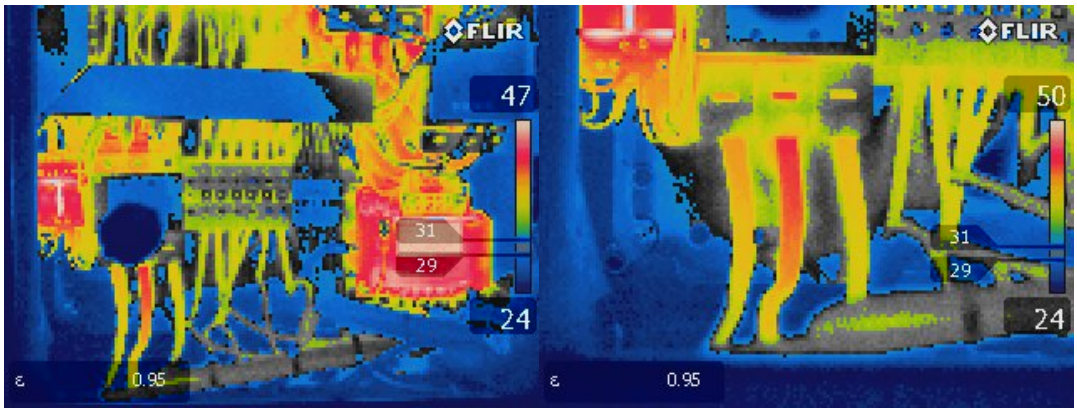


Figura 46 - Desfasamento da bomba de incêndio Nº2

Como observável na figura 36, detetou-se uma anomalia nas três fases do motor elétrico. A segunda linha de alimentação ao motor elétrico tem uma temperatura substancialmente superior às restantes.

A figura 37 corresponde ao macho esférico de descarga do coletor de evacuação da caldeira auxiliar, caso haja alguma anomalia no seu interior.

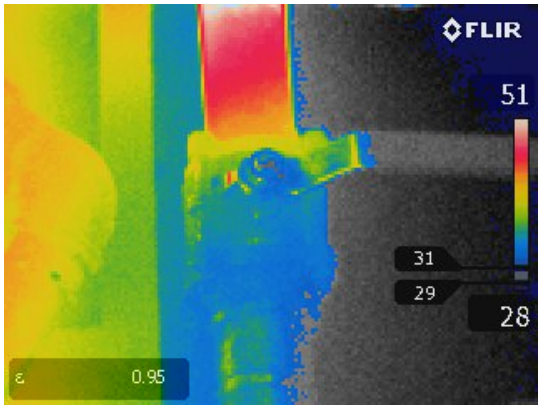


Figura 47 - Macho esférico para descarga de óleo do coletor de evacuação da caldeira auxiliar

Na imagem termográfica verificou-se o bom funcionamento da válvula, não dando qualquer passagem de fluído na posição de fechado.

Por último, na figura 38 apresenta-se o tubo flexível do sistema de selo da depuradora.

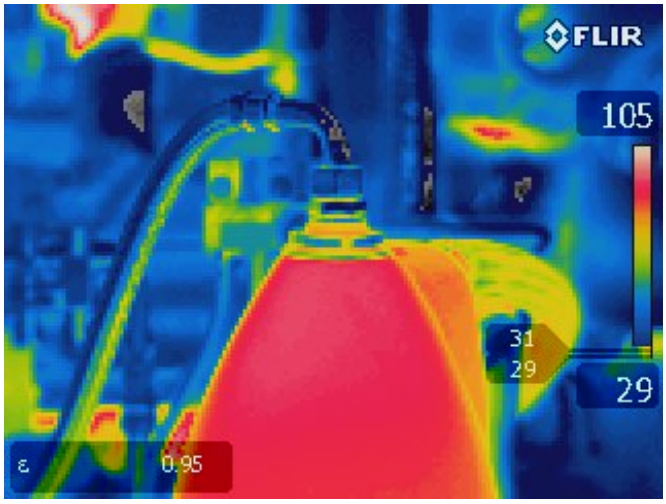


Figura 48 – Válvula de retenção para selo da depuradora

Este sistema é dotado de uma válvula de retenção na entrada da água para selo da depuradora, com o objetivo de o fluído depurado não entrar em contato com o tubo flexível.

Capítulo 5

Análise de resultados

5.1. Análise crítica dos resultados referente à análise de vibração

Este capítulo destina-se à análise crítica dos resultados obtidos nos dois estudos realizados a alguns equipamentos do N/M Corvo.

Como referido anteriormente, com base no estudo efetuado em Maio de 2017 equacionou-se a manutenção de alguns equipamentos em Junho de 2017, quando o navio realizou uma manutenção preventiva em doca seca. Para tal, foi necessário um estudo prévio e encomenda, juntamente com os Diretores Técnicos (DT) da empresa, dos consumíveis necessários à intervenção.

Posteriormente, em Janeiro de 2018 realizou-se a segunda análise aos mesmo equipamentos a fim de concluir sobre a evolução dos mesmos, caso não fosse intervencionado em docagem, ou ao resultado da intervenção efetuada.

De acordo com o registo de funcionamento presente no sistema de manutenção do navio Corvo e os resultados obtidos na primeira análise realizada, optou-se por intervencionar, em Junho de 2017, os seguintes conjuntos bomba/motor elétrico:

- ✓ Refrigeração de baixa temperatura Nº1;
- ✓ Lastro e esgoto;
- ✓ Bomba de água do mar EB
- ✓ Circulação de óleo térmico da caldeira.

Exeptuando a bomba de circulação de óleo térmico, que apenas se procedeu ao alinhamento e limpeza do conjunto, aos restantes conjuntos bomba/motor elétrico efetuaram-se as seguintes ações de manutenção:

- ✓ Limpeza e verificação do estator e rotor do motor elétrico;
- ✓ Mudança do impeler da bomba de lastro e esgoto, as restantes apenas limpeza e beneficiação;
- ✓ Substituição de todos os rolamentos dos conjuntos;
- ✓ Substituição dos bucins mecânicos de todas as bombas;
- ✓ Substituição dos apoios antivibracionais das bombas de refrigeração e lastro e esgoto;
- ✓ Montagem e alinhamento no local.

5.1.2. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1

Com uma periodicidade de 48 meses, no âmbito da manutenção preventiva sistemática, optou-se por intervencionar a bomba de refrigeração de baixa temperatura Nº1. Na análise efetuada a esta máquina não constou nenhuma irregularidade em funcionamento, os resultados obtidos foram considerados bons para o tipo máquina em causa.

Contudo, na tabela seguinte estão presentes os resultados obtidos antes e depois da intervenção realizada, a fim de serem comparados.

Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº1				
Maio 2017		**Janeiro 2018**		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	1,27	**H1EM**	0,90	↑ 29%
V1EM	0,68	**V1EM**	1,28	↓ 47%
H2EM	0,65	**H2EM**	0,49	↑ 25%
V2EM	0,59	**V2EM**	0,37	↑ 37%
A2EM	0,94	**A2EM**	0,99	↓ 5 %
A3P	0,76	**A3P**	0,74	↑ 3 %
H3P	1,60	**H3P**	0,96	↑ 40%
V3P	1,15	**V3P**	1,54	↓ 25%

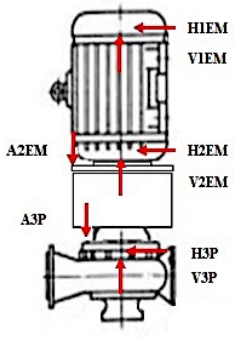




Tabela 24 - Valores obtidos para a bomba de refrigeração de baixa temperatura Nº1

Apesar dos valores obtidos no primeiro ensaio serem considerados bons para este tipo de máquina, houve um melhoramento com a intervenção efetuada. O valor de RMS baixou em praticamente todos os pontos analisados.

Os espetros de sinal respetivos a esta máquina, antes e depois da intervenção, são idênticos. Observa-se um valor de pico elevado na frequência de rotação a 24,4 Hz, este poderá

indicar um desiquilibrio do motor. Todas as restantes frequências não são alarmantes devido à sua baixa intensidade.

Na manutenção efetuada constatou-se que os rolamentos, apesar de apresentarem sinais de utilização, estavam em bom estado. Já os apoios antivibracionais apresentavam algum desgaste e rigidez, pelo que a mudança dos mesmos, foi vantajosa.

5.1.3. Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2

A bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2 não foi alvo de manutenção. Deparou-se que os valores obtidos em Maio de 2017 foram bons para o tipo de máquina em causa, pelo que não necessita de intervenção.

Na tabela abaixo são comparados os resultados obtidos nos dois estudos realizados.

Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de água de refrigeração de baixa temperatura Nº2				
Maio 2017		**Janeiro 2018**		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	0,98	**H1EM**	1,10	↓ 11%
V1EM	0,95	**V1EM**	1,50	↓ 37%
H2EM	0,48	**H2EM**	0,70	↓ 31%
V2EM	0,70	**V2EM**	0,62	↑ 11%
A2EM	1,15	**A2EM**	0,74	↑ 36%
A3P	1,00	**A3P**	0,61	↑ 39%
H3P	0,56	**H3P**	0,85	↓ 34%
V3P	0,81	**V3P**	0,72	↑ 11%

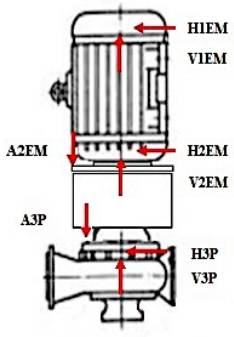




Tabela 25 - Valores obtidos para a bomba de refrigeração de baixa temperatura Nº2

A análise comparativa dos valores globais RMS, com os dados obtidos das medições efetuadas em em Maio de 2017, possibilita concluir que não ocorreu uma degradação substancial do equipamento.

Efetivamente, os valores de vibração no ponto V1EM são superiores. Comparando os espetros de sinal, gráfico 38, verificou-se que as frequências presentes são as mesmas, apenas com maior intensidade em Janeiro 2018.

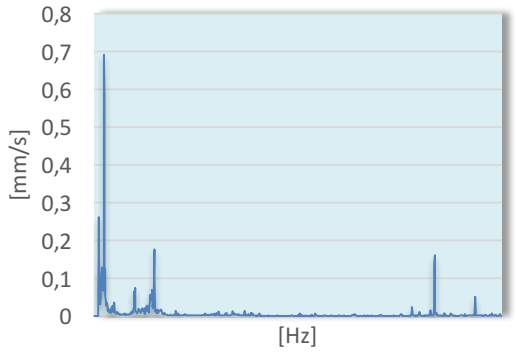
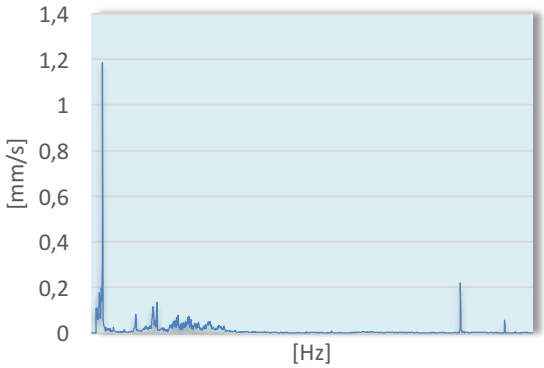
V1EM Maio 2017	V1EM Janeiro 2018
	

Gráfico 28 – Comparação do espetro de sinal referente à bomba de água de refrigeração Nº2 no ponto V1EM

Em Janeiro 2018 a frequência característica situa-se nos 24,4 Hz com um valor de pico de 0,69 mm/s, por outro lado, aos 148 Hz, 834 Hz e 935 Hz temos a harmónicas das frequências características das paás da bomba ou a existência de pequenos impactos que, apesar de não existirem bandas laterais, poderão corresponder à degradação da pista exterior (BFPO) de um dos rolamentos.

Caso estas frequências correspondam à degradação do rolamento, estamos, como demonstrado na Figura 17, no 2º estágio de degradação, existem pequenos defeitos que provocam impactos em frequências acima dos 500 Hz. Para melhor avaliação do estado dos rolamentos deveria-se tirar os espetros de alta frequência neste ponto, acima de 1KHz.

As frequências existentes anteriores à frequência de rotação podem ser desprezadas, pois o sensor de velocidade tem um comportamento não linear para baixas frequências.

De notar que o valor no ponto V1EM não é alarmante, apenas considerado satisfatório, pelo que é necessário o devido acompanhamento até à próxima intervenção programada.

5.1.4. Bomba de lastro e esgoto

A bomba de lastro e esgoto tem como principal função o lastro e deslastro do navio, tendo também, através de uma válvula comunicante com as cavernas da casa da máquina, o esgoto de emergência da casa da máquina. Esta é utilizada diversas vezes ao dia e por vezes não da melhor maneira, principalmente em situações de deslastro de tanques do navio.

Em Maio de 2017, deparou-se que o conjunto bomba/motor elétrico apresentava na maioria dos pontos níveis de vibração considerados satisfatórios, pelo que, com acordo do Super-intendente e Chefe de máquinas, decidiu-se fazer a respetiva manutenção completa ao conjunto.

Este conjunto em Maio 2017, numa inspeção visual e auditiva, já alertava para a presença de alguma anomalia, o que se veio a confirmar na análise de vibrações.

Por forma a comparar e concluir sobre os valores obtidos nos dois estudos efetuados, apresentam-se os resultados obtidos na tabela seguinte.

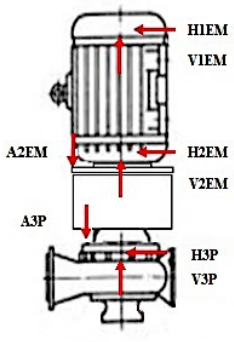
Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de lastro e esgoto				
Maio 2017		Janeiro 2018		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	1,72	**H1EM**	1,93	↓ 11%
V1EM	2,20	**V1EM**	2,45	↓ 10%
H2EM	1,25	**H2EM**	1,33	↓ 6 %
V2EM	1,39	**V2EM**	1,76	↓ 21%
A2EM	2,65	**A2EM**	2,72	↓ 3 %
A3P	1,88	**A3P**	2,45	↓ 23%
H3P	1,69	**H3P**	2,23	↓ 24%
V3P	3,26	**V3P**	2,18	↑ 33%
				

Tabela 26 - Valores obtidos para a bomba de lastro e esgoto

Com os valores obtidos em Maio de 2017 obteve-se os espetros de sinal nos pontos V1EM, A2EM e V3P, respetivos aos gráficos 14, 15 e 16.

No ponto de mediação V1EM constatou-se duas situações, primeiramente um desalinhamento ângular com a presença da primeira e segunda harmónica do conjunto e, por outro lado, devido a frequências aleatórias e altas frequências acompanhadas de bandas laterais verificou-se que existe pelo menos um rolamento com pequenos defeitos. Com isto, prevê-se que degradação do rolamento se encontra no estágio 2.

No ponto 2 axial é evidente a frequência de rotação do conjunto acompanhada com algumas frequências aleatórias de baixa intensidade. Existe um pico aos 19 Hz que poderá corresponder a um dos corpos rolantes de um rolamento, pois de acordo com os valores calculados na tabela 6, os 19 Hz correspondem à segunda harmónica da frequência da gaiola (FTF).

O ponto 3 vertical destaca-se com um nível de vibração bastante elevado e insatisfatório para este tipo de máquina. Segundo o espetro obtido observou-se, que para além da primeira e segunda harmónica do conjunto, existem várias frequências aleatórias com elevada intensidade. O resultado é alarmante e requer especial atenção, pois estamos perante um estado severo de degradação de um rolamento. O desalinhamento ângular verificado está na causa da falência deste rolamento.

Em docagem o conjunto foi alinhado, o bucim mecânico e todos os rolamentos foram substituídos. Verificou-se que o rotor da bomba apresentava algumas picagens associadas à cavitação.

Em Agosto de 2017, após um longo período de funcionamento com a bomba desferrada esta começou a vibrar até que os parafusos do acoplamento folgaram, ficando desacoplada e desgovernada. O rolamento e bucim mecânico da bomba foram substituídos e o acoplamento beneficiado. Com a liberdade na rotação que o motor elétrico demonstrava os rolamentos do motor elétrico não foram substituídos.

Devido ao sucedido no parágrafo anterior, não houve melhoramentos nos valores obtidos. Analisando o espetro de frequência do gráfico 28 verificou-se que o desalinhamento ângular permaneceu inalterado, existindo também pequenos impactos correspondente a defeitos nos rolamentos.

No ponto 3 vertical observou-se que a segunda harmónica do conjunto é superior à primeira pelo que estamos perante um desalinhamento offset. Devido à proximidade da bomba, neste ponto aparecem algumas frequências aleatórias de baixa intensidade.

Posterior à análise realizada em Janeiro 2018, procedeu-se ao reaperto e fixação do acoplamento que apresentava alguma folga dos parafusos.

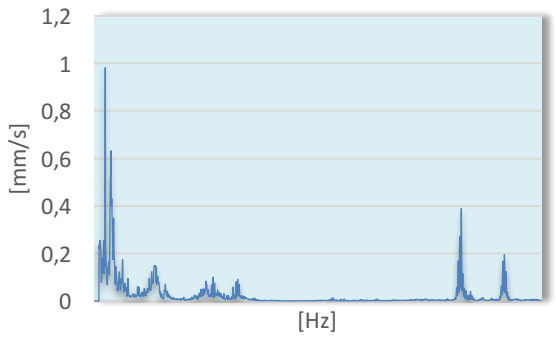
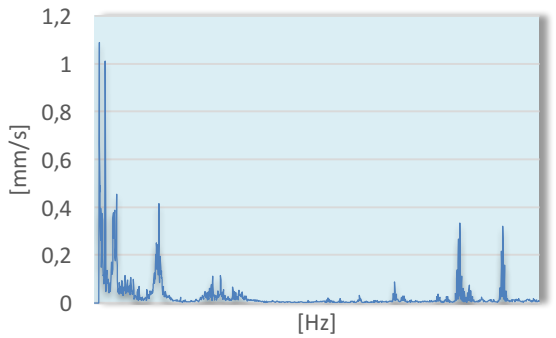
V1EM Maio 2017	V1EM Janeiro 2018
	

Gráfico 29 – Comparação do ponto de medição V1EM na bomba de lastro e esgoto

5.1.5. Bomba de água do mar EB

Tal como na bomba de refrigeração nº1, de acordo com o programa de manutenção do navio foi realizada a manutenção completa à bomba de água do mar EB. No estudo efetuado em Maio de 2017 todos os pontos analisados apresentaram resultados normais para o tipo de máquina em causa.

Na tabela seguinte são apresentados os valores obtidos nos estudos realizados em Maio 2017 e Janeiro 2018.

Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de água do mar EB				
Maio 2017		**Janeiro 2018**		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	1,03	**H1EM**	1,08	↓ 5 %
V1EM	0,92	**V1EM**	0,92	=
H2EM	0,73	**H2EM**	0,50	↑ 32%
V2EM	0,78	**V2EM**	0,85	↓ 8 %
A2EM	0,46	**A2EM**	0,46	=
A3P	0,52	**A3P**	1,55	↓ 66%
H3P	0,47	**H3P**	1,00	↓ 53%
V3P	0,78	**V3P**	0,83	↓ 6 %

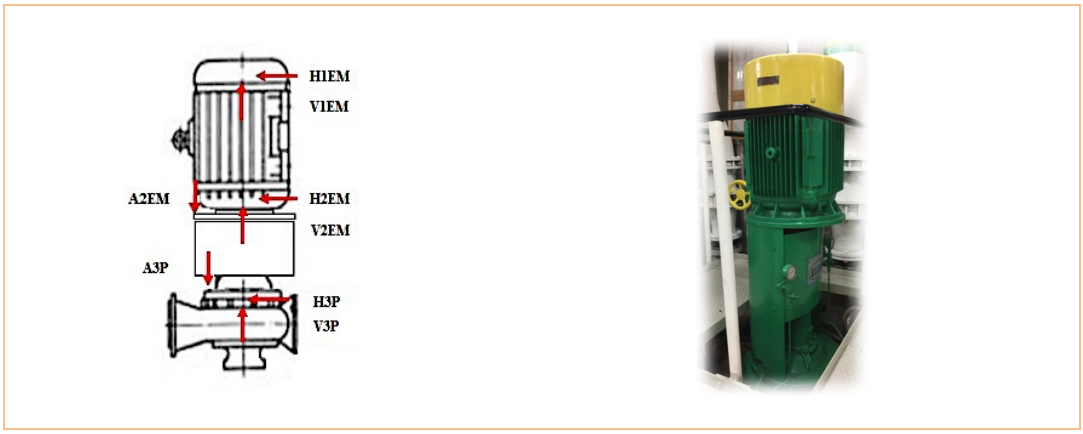


Tabela 27 - Valores obtidos para a bomba de água do mar EB

Os valores obtidos no segundo estudo não foram os esperados. De uma forma geral, os níveis de vibração foram superiores depois da intervenção.

Comparando os espetros obtidos para o ponto H1EM, gráficos 40, verificamos que as frequências de maior intensidade são as mesmas. Uma primeira frequência a 24,4 Hz correspondente à rotação do conjunto e duas altas frequências nos 835 Hz e 936 Hz. As frequências 835Hz e 936Hz apresentam valores de amplitudes muito semelhantes ao verificado para a velocidade de rotação do conjunto. Eventualmente poderão corresponde ao número de pás da bomba centrifuga mas, considerando as características técnicas existentes do conjunto, não é possível identificar a origem destas frequências pelo que será feito um acompanhamento mais próximo do funcionamento deste equipamento.

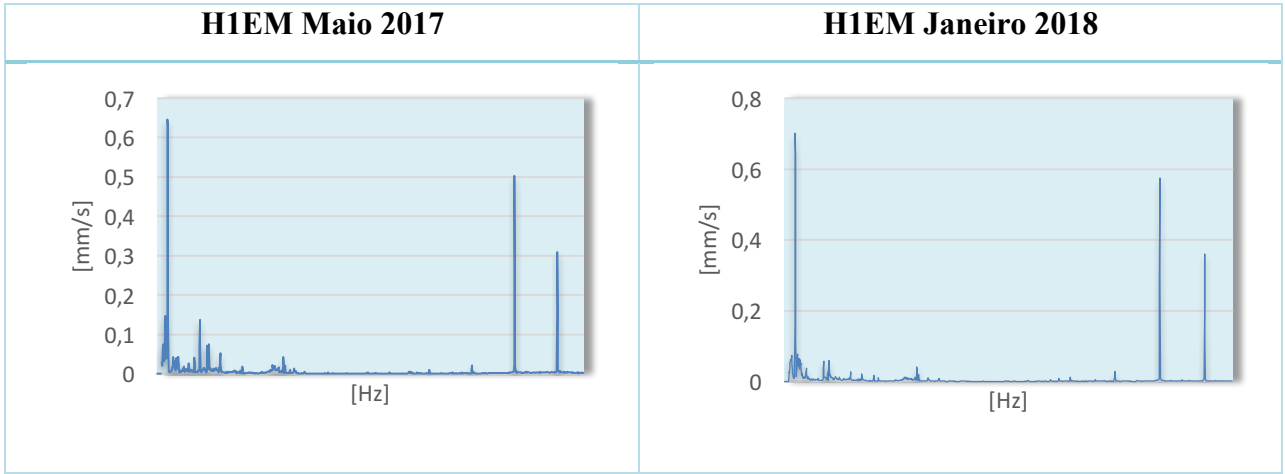


Gráfico 30 – Comparação do espetro de sinal referente à bomba de água do mar EB no ponto H1EM

Contudo, os níveis de vibração são considerados bons para este tipo de máquina.

5.1.6 Bomba de água do mar BB

A bomba de água do mar de bombordo não foi sujeita a manutenção completa porque não foram registadas irregularidades numa primeira análise e conforme o programa de manutenção faltam cerca de 14 meses para esta ser intervencionada. Apenas houve um acompanhamento continuo da mesma, registando a evolução nos dois estudos efetuados.

Os resultados nas duas análises estão registados na tabela seguinte.

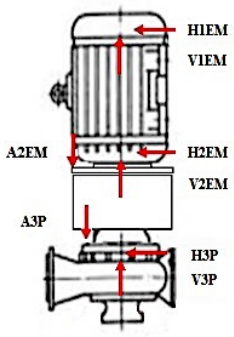
Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de água do mar BB				
Maio 2017		Janeiro 2018		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	0,89	**H1EM**	1,20	↓ 26%
V1EM	1,07	**V1EM**	0,65	↑ 38%
H2EM	0,63	**H2EM**	0,54	↑ 14%
V2EM	0,82	**V2EM**	0,59	↑ 28%
A2EM	0,53	**A2EM**	0,67	↓ 21%
A3P	0,74	**A3P**	0,96	↓ 23%
H3P	0,46	**H3P**	1,55	↓ 70%
V3P	0,52	**V3P**	1,20	↓ 57%
				

Tabela 28 - Valores obtidos para a bomba de água do mar BB

Registou-se um aumento dos níveis vibracionais desta máquina nos oito meses de funcionamento.

Como dito anteriormente, todos os dados observados no primeiro estudo são considerados bons para este tipo de máqina. No espetro de sinal referente ao ponto V1EM, gráfico 19, verifica-se a presença da primeira harmónica com 0,8 mm/s de amplitude e a segunda

harmónica do conjunto com menor intensidade, 0,1 mm/s, o aspecto do espetro de sinal indica um desalinhamento ângular pouco acentuado. Não havendo informação sobre o número de pás da bomba centrifuga, as frequências de 839 Hz e 939 Hz podem corresponder às harmónicas das pás da bomba centrifuga ou a algum defeito dos rolamentos. Para deteção dos defeitos nos rolamentos é aconselhável um espetro de alta frequência. Como acção preventiva procedeu-se à verificação e aperto do acoplamento da bomba.

Em Janeiro de 2018 os valores vibracionais nos pontos de medição referentes à bomba são mais elevados. Pelo espetro de sinal dos gráficos 32 e 33, constatou-se a presença da primeira e segunda harmónica do conjunto. Tendo em atenção, o desgaste e rigidez dos apoios antivibracionais, poderemos melhorar e eliminar algumas frenquências aleatórias com a substituição dos mesmos.

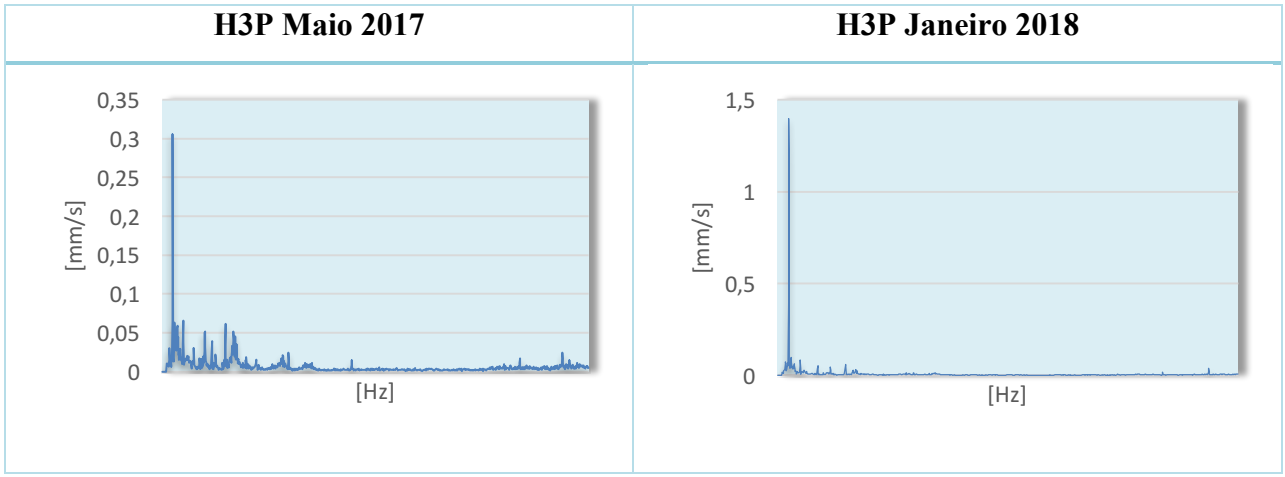


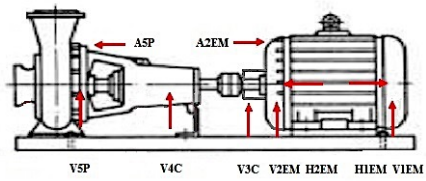
Gráfico 31 - Comparação do nível de vibração no ponto H3P para a bomba de água do mar BB

5.1.7. Bomba de circulação de óleo térmico

Com os problemas que podem advir com a paragem deste grupo de bombas, torna-se muito importante o bom funcionamento das mesmas. Assim após o estudo efetuado em Maio de 2017, considerou-se crítica a intervenção à mesma.

Na tabela seguinte efetua-se uma comparação dos resultados obtidos nos dois estudos, assim como a evolução apresentada.

Comparação dos resultados obtidos				
Bomba de circulação de óleo térmico				
Maio 2017		**Janeiro 2018**		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	4,49	**H1EM**	1,31	↑ 71%
V1EM	3,07	**V1EM**	2,27	↑ 26%
H2EM	3,77	**H2EM**	1,97	↑ 48%
V2EM	4,86	**V2EM**	3,37	↑ 31%
A2EM	6,78	**A2EM**	4,10	↑ 40%
V3C	13,47	**V3C**	2,45	↑ 82%
V4C	0,71	**V4C**	0,94	↓ 24%
V5P	0,39	**V5P**	0,33	↑ 15%
A5P	0,81	**A5P**	0,64	↑ 21%



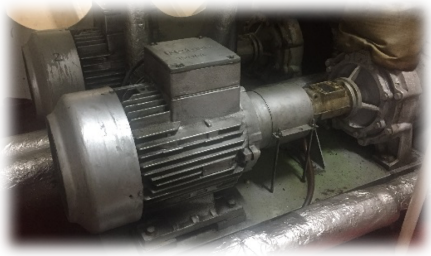


Tabela 29 - Valores obtidos referentes à bomba de circulação de óleo térmico

Através da análise dos dados recolhidos, constatamos que houve uma redução significativa no nível de vibração do conjunto.

Em Maio de 2017 a grande maioria dos valores foram consiederados insatisfatórios para o tipo de máqina em causa.

É visível nos espetros de sinal, referentes aos pontos H1EM, V2EM e V3C, um desiquilibrio e um desalinhamento ângular acentuado. Ambos os pontos de medição, H1EM e V2EM, apresentam um espetro idêntico, com a primeira harmónica do conjunto superior à segunda harmónica. Já em V3C, é possível observar um desalinhamento ângular severo com o aparecimento da terceira harmónica da frequência de rotação do conjunto, gráfico 22.

O nível de vibração extremamente elevado em V3C deve-se, de alguma forma, à falta de rigidez do ponto de medição. No estudo efectuado em Janeiro o ponto de medição V3C foi deslocado para próximo do motor elétrico.

Na segunda análise concluiu-se que houve uma evolução significativa. Os níveis de vibração diminuíram substancialmente.

Como já referido, na manutenção realizada procedeu-se apenas ao alinhamento e limpeza do conjunto. Os níveis de vibração melhoraram apesar de alguns dos valores ainda estarem elevados.

Nos gráficos 34 e 35 não só é precetivel a permanência do desalinhamento ângular, como o aparecimento de um desalinhamento 'off set' devido à elevada amplitude da segunda harmónica do conjunto.

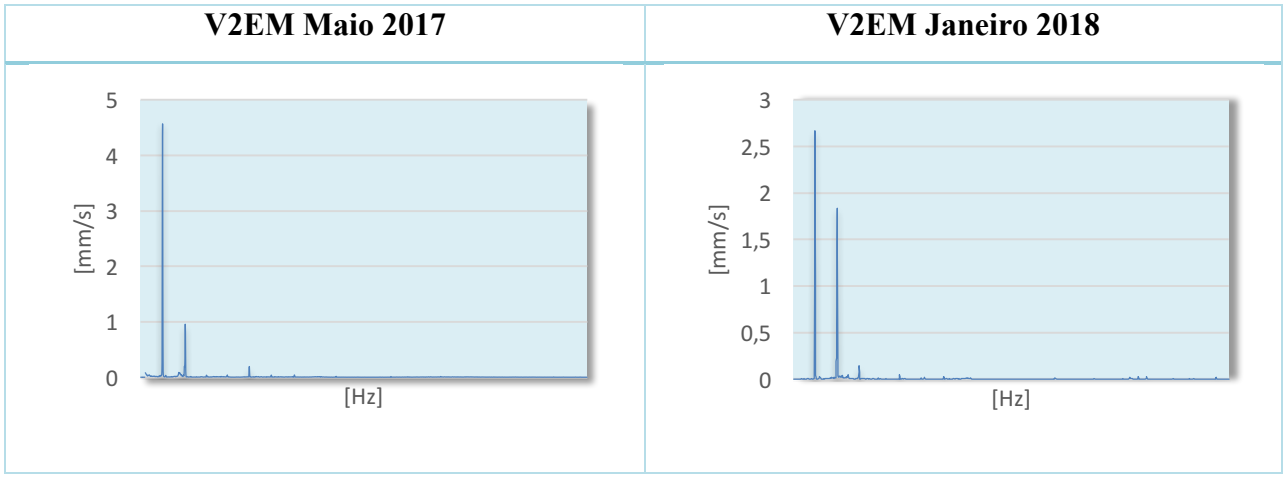


Gráfico 32 - Comparação do nível de vibração no ponto V2EM para a bomba de circulação de óleo térmico

Devido à ausência de mecanismos para alinhamento deste grupo de bombas, torna-se muito difícil a sua realização. Optou-se por retirar todos os afinos existentes e colocá-la assente na base de apoio, como de origem.

Posteriormente à segunda análise, procedeu-se à substituição do acoplamento. Esta acção certamente melhorou os níveis de vibração, pois o acoplamento apresentava algum desgaste e rigídez.

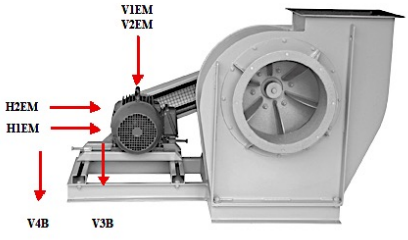
5.1.8. Ar Condicionado

O ventilador de ar condicionado é constituído por um motor elétrico que através de duas correias transmite movimento ao ventilador. Este grupo é essencial ao bem-estar da tripulação, funcionando 24h/7dias por semana.

Com o ambiente hostil a que este grupo está sujeito, surge a necessidade de um investimento maior com a carcaça dos motores elétricos em alumínio [35], dificultando a fixação do sensor de velocidade à carcaça do motor elétrico e base de apoio.

Os valores obtidos nos dois estudos são apresentados na tabela seguinte.

Comparação dos resultados obtidos				
Ventilador do ar condicionado				
Maio 2017		Janeiro 2018		
Pontos de medição	**Nível global (mm/s)**	**Pontos de medição**	**Nível global (mm/s)**	**Evolução (%)**
H1EM	12,58	**H1EM**	5,60	↑ 55%
V1EM	8,53	**V1EM**	5,38	↑ 37%
H2EM	6,49	**H2EM**	2,43	↑ 63%
V2EM	11,78	**V2EM**	3,97	↑ 66%
V3B	19,96	**V3B**	10,70	↑ 46%
V4B	5,16	**V4B**	3,54	↑ 31%



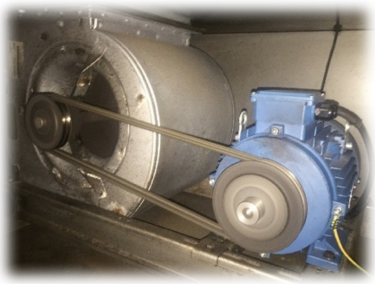


Tabela 30 - Valores coletados para o ventilador de ar condicionado

No primeiro estudo realizado os níveis de vibração registados foram bastante elevados. De acordo com os espetros de sinal, verifica-se que as frequências são baixas e a frequência de rotação do conjunto tem amplitude elevada, indicando um desiquilibrio.

Posterior ao estudo, conclui-se que as correias estavam demasiado tensionadas e o conjunto desalinhado. Procedeu-se ao alinhamento e diminuição da tensão das correias.

Com as ações tomadas verifica-se uma notória diminuição do nível de vibração em todos os pontos de medição. Na comparação efetuada no gráfico 43, para além da frequência de rotação do conjunto ser notável com elevada intensidade, existem algumas baixas frequências aleatórias. Verifica-se também que o valor de pico da frequência característica do conjunto diminuio significativamente.

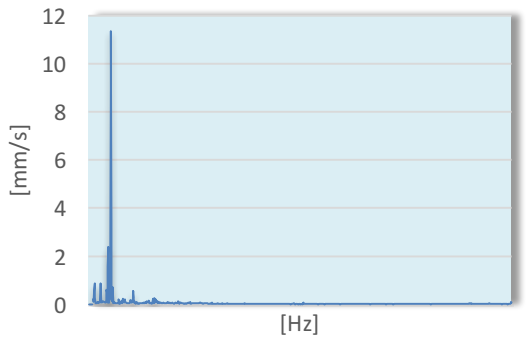
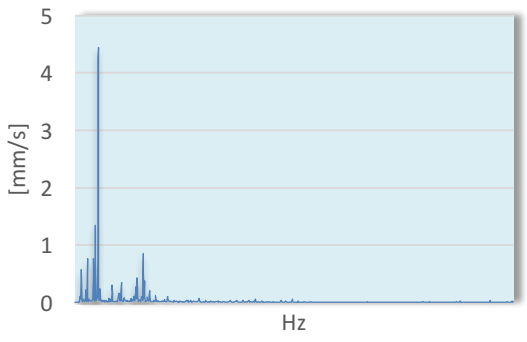
H1EM Maio 2017	H1EM Janeiro 2018
	

Gráfico 33 - Comparação do nível de vibração no ponto H1EM para o ventilador AC

Não foi exequível a identificação de algumas das frequências apresentadas nos espetros pois não foi possível obter algumas das características do conjunto nomeadamente das correias de transmissão.

Nos espetros de sinal alusivos à estrutura e base de assentamento verifica-se, que no ambiente envolvente a este grupo existem vibrações aleatórias.

Devido ao material constituinte do motor elétrico, o sensor adequado à medição deste conjunto seria uma ponteira.

5.1.9. Análise critica dos resultados referente à termografia

A termografia por infravermelhos é a técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objecto, invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda (IV), em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Esta é uma técnica não destrutiva com diversas aplicações mecânicas ou elétricas, que necessita que o objecto ou superfície a analisar apresente uma temperatura diferente do meio em que se encontra inserido de modo a realçar a sua localização. A imagem térmica apenas mostra o padrão de temperatura superficial, ou seja, a radiação emitida e a reflectida pela superfície.

O primeiro estudo termográfico teve como objetivo a deteção de anomalias em motores elétricos, verificação da vedação do bucim mecânico e equilíbrio de cargas de um motor elétrico.

Nesse estudo não foram encontradas anomalias. Os motores elétricos apresentaram um padrão térmico normal ao funcionamento, com a temperatura mais elevada na zona do estator e sem sobreaquecimentos em nenhum dos dois rolamentos constituintes do motor elétrico.

A imagem térmica referente à bomba de circulação de óleo térmico, figura 33, exibe uma distribuição de temperatura normal ao funcionamento, com uma temperatura máxima de 150 ºC na voluta da bomba devido à temperatura do fluído em circulação. A temperatura na proximidade do bucim mecânico deve-se principalmente à transmição do calor. Caso houvesse alguma anomalia na vedação mecânica a temperatura seria elevada aos 150ºC presentes na voluta. De notar que uma fuga no bucim mecânico pode significar a danificação do rolamento desta zona.

A imagem térmica relativa às fases da bomba de incêndio, figura 34, expõe uma temperatura uniformizada das três fases, indicando um equilíbrio de cargas do sistema. Por forma a validar este resultado mediu-se com uma pinça amperimétrica o consumo das fases, registando-se 37 amperes pelas três fases.

Na figura 35, composta com cabelagem diversa da instalação do navio, pretende-se identificar problemas na cablagem, tendo-se verificado a não existência de falhas.

Na segunda análise deu-se continuidade à avaliação de sistemas mecânicos e elétricos presentes na intalação do navio. Foram analisados machos esféricos, válvulas de retenção e equilíbrio de cargas de motores elétricos.

As bombas de incêndio existentes a bordo do navio fazem parte da segurança e integridade do navio e tripulantes.

No estudo efetuado detetou-se um desiquilibrio de carga na bomba de incêndio Nº2 pois, como se observa na figura 36, as três fases apresentam temperaturas diferentes passados 10 min

de funcionamento. Com a pinça amperimétrica verificou-se a corrente em cada uma das fases, Ln1= 56,8 A, Ln2= 60 A e Ln3= 62,8 A. Com a deteção desta anomalia providenciou-se, com os diretores técnicos, a substituição do motor elétrico.

Após substituição por um motor elétrico novo, verificou-se a uniformização das temperaturas dos cabos e as fases equilibradas, figura 39.

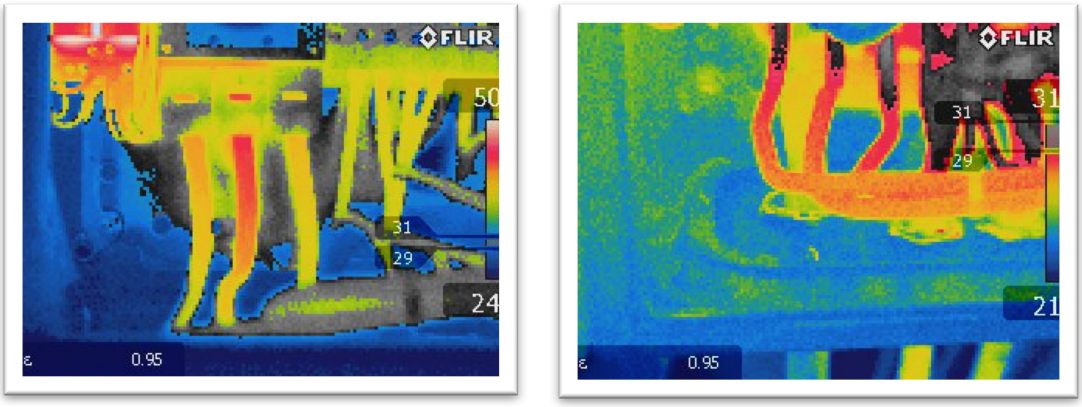


Figura 49 – Imagem comparativa das três fases do motor elétrico de incêndio

Na imagem termográfica 37, referente ao macho esférico de descarga do coletor de evacuação da caldeira auxiliar, verificou-se o bom funcionamento da mesma. Não existe qualquer passagem de fluído na posição de fechado. O bom funcionamento desta válvula é importante porque, caso contrário, daria a passagem de gases de evacuação da caldeira para a casa da máquina.

Como já referenciado, as depuradoras existentes a bordo são dotadas de uma válvula de retenção no sistema de enchimento de água para o selo do fluido. Com o mau funcionamento desta válvula de renteção o fluido depurado a 95ºC comunica com o tubo flexível, acabando por o romper. Com isto, alguns alarmes são acionados provocando a paragem da mesma. Na figura 38, conclui-se o bom funcionamento desta válvula.

Capítulo 6

Conclusões

6.1. Conclusões

No processo evolutivo da manutenção, passamos de uma manutenção preventiva sistemática, baseada essencialmente em intervalos fixos de tempo, para uma manutenção preventiva condicionada, onde o equipamento é mantido em operação consoante um limite preestabelecido com base no levantamento de parâmetros que podem ser acompanhados.

As novas técnicas de manutenção quando implementadas num sistema bastante consolidado, surgem algumas incertezas e questões sobre a capacidade das mesmas. Por sua vez, quando implementadas e com resultados observáveis, a visão sobre a capacidade, eficiência e veracidade destas técnicas modifica-se.

Apesar das inúmeras vantagens da prática de uma manutenção preventiva sistemática, por vezes, esta não é a rentável em termos de tempo e dinheiro. Com os vários estudos realizados, e apesar da capacidade necessária para avaliação e interpretação da informação medida pelos sensores, a prática de uma manutenção baseada na condição apresenta as seguintes vantagens:

- ✓ Aumento da longevidade dos equipamentos
- ✓ Controlo mais eficaz de peças de reserva
- ✓ Menor custo de reparação
- ✓ Aumento da disponibilidade
- ✓ Aumento de produtividade
- ✓ Redução dos custos de manutenção, quando comparada com a manutenção clássica

Essencialmente, a bordo do navio Corvo, aplica-se como principal manutenção a manutenção preventiva sistemática. Com vista a uma redução de custos de manutenção, aumento da disponibilidade dos equipamentos e redução de stock's a bordo, o objetivo deste trabalho passou por explorar e integrar duas técnicas importantes da manutenção preventiva condicionada, a análise de vibrações e a análise termográfica.

Após o trabalho realizado nesta dissertação, considera-se que todos os objetivos propostos foram atingidos de forma satisfatória. O estudo descreveu e detalhou as duas técnicas complementares da manutenção preventiva condicionada.

A análise de vibrações deixou claro que, quando bem aplicada e interpretada, é possível monitorizar a vida dos equipamentos, prevenindo algumas avarias que podem surgir. Esta técnica demonstra ser uma ferramenta muito importante no planeamento da intervenção aos equipamentos e na gestão de stock's existentes a bordo.

Com o trabalho termográfico realizado, conseguiu-se mostrar o potencial da termografia como ferramenta muito útil para ações de manutenção preventiva condicionada. Também foi possível dar a conhecer algumas das aplicações da termografia nos sistemas presentes numa instalação marítima.

O recurso às técnicas de manutenção preventiva condicionada é uma realidade cada vez mais próxima da marinha mercante. Com a automatização de algumas técnicas do controlo de condição dos equipamentos, a probabilidade de deteção de falhas precoces aumenta.

6.2. Trabalhos futuros

Como foi possível constatar ao longo da dissertação, a diversidade das aplicações das duas técnicas da manutenção preventiva condicionada, mostra potencial de investigação para trabalhos futuros.

Para um acompanhamento eficaz do equipamento ao longo do tempo, é necessário definir e assinalar localmente os pontos de mediação nos diversos equipamentos. Só assim poderá haver uma comparação e interpretação credível dos resultados obtidos.

Com as potencialidades do MATLAB, criar um programa para análise contínua de vibrações, em que através de um sensor de velocidade fixo no equipamento, e que em comunicação com um programa, fosse enviada uma mensagem para o utilizador quando fossem excedidos os valores pré-estabelecidos de fábrica.

Novamente, com auxílio de uma linguagem de programação, fazer-se uma monitorização contínua do padrão de cores, de um equipamento ou sistema, por forma a detetar avarias, utilizando uma câmara termográfica em comunicação com um programa, que enviaria mensagem ao utilizador quando determinada cor fosse atingida.

6.3. Referências bibliográficas

[1] Análise de Vibrações I – Medidas e Diagnósticos. FUPAI, 2002.

[2] Barreira, E. S. B. M. (2004) - Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Porto: FEUP. 196 f. Tese de Mestrado.

[3] Barreira, E. S. B. M.; FREITAS, V. M. A. P. D. (2007) - Evaluation of building materials using infrared thermography: Construction and Building Materials. ISBN ISSN 0950-0618.

[4] Baroni, Tarcísio (2002) et al. *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*, Editora Qualitytmark. Rio de Janeiro.

[5] Bonaldi, E. L. (2002) Manutenção Condicionada em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia Itajubá.

[6] Cabral, J. P. (2004). *Organização e Gestão da Manutenção - Dos conceitos à prática.* Lisboa: Edições técnicas, Lda.

[7] Controlo de Condição – Análise de Vibrações. ENIDH, 2013.

[8] Controlo de Condição – Termografia. ENIDH, 2013.

[9] Cortizo, Eduardo Cabaleiro, (2007) "Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico", Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

[10] EPRI, "Infrared Thermography Field Application Guide", Palo Alto, CA: 1999, Report TR-107142.

[11] Ferreira, L. A. (1998). *Uma Introdução à Manutenção.* Edições Técnicas.

[12] FLIR, "ThermaCAM Researcher Professional (Version 2.10)", September 2010.

[13] FLUKE, *"Thermography Education Series"*, Fluke Corporation, USA, 2005.

[14] Ibarra-Castaned, C. (2007) [et al.] - Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials. In: CHEN, C. H. - Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization. World Scientific Publishing.

[15] Incropera, F. P. [et al.] - Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-471-45728-2.

[16] ITEAG, "Termografia: Teoria, Procedimentos e Vantagens", Portugal, março 2010.

[17] JORNAL DA ECONOMIA DO MAR (2016) – Política e Estratégia: 'Governo prepara introdução do *Tonnage Tax*'.

[18] Meola, C. - A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography. Materials Letters. ISSN 0167-577X. Vol. 61, n.o 3 (2007b), p. 747-750.

[19] Modest, M. F. (1993) Radiotive Heat Transfer. 2a ed. Elsevier Science (USA).

[20] Moubray, J. (1997). Reliability-centered Maintenance. Oxford, UK, Butterworth-Heinemann.

[21] Natural Resources Canada, "Fundamentals of Remote Sensing", Canada 2007.

[22] NEC/AVIO - Nec Avio Infrared Technologies Co.,Ltd [em linha]. Disponível em: http://www.necavio.co.jp/en/index.html.

[23] Nemésio Sousa, Jorge (2009). Técnicas Preditivas de Manutenção Elétrica - 22o Engeman. *Apostila da disciplina de Manutenção de Equipamentos e Instalações Elétricas - Capítulo 2 - 22o Engeman*. Rio de Janeiro: UFRJ.

[24] Oliveira, T. M. D (2012) – Análise de sistemas de energia e máquinas elétricas com recurso a termografia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, FEUP.

[25] Oliveira, Thiago Mikail de. (2007) *Manutenção Preditiva de Motores de Corrente Contínua com Ênfase em MSCA – Motor Current Signature Analysis*. Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá.

[26] Palestra *de Manutenção Condicionada*. São Paulo, 2006.

[27] Pinto, A. K; Xavier, J. N. (1999) Manutenção: Função estratégica. *Quality mark editora,* Rio de Janeiro.

[28] Pinto, V. M. (2004). *Gestão da Manutenção.* IAPMEI - Instituro de Apoio às Pequenas e Médias Empresas e ao Investimento.

[29] Pires, L. C. C. (2002) - Estudo experimental da convecção natural em superfícies verticais com recurso à termografia por infravermelhos. Covilhã: Universidade da Beira Interior. Tese de Mestrado.

[30] Souris, J. P. (1992). Manutenção Industrial- Custo ou Benefício? Lisboa, Lidel

[31] Spamer, F. R. (2009). *Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas.* Rio de Janeiro.

[32] SPECMAN, "Medição e Análise Termográfica Capítulo I, Conceitos Básicos de Termografia", Portugal 2010.

[33] Titman, D. J. (2001) - Applications of thermography in non-destructive testing of structures. Ndt & E International. ISSN 0963-8695. Vol. 34, p. 149-154.

[34] Vieira, Fabiano. (2006) *Método e Técnicas de Análise de Vibração*. Treinamento na Empresa: Grupo Moura.

[35] Viana, T. Y; Duarte, F. D; Nogueira, É. *Aluminium and cast iron in production of electric motors with fins: efficiency, cost, operating and environmental aspects.*