



Bruno Emanuel Folgado Bento Morais

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Análise de vibrações a grupos de eletrobombas de uma estação elevatória

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António Paulo Vale Urgueira, Faculdade de
Ciências e Tecnologia

Coorientador: Engenheiro Paulo Gonçalves, SMAS Almada



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2016

Análise de vibrações a grupos de eletrobombas de uma estação elevatória

Copyright © 2016 Bruno Emanuel Folgado Bento Morais, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*À minha avó,
Pelos valores e ensinamentos transmitidos
E com quem gostaria de partilhar esta minha etapa*

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor António Paulo Vale Urgueira, expresso o meu profundo agradecimento, não só pelo contributo científico, mas também moral, na realização desta dissertação, e pela disponibilidade para esclarecimento de dúvidas que foram surgindo.

Ao meu coorientador, Eng.º Paulo Gonçalves, trabalhador dos SMAS de Almada, agradeço de igual forma, pelo interesse demonstrado, e constante apoio e disponibilidade no decorrer do trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Almada (SMAS de Almada), por esta oportunidade de realizar a dissertação no âmbito da empresa, em consequência de um estágio curricular. Agradeço também a todos os seus trabalhadores, em particular da Estação Elevatória de Vale de Milhaços, com o qual interagi, pela disponibilidade que demonstraram, em esclarecer dúvidas pontuais, e por me terem facilitado o trabalho de medição.

Agradeço à Datanálise, empresa de engenharia de manutenção especializada na manutenção condicionada, em particular ao Eng.º António Roque, por me ter sido facultado alguns materiais e suportes para a realização da dissertação.

Quero deixar um forte agradecimento ao Sr. José Dominguez, da Datanálise, pelo apoio incansável, e tempo disponibilizado para me orientar, com toda a sua experiência no ramo da análise de vibrações.

À KSB, em especial ao Eng.º Nuno Aleixo, pelo apoio técnico prestado na identificação das bombas centrífugas, e pelas sugestões.

À Flowserve, em especial ao Eng.º Nuno Oliveira, pelo apoio técnico prestado, e pelos esforços demonstrados em tentar esclarecer alguns problemas relacionados com a identificação das bombas.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), pelo fornecimento do equipamento e das condições de apoio a esta dissertação.

Aos meus colegas e amigos, pelos momentos que contribuíram para manter a motivação necessária para a realização deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais e irmão, pelos valores transmitidos ao longo da minha vida, que permitiram que me tornasse na pessoa que sou hoje, e pelo constante apoio nos momentos mais difíceis.

Agradeço por fim, de um modo especial, à minha namorada, Soraia, por toda a compreensão e paciência, e pelo apoio e motivação que me transmitiu desde que iniciei o meu percurso académico, particularmente durante a fase da dissertação.

Resumo

Com a evolução das técnicas de manutenção a focarem cada vez mais a diminuição de custos e o aumento de rendimento dos equipamentos, torna-se imprescindível abordar as vibrações como uma ferramenta nesse sentido, uma vez que estão presentes em qualquer tipo de mecanismo com elementos rotativos, e são fonte de grande parte dos problemas ocorridos nas estruturas, atuando gradualmente e deteriorando os equipamentos.

O presente estudo faz uma abordagem à manutenção baseada na condição (CBM), tendo a análise de vibrações como uma das mais importantes metodologias de manutenção. O seu principal objetivo foi o de analisar as vibrações a um conjunto de eletrobombas, para compreender como uma ferramenta deste tipo pode contribuir em termos de manutenção. Fizeram-se medições, procurando identificar as principais fontes de vibrações transmitidas pelo sistema, tentando compreender o comportamento de uma eletrobomba individualmente, mas também a influência do funcionamento em simultâneo de outras eletrobombas adjacentes. Procurou-se quantificar a importância de vários elementos que foram acompanhados ao longo do estudo, tais como a influência das mangas de expansão no fator de isolamento de vibrações, mas também da injeção de massa lubrificante nos rolamentos do sistema, e perceber a verdadeira necessidade destas operações de manutenção. Numa abordagem mais avançada, relacionou-se as respostas em funcionamento do sistema com as respostas livres, comparando espectros de velocidade com funções de resposta em frequência (FRF), identificando as frequências naturais e as possíveis zonas de ressonância.

Com a análise de vibrações, e a comparação com as frequências naturais, foi possível descortinar localizações nas eletrobombas onde possam existir realmente avarias, ao nível dos elementos da bomba ou dos rolamentos.

PALAVRAS-CHAVE:

Manutenção baseada na condição (CBM)

Vibrações mecânicas

Análise de vibrações

Eletrobombas

Frequências naturais

Diagnóstico de avarias

Abstract

Since reducing costs and increasing equipment performance became higher matter of interests with the evolution of maintenance, it is essential to approach the vibrations as a useful tool to reach that objectives, once it is found in any type of mechanism with rotating elements, and are the source of most of problems found in structures, gradually deteriorating the equipment.

This study is an approach to Condition-Based Maintenance (CBM) and to vibration analysis at the same time as one of the most important methods of maintenance. Its main goal is to analyze the vibrations in a set of centrifugal pumps, in order to understand the useful contribution that this tool may give into the maintenance. Measurements were made, as an attempt to identify the main sources of vibrations transmitted into the system, trying to understand the behavior of not only an individual pump, but also the influence of the simultaneous operation of adjacent pumps. An attempt was made to quantify the importance of various elements monitored throughout this study, such as the influence of the expansion joints in the vibration isolation factor, but also the injection of new grease into the bearings housing, in order to get the idea of the real need of these maintenance operations. In an advanced approach, it was able to relate the operating response with the free response, by comparing the velocity spectra with the frequency response function (FRF), identifying the natural frequencies and possible areas of resonance.

With the vibration analysis and the comparison with natural frequencies, it is possible to uncover locations in the pump where could actually have malfunctions, either with the pump components or with bearings.

KEYWORDS:

Condition-based Maintenance (CBM)

Mechanical vibrations

Vibration analysis

Pumps

Natural frequencies

Fault diagnosis

Índice de matérias

Agradecimentos	V
Resumo.....	VII
Abstract	IX
Índice de matérias	XI
Índice de figuras	XV
Índice de tabelas	XIX
Simbologia e acrónimos	XXI
1. Introdução.....	1
1.1 – Contexto e motivação	1
1.2 – Objetivos.....	1
1.3 – Estrutura da dissertação.....	1
1.4 – Estado da arte.....	3
1.4.1 – Introdução à manutenção	3
1.4.2 – Evolução da manutenção	5
1.4.3 – Definição e principais filosofias de manutenção	10
1.4.4 – Análise de vibrações como ferramenta de manutenção condicionada	13
2. Vibrações em bombas centrífugas	15
2.1 – Conceito básico de vibração.....	15
2.2 – Análise espectral.....	15
2.2.1 – Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	15
2.2.2 – Tipos de janelas (<i>Windowing</i>)	17
2.2.3 – Largura de banda (<i>Bandwidth</i>).....	18
2.2.4 – <i>Aliasing</i>	18
2.2.5 – Média (<i>Averaging</i>)	19
2.2.6 – Sobreposição (<i>Overlap</i>)	20
2.2.7 – Grandezas de medição	21
2.2.8 – Amplitude de vibração	22
2.2.9 – Demodulação de sinais para deteção de defeitos em rolamentos	23
2.3 – Sensores de vibrações – Acelerómetro	24
2.4 – Análise modal experimental.....	25
2.4.1 – Introdução à análise modal	25
2.4.2 – Ensaio de impacto como método de deteção de frequências naturais.....	27
2.5 – Bomba centrífuga	28
2.6 – Defeitos típicos de bombas centrífugas detetados por análise de vibrações.....	31

2.6.1 – Vibração de passagem de pás do impulsor	31
2.6.2 – Desequilíbrio do impulsor	32
2.6.3 – Desalinhamento	33
2.6.4 – Empeno no veio	35
2.6.5 – Elementos mecânicos soltos	35
2.6.6 – Cavitação	37
2.6.7 – Rolamentos.....	38
3. Caso de estudo experimental.....	41
3.1 – Descrição e características das eletrobombas	41
3.2 – Equipamento coletor de dados	46
3.2.1 – O aparelho – Enpac 2500.....	46
3.2.2 – O programa de análise – EMONITOR Odyssey	47
3.2.3 – O Sensor – Acelerómetro	49
3.3 – Medições	50
3.3.1 – Sistema de eixos	50
3.3.2 – Pontos de medição – Grupo A.....	51
3.3.3 – Pontos de medição – Grupo B.....	53
3.3.4 – Etapas de medições.....	55
3.3.5 – Configurações do coletor de dados.....	56
3.3.6 – Frequências de defeito dos rolamentos.....	58
3.3.7 – Esquemas de funcionamento das bombas.....	59
3.3.8 – Ensaio de impacto	61
3.4 – Resultados da análise global	64
3.4.1 – Normas para a análise global das medições efetuadas.....	64
3.4.1.1 – Norma para os valores globais de magnitude de velocidade	64
3.4.1.2 – Carta de severidade para os valores globais de aceleração gSE	66
3.4.2 – Bomba A1	67
3.4.3 – Bomba A2	77
3.4.4 – Bomba B1	85
3.4.5 – Bomba B2	95
3.4.6 – Bomba B3	104
3.5 – Resposta livre versus resposta em funcionamento.....	114
3.5.1 – Medição na bomba A1	114
3.5.1.1 – Medição A1M1 – 3Y/3Y.....	114
3.5.1.2 – Medição A1M4 – 7X/7X.....	115
3.5.1.3 – Medição A1M5 – 7Z/7Z.....	116

3.5.1.4 – Medição A1M6 – 8X/8X.....	117
3.5.1.5 – Medição A1M7 – 8Z/8Z.....	118
3.5.1.6 – Medição A1M8 – 9X/9X.....	119
3.5.1.7 – Medição A1M9 – 9Y/9Y.....	120
3.5.2 – Medição na bomba B2.....	121
3.5.2.1 – Medição B2M2 – 6Y/4Y.....	121
3.5.2.2 – Medição B2M4 – 6Y/6Y.....	122
3.5.2.3 – Medição B2M6 – 6X/6X.....	123
3.5.2.4 – Medição B2M8 – 9X/9X.....	124
3.5.2.5 – Medição B2M9 – 9Z/9Z.....	125
3.5.2.6 – Medição B2M10 – 10Z/10Z.....	126
3.6 – Comparação entre bombas do mesmo grupo.....	127
3.6.1 – Comparação do grupo A.....	127
3.6.1.1 – Medição XXAF1 – 9Y/8Y.....	128
3.6.1.2 – Medição XXAF2 – 9Y/3Y.....	129
3.6.1.3 – Medição XXAF3 – 9Y/2Y.....	130
3.6.1.4 – Medição XXAF4 – 9Y/7Y.....	131
3.6.1.5 – Medição XXAF5 – 9Y/5Y.....	132
3.6.2 – Comparação do grupo B.....	133
3.6.2.1 – Medição XXBF1 – 9Y/8Y.....	134
3.6.2.2 – Medição XXBF2 – 9Y/3Y.....	135
3.6.2.3 – Medição XXBF3 – 9Y/4Y.....	136
3.6.2.4 – Medição XXBF4 – 9Y/7Y.....	137
3.6.2.5 – Medição XXBF5 – 9Y/5Y.....	138
3.7 – Quadro resumo do diagnóstico de defeitos.....	139
4. Conclusões.....	141
4.1 – Conclusão.....	141
4.2 – Desenvolvimentos futuros.....	142
5. Bibliografia.....	143

Índice de figuras

Figura 1 - Importância Crescente da Manutenção [2]	3
Figura 2 - "Iceberg" dos custos de manutenção [4]	5
Figura 3 - Expectativas da manutenção ao longo da sua evolução [5]	7
Figura 4 - Mudança de visão na falha dos equipamentos ao longo da evolução da manutenção [5]....	8
Figura 5 - Mudanças na manutenção ao longo da sua evolução [5].....	8
Figura 6 – Revisão às mudanças na manutenção ao longo da sua evolução [6]	9
Figura 7 - Etapas na análise de dados de vibração [11]	13
Figura 8 - Detecção de problemas em máquinas por diversos métodos	14
Figura 9 - Exemplo de um sinal em função do tempo (esquerda) e de um espectro de frequência (direita).....	16
Figura 10 - Esquema de funcionamento da Transformada Rápida de Fourier (FFT) [14].....	16
Figura 11 - Diferentes tipos de efeitos de janela [15].....	17
Figura 12 - Demonstração gráfica do fenómeno de Aliasing [13].....	19
Figura 13 - Exemplo da passagem de um sinal pela FFT com 0% de sobreposição	20
Figura 14 - Exemplo da passagem de um sinal pela FFT com 50% de sobreposição	21
Figura 15 - Demonstração gráfica da relação de RMS, Pico e pico-a-pico.....	22
Figura 16 - Constituição de um acelerómetro piezoelétrico [19]	24
Figura 17 - Sistema de um grau de liberdade de massa, mola e amortecedor	25
Figura 18 - FRF em magnitude em coordenadas polares para um sistema de 1 grau de liberdade.....	26
Figura 19 - Efeito da rigidez da ponteira no impulso gerado em função do tempo (esquerda) e em função da frequência em decibéis (direita) [24]	27
Figura 20 - Descrição de uma bomba centrífuga e respetiva legenda [26]	29
Figura 21 - Corpo de uma bomba centrífuga vista em corte [27]	29
Figura 22 - Tipos de impulsores [28]	30
Figura 23 – Espectro FFT de um defeito de passagem das pás do impulsor [9]	31
Figura 24 - Tipos de desequilíbrios e as relações entre os eixos [30]	32
Figura 25 - Espectro FFT de um defeito de desequilíbrio [9]	32
Figura 26 - Esquema de um desalinhamento angular [31]	33
Figura 27 - Espectro FFT de um defeito de desalinhamento angular [9].....	33
Figura 28 - Esquema de um desalinhamento paralelo [31]	34
Figura 29 - Espectro FFT de um defeito de desalinhamento paralelo [9].....	34
Figura 30 - Desalinhamento em rolamentos [32]	34
Figura 31 - Espectro FFT de um defeito de empeno no veio consoante a localização da deformação [9]	35
Figura 32 - Espectro FFT de um defeito de folga interna relacionada com tolerâncias [9]	35
Figura 33 - Espectro FFT de um defeito de folga entre a máquina e a sua fundação [9]	36
Figura 34 - Espectro FFT de um defeito de folga estrutural [9]	36
Figura 35 - Espectro FFT de um defeito de cavitação [9]	37
Figura 36 - Exemplo de um rolamento de esferas com descrição dos componentes [33].....	38
Figura 37 - Geometria de um rolamento [16].....	39
Figura 38 - Espectros FFT de um defeito dos diferentes estágios de degradação de um rolamento [9]	40
Figura 39 - Esquema da planta da Estação Elevatória de Vale de Milhaços	41
Figura 40 – Conjunto das eletrobombas da sala de máquinas. Desenhado em SolidWorks.....	42
Figura 41 - Fotografia de uma eletrobomba do grupo A, com trajetória da água.....	43

Figura 42 - Fotografia de uma eletrobomba do grupo B, com trajetória da água	43
Figura 43 - Fotografia do Analisador portátil Enpac 2500	46
Figura 44 - Janela retirada do EMONITOR Odyssey, ao criar uma nova configuração de medição	48
Figura 45 - Acelerómetro 786A da Wilcoxon Research, com a base magnética.....	49
Figura 46 - Grupo A - Sistema de Coordenadas	50
Figura 47 - Grupo B - Sistema de coordenadas.....	50
Figura 48 - Grupo A - Pontos de medição vista de frente	51
Figura 49 - Grupo A - Pontos de medição vista lateral.....	51
Figura 50 - Grupo B - Pontos de medição vista de frente	53
Figura 51 - Grupo B - Pontos de medição vista lateral.....	53
Figura 52 - Demonstração da localização do ponto 1	55
Figura 53 - Legenda do esquema de funcionamento das bombas	59
Figura 54 - Esquema de funcionamento da medição 1, do dia 23-09-2015	59
Figura 55 - Esquema de funcionamento da medição 2, do dia 24-09-2015	60
Figura 56 - Esquema de funcionamento da medição 3, do dia 30-09-2015	60
Figura 57 - Fotografia do martelo de impacto utilizado, da Kistler	61
Figura 58 - Programação em bloco aplicada para extrair as FRF	61
Figura 59 - Carta de severidade para os rolamentos, em gSE (<i>IRD Mechanalysis</i>).....	66
Figura 60 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba A1	68
Figura 61 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba A1	69
Figura 62 - Espectros de velocidade das três medições do ponto A1_3Z.....	70
Figura 63 - Gráfico da FRF A1M2 do ponto 3Z da bomba A1 efetuada com o martelo de ensaio de impacto.....	71
Figura 64 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A1_3Z	72
Figura 65 - Gráfico da FRF A1M4 - 7X/7X efetuada com o martelo de ensaio de impacto.....	73
Figura 66 - Espectros de velocidade da medição 2 dos pontos A1_5X, A1_6X e A1_7X	74
Figura 67 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba A1	75
Figura 68 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A1_1Y	76
Figura 69 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba A2	78
Figura 70 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba A2	79
Figura 71 - Espectros de velocidade das três medições do ponto A2_4Z	80
Figura 72 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A2_4Z	82
Figura 73 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba A2	83
Figura 74 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A2_4X	84
Figura 75 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B1	86
Figura 76 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B1	87
Figura 77 - Espectros de velocidade e aceleração para o ponto 9Z da bomba B1, medição 3.....	88
Figura 78 - Gráfico da FRF B2M9 - 9Z/9Z efetuada com o martelo de ensaio de impacto	89
Figura 79 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B1	90

Figura 80 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3X	91
Figura 81 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3Y	93
Figura 82 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3Z	94
Figura 83 -Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B2	96
Figura 84 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B2	97
Figura 85 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B2_3X.....	98
Figura 86 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B2_8Z	99
Figura 87 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B2	100
Figura 88 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3X.....	101
Figura 89 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3Y	102
Figura 90 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3Z	103
Figura 91 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B3	105
Figura 92 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B3	106
Figura 93 -Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B3_6Y.....	107
Figura 94 - Gráfico da FRF B2M4- 6Y/6Y e espectro de velocidade da medição 3 do ponto B2_6Y... ..	108
Figura 95 - xxBombaB3 - Conjunto das 5 FRF da bomba B3, medidas no ponto 9Y	108
Figura 96 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B3_9Z	109
Figura 97 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B3	110
Figura 98 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3X	111
Figura 99 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3Y	112
Figura 100 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3Z	113
Figura 101 - A1M1 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 3Y	114
Figura 102 - A1M4 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 7X	115
Figura 103 - A1M5 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 7Z	116
Figura 104 - A1M6 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 8X	117
Figura 105 - A1M7 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 8Z	118
Figura 106 - A1M8 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9X	119
Figura 107 - A1M9 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9Y	120
Figura 108 – B2M2 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6Y, com 4Y como ponto de excitação.....	121
Figura 109 - B2M4 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6Y, com 6Y como ponto de excitação.....	122
Figura 110 - B2M6 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6X	123
Figura 111 - B2M8 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9X	124
Figura 112 - B2M9 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9Z	125
Figura 113 - B2M10 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 10Z	126
Figura 114 – XXGrupo A - Resposta em funcionamento do ponto 9Y para o grupo A	127
Figura 115 - XXAF1 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 8Y como ponto de excitação	128
Figura 116 – XXAF2 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 3Y como ponto de excitação	129
Figura 117 – XXAF3 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 2Y como ponto de excitação	130
Figura 118 – XXAF4 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 7Y como ponto de excitação	131
Figura 119 – XXAF5 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 5Y como ponto de excitação	132

Figura 120 - XXGrupo B - Resposta em funcionamento do ponto 9Y para o grupo B	133
Figura 121 – XXBF1 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 8Y como ponto de excitação	134
Figura 122 – XXBF2 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 3Y como ponto de excitação	135
Figura 123 – XXBF3 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 4Y como ponto de excitação	136
Figura 124 – XXBF4 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 7Y como ponto de excitação	137
Figura 125 – XXBF5 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 5Y como ponto de excitação	138

Índice de tabelas

Tabela 1 - Características das eletrobombas do grupo A	44
Tabela 2 - Características das eletrobombas do grupo B.....	45
Tabela 3 - Configurações base para medições em velocidade e aceleração	48
Tabela 4 - Características do acelerómetro 786A da Wilcoxon Research	49
Tabela 5 - Grupo A - Pontos de medição	52
Tabela 6 - Grupo B - Pontos de medição.....	54
Tabela 7 - Grupo A - Configurações por localização	56
Tabela 8 - Grupo B - Configurações por localização	56
Tabela 9 - Configurações detalhadas utilizadas	57
Tabela 10 - Grupo A - Características dos rolamentos e respetivas frequências de defeitos.....	58
Tabela 11 - Grupo B - Características dos rolamentos e respetivas frequências de defeitos.....	58
Tabela 12 - Pontos de 10 medições com o martelo de impacto para uma bomba de cada grupo	62
Tabela 13 - Pontos de 5 medições com o martelo de impacto para todas as bombas	63
Tabela 14 - Limites das zonas típicas de funcionamento para os níveis de vibração	65
Tabela 15 - Amplitudes de velocidade para 124 Hz dos pontos A1_5X, A1_6X, A1_7X para as três medições	74
Tabela 16 - Amplitudes de velocidade e aceleração para picos no ponto B1_9Z.....	88
Tabela 17 - Amplitudes dos picos de velocidade e aceleração do ponto B2_3X para as três medições	98
Tabela 18 - Amplitudes dos picos de velocidade e aceleração do ponto B2_8Z para as três medições	99
Tabela 19 - Amplitudes do pico de velocidade e aceleração do ponto B3_6Y para as três medições.....	107
Tabela 20 - Amplitudes do pico de velocidade e aceleração do ponto B3_9Z para as três medições.....	109
Tabela 21 - Quadro resumo do diagnóstico de defeitos, com indicação dos pontos de possíveis ocorrências	139

Simbologia e acrónimos

c	Amortecimento
d	Diâmetro da esfera ou do rolo
D_p	Diâmetro primitivo
$f(t)$	Força excitadora
f_e	Frequência de rotação da pista externa
f_g	Frequência de rotação da gaiola
f_i	Frequência de rotação da pista interna
F_{max}	Frequência máxima
k	Rigidez da mola
m	Massa
n	Número de médias (<i>averaging</i>)
N	Número de esferas ou rolos
O_{lap}	Percentagem de sobreposição (<i>overlap</i>)
pk	Pico
$pk - pk$	Pico a pico
r	Relação de ressonância
ω_f	Frequência de funcionamento
ω_n	Frequência natural
\ddot{x}	Vetor de aceleração
\dot{x}	Vetor de velocidade
x	Vetor de deslocamento
θ	Ângulo de contacto
BPF	Frequência de passagem de pás (<i>Blade Pass Frequency</i>)
BPFI	Frequência emitida por uma esfera ou um rolo devido a um defeito superficial da pista interna (<i>Ball Pass Frequency of the Inner Race</i>)
BPFO	Frequência emitida por uma esfera ou um rolo devido a um defeito superficial da pista externa (<i>Ball Pass Frequency of the Outer Race</i>)
BSF	Frequência emitida devido a um defeito superficial na esfera ou rolo (<i>Ball Spin Frequency</i>)

CBM	Manutenção baseada na condição (<i>Condition Based Maintenance</i>)
CPM	Ciclos por minuto
DFT	Transformada de Fourier discreta (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
FRF	Função de resposta em frequência (<i>Frequency Response Function</i>)
FTF	Frequência emitida devido a um defeito da gaiola (<i>Fundamental Train Frequency</i>)
HFD	Deteção de altas frequências (<i>High Frequency Detection</i>)
Imp	Impulsor
LOR	Linhas de resolução (<i>Lines of Resolution</i>)
RBM	Manutenção baseada no risco (<i>Risk Based Maintenance</i>)
RCM	Manutenção centrada na fiabilidade (<i>Reliability Centered Maintenance</i>)
RMS	Valor eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
RPM	Rotações por minuto

1. Introdução

1.1 – Contexto e motivação

Com a crescente complexidade de sistemas mecânicos, torna-se cada vez mais relevante prevenir e detetar falhas o tão precocemente quanto for possível, a fim de evitar danos de maior grau e diminuir custos de manutenção.

Esta prevenção toma uma acrescida importância quando diz respeito à distribuição de água potável para a população, onde mais importante do que reduzir custos de manutenção, é garantir que não falte água a nenhuma habitação por conta de quem tem a responsabilidade por essa distribuição.

Assim, assumindo uma monitorização controlada e contínua das vibrações, permite estar um passo adiante de qualquer falha ou dano que possa surgir, quer por desgaste e fadiga, quer por incorreções na montagem e funcionamento.

A motivação para este trabalho surge precisamente nesse contexto, uma vez que a manutenção ocupa a maior parte dos custos de uma máquina em todo o seu ciclo de vida útil. Assim, reduz-se esses custos, e pode-se aumentar significativamente a eficiência do sistema mecânico.

1.2 – Objetivos

Este trabalho tem como objetivo avaliar através da análise de vibrações, o comportamento de um conjunto de bombas centrífugas na sua função de distribuição de água para a rede de todo o município de Almada.

Serão feitas comparações de resultados entre várias componentes do sistema, discutindo a sua importância e as reações que terão ao serem afetados por diferentes gamas de vibrações.

1.3 – Estrutura da dissertação

Esta dissertação estará distribuída e organizada quatro capítulos principais, nomeadamente:

Capítulo 1:

Introdução

Apresentação do tema e do seu contexto, bem como a motivação e os objetivos a atingir.

Estado de arte, com uma breve introdução sobre a manutenção e a sua evolução, explicitando as principais filosofias de manutenção, dando maior foco à manutenção baseada na condição. A análise de vibração como ferramenta da manutenção baseada na condição.

Capítulo 2:

Vibrações em bombas centrífugas

Apresentação do conceito básico de vibração. Introdução da análise espectral, abordando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), bem como as configurações que resultam da análise espectral, como o tipo de janela, a largura de banda através da frequência máxima e das linhas de resolução, o *aliasing*, as médias, a percentagem de sobreposição aplicada às médias, e as grandezas e amplitudes de vibração. Ainda é feita uma breve abordagem à demodulação de sinais, referenciando a energia de pico (*spike energy*), ou *espectro gSE*, como técnica de análise *envelope* na detecção de defeitos em rolamentos.

Breve introdução de um sensor de vibração, nomeadamente um acelerómetro.

Introdução de conceitos da análise modal, tais como a vibração livre e vibração forçada, abordando a função de resposta em frequência (FRF), bem como o ensaio de impacto, como método da análise modal experimental na detecção de frequências naturais das estruturas.

Apresentação de uma bomba centrífuga, o seu funcionamento e os principais constituintes. Enumeração dos principais defeitos em bombas, com respetivos espectros FFT esperados. Caracterização de rolamentos, forma de cálculo das frequências de defeitos e estágios de degradação.

Capítulo 3:

Caso de estudo experimental

Apresentação dos objetos de estudo e identificação dos equipamentos. Descrição do coletor de dados, do programa de análise e do acelerómetro. Ilustração dos pontos de medição, das etapas de medições e dos esquemas de funcionamento. Cálculo das frequências de defeito dos rolamentos. Demonstração dos ensaios com o martelo de impacto para determinação das frequências naturais dos sistemas.

Descrição da norma aplicada para a análise global em velocidade, e da carta de severidade para a aceleração em gSE. Análise a cada uma das cinco bombas, a nível de valores globais de velocidade, aceleração, e aceleração gSE.

Comparação entre resposta livre e resposta em funcionamento em uma bomba de cada grupo, com ilustração das zonas de ressonância.

Comparação de FRFs entre bombas do mesmo grupo.

Breve discussão dos resultados obtidos através de um quadro resumo de diagnóstico de defeitos.

Capítulo 4:

Conclusões

Conclusões finais em matérias importantes, e salientando as contribuições propostas e apresentação de sugestões para projetos futuros.

1.4 – Estado da arte

1.4.1 – Introdução à manutenção

A fiabilidade é um dos aspetos mais prioritários na avaliação de produtos ou equipamentos industriais, o que implica que, para obter equipamentos com elevada fiabilidade é essencial também que o seu projeto seja de qualidade. No entanto, a qualquer nível de capacidade de projetos, por muito bem elaborados e complexos que estes sejam, o produto final irá sempre estar sujeito a um processo de deterioração ao longo do tempo, especialmente se implicar movimento e contato entre vários componentes mecânicos, como é o caso de motores ou outras máquinas que contenham rolamentos. A manutenção introduz-se assim, como uma forma eficiente de garantir um nível satisfatório de fiabilidade durante todo o período útil de vida do equipamento [1].

A manutenção torna-se um aspeto ainda mais importante quando se juntam, à fiabilidade dos produtos e aos problemas de deterioração dos equipamentos, outros fatores, como a energia, o meio ambiente e a sua conservação, a periódica renovação dos equipamentos e instalações, modernização e otimização dos processos de fabrico para um aumento de qualidade e eficácia dos produtos e a valorização dos técnicos [2].

Todos estes fatores mencionados levam evidentemente as organizações a considerarem a manutenção como um fator determinante na economia das empresas, procurando os melhores e mais eficazes métodos por forma a aumentar os índices de produtividade e a debater possíveis concorrências [2].

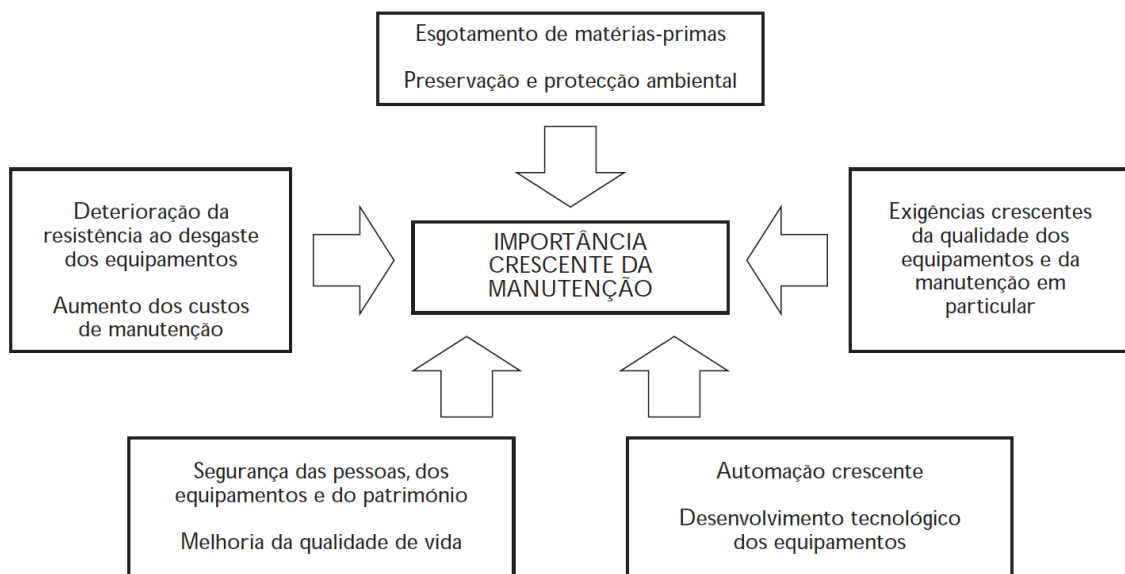


Figura 1 - Importância Crescente da Manutenção [2]

Sendo a manutenção vista atualmente como uma ferramenta ou função que pode ditar elevados níveis de produção de equipamentos ou produtos, poderia haver um excesso na sua aplicação, que prejudicasse outras condições, sendo desta forma necessário também dar a devida importância a outros parâmetros como a segurança, a qualidade de tudo o que está envolvido, o custo e a disponibilidade.

No que diz respeito à segurança, é tudo o que esteja relacionado com a segurança principalmente dos operadores e técnicos que estejam nas instalações, mas também a segurança dos próprios equipamentos e consequentemente da comunidade alvo a que esteja destinada a utilização dos equipamentos.

Em termos de qualidade, com acréscimo de exigência do consumidor final, prevê-se que os equipamentos funcionem perto do seu rendimento máximo possível, respeitando todos os parâmetros de segurança e proteção resultantes das operações, proporcionando elevada qualidade com a menor probabilidade para defeitos ou problemas.

Na disponibilidade geral, as operações onde seja necessária a paragem dos equipamentos, implica desde logo baixas no índice de produção, e portanto exige-se pessoal qualificado capaz de identificar o tipo de falha e a sua localização e planejar com máxima exatidão o método de reparação ou substituição de peça.

Na vertente de custos, as operações de manutenção deverão tentar seguir sempre a regra de minimização de custo do produto final e dos processos de fabrico aplicados, sendo necessário que essas ações sejam tomadas e acompanhadas rigorosamente por técnicos apropriados para evitar falhas ou tempos perdidos.

Os custos inerentes à manutenção podem ser comparados, fazendo analogia, com um *iceberg* [3]. Isto porque muitas das vezes os responsáveis pelos departamentos de manutenção visam apenas cumprir o orçamento proposto, não abordando os objetivos da empresa e a eficácia económica, e também os métodos mais simplificados de cálculo de custos de manutenção por norma só consideram os custos diretos, a saber:

- Despesas de remuneração do pessoal;
- Fornecimento das máquinas, peças de reserva;
- Ferramentas e equipamentos auxiliares da manutenção;
- Despesas de subcontratação, se aplicada;
- Despesas correspondentes à imobilização das peças de reserva;
- Custos inerentes a documentação e burocracias.

No entanto, os custos da manutenção não são apenas diretos, existindo os custos de não-manutenção, que englobam as consequências da ineficácia da manutenção em si, dando origem a problemas de degradação e indisponibilidade dos equipamentos, diminuição de vendas, perda de confiança interna ou perda de materiais são alguns dos exemplos daquilo que se considera o fundo o *iceberg*, que não fica visível sem uma análise minuciosa [3].



Figura 2 - "Iceberg" dos custos de manutenção [4]

Em suma, pretende-se com a manutenção, executar o conjunto de ações destinadas a garantir o bom funcionamento dos equipamentos, através de intervenções oportunamente planeadas e certas, que impliquem um custo global controlado e minimizado, com a finalidade de manter os rendimentos a um nível desejado.

1.4.2 – Evolução da manutenção

A manutenção, mais que qualquer outra área de engenharia, tem sofrido grandes alterações e inovações nos últimos trinta anos. Alterações essas devido ao crescimento exponencial da indústria nesse mesmo período, com o aumento de fábricas e dos mais variados equipamentos industriais. Em simultâneo com o acréscimo da necessidade de produzir, teve-se que acompanhar com projetos mais complexos e compatíveis com as necessidades, abordando novas técnicas e métodos de manutenção e de gestão, e acima de tudo mudar a visão no mundo daquilo que é a manutenção e como se aborda.

A evolução da manutenção pode ser dividida em três principais gerações [5]:

- **Primeira geração**

Abrange o período até à Segunda Guerra Mundial. Até essa altura, a indústria funcionava em níveis básicos, pouco mecanizada, e como tal, não se tinha grandes produções e os tempos de paragem não implicavam grandes problemas e preocupações. Os próprios equipamentos eram projetados nesse sentido, geralmente sobredefinidos, tornando-os fiáveis e ao mesmo tempo fáceis de reparar, aplicando um tipo de manutenção corretiva, com requisitos de mão-de-obra igualmente básica. Como tal, a

prevenção desses equipamentos não era visto como uma prioridade (e muito menos a capacidade de prever quando iriam ocorrer as falhas) e nem era necessário qualquer tipo de manutenção sistemática que fosse além de simples operações de manutenção de rotina, tais como de limpeza, renovação de lubrificantes, substituição de peças de pouca longevidade ou reabastecimento de depósitos. Substancialmente empregava-se uma manutenção corretiva, de deparar-se com uma falha apenas quando o sistema mecânico quebrasse o seu normal funcionamento, e só então se procedia à reparação ou substituição do equipamento.

- **Segunda geração**

Surge por necessidade durante a Segunda Guerra Mundial. Cria-se uma relação de proporcionalidade indireta, com o aumento da procura de todo o tipo de bens e portanto sendo fundamental aumentar a produção, enquanto por outro lado a mão-de-obra na indústria diminuía bruscamente motivada pela necessidade de homens a combater em tempo de guerra. Esta situação não sendo de todo viável, levou os engenheiros naquela altura a introduzir e desenvolver a mecanização nos seus métodos de produção, pois o sustento e sucesso na guerra dependia disso. Cresceu assim, já no período pós guerra, o número de equipamentos de todos os tipos e para todas as finalidades, bem como a sua complexidade. Ao contrário do que acontecia na primeira geração, aqui, os tempos de paragem para reparações já representavam quebras significativas na produção, e portanto os responsáveis pela manutenção começaram a pensar e a trabalhar na possibilidade de prevenir essas mesmas falhas nos equipamentos, levando ao conceito atual de manutenção preventiva. Este método baseia-se em revisões e operações de manutenção seguindo intervalos de tempo fixos. Quer os constituintes do equipamento estivessem em bom estado ou não, estes seriam substituídos ou reparados, o que desencadeou algumas críticas por se introduzirem operações de manutenção que eram algumas vistas como desnecessárias e que prejudicavam todo o processo. Inicialmente os custos de manutenção sofreram um aumento desmedido relativamente a outras operações envolvendo os equipamentos, originados pela falta de organização e definição nesses intervalos de tempo. Desenvolveram-se então sistemas de controlo e planeamento de manutenção, algo que tornasse possível focalizar com mais ponderação o tema da manutenção e controlar os custos que não se mostravam nada favoráveis em comparação com os custos de reparar quando já existia a falha.

- **Terceira geração**

Surge desde há cerca de trinta anos, assume-se como sendo o momento em que a manutenção é vista de fato como um dos aspetos mais importantes a gerir numa organização. É a partir desse período que as investigações e os desenvolvimentos criam um maior impacto no sentido de melhorar os métodos de manutenção. O constante progresso na automação e na mecanização significaram um aumento da fiabilidade e mesmo da eficácia no funcionamento das fábricas, uma vez que os tempos de paragem afetavam a capacidade produtiva ao reduzir o número de produtos finais, por efeito aumentando os custos de operação e prejudicando o atendimento e ligação com os clientes. Em igual crescimento com a automação, está a qualidade do produto. Não tendo uma mão-de-obra tão ativa como acontecia antes de se introduzir a automação, foi preciso pensar em padrões de qualidade mais elevados, pois os níveis de qualidade na altura, antes da modernização, não eram tão importantes devido aos métodos de

produção aplicados. Outro aspecto importante é a segurança e as consequências para o ambiente originadas por uma falha. Esperavam-se critérios mais rigorosos, ao ponto das organizações se conformarem e irem ao encontro das expectativas da sociedade no campo da segurança e do ambiente, ou em caso de não ser possível aceitar os termos, pararem por completo as suas operações de produção. Por fim, os custos. É de esperar que melhorando as condições de produção com mecanização e automação, o custo dos equipamentos aumente de tal forma que sirva de incentivo aos responsáveis a refletir antes do investimento, que terá tanto mais retorno quanto maior for a longevidade do equipamento. Os próprios custos da manutenção seguiram ao longo destas gerações, um crescimento mais ou menos constante, tornando o seu controlo e planeamento cada vez mais pertinente, resultando na segunda maior parcela ou até mesmo na maior fração de custos em certos tipos de indústria.

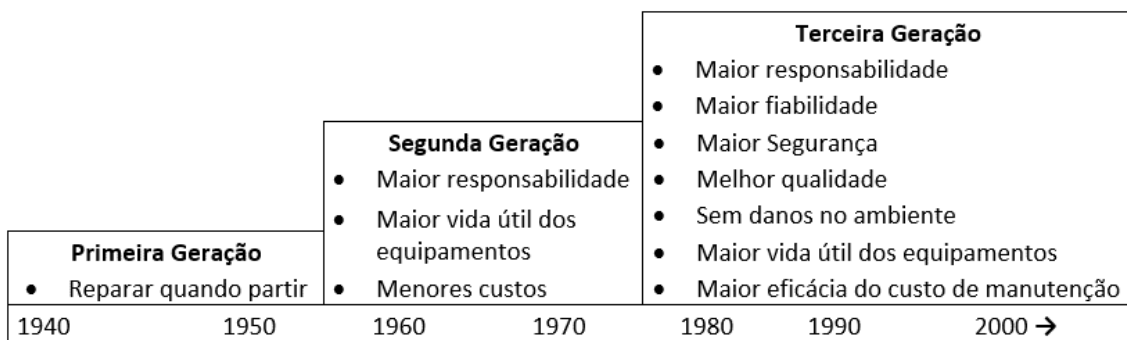


Figura 3 - Expectativas da manutenção ao longo da sua evolução [5]

Para dar resposta a todas as expectativas que se avizinhavam, foi preciso envolver mais pessoas e mais investigadores e engenheiros na vertente da manutenção. E com isso mudou-se a forma como se olhava para uma máquina, tentar compreender melhor o seu funcionamento e a relação que existia entre a probabilidade de ocorrência de falhas, com os anos de funcionamento do equipamento. Ainda hoje é comum o pensamento de que quanto mais uso um aparelho vai tendo, maior é a probabilidade de este se avariar ou apresentar falhas. Apesar de não ser uma noção totalmente incorreta, mostrou-se que de fato não é a única maneira de idealizar essa relação, que era exclusiva na primeira geração, resultando nas reparações apenas quando quebra. Na segunda geração passou-se a assumir que o equipamento poderia apresentar falhas não só quando este já estivesse em funcionamento há consideravelmente algum tempo, mas também nos primeiros momentos em que é posto em atividade. Na terceira geração, e atualmente, essas visões multiplicaram-se, o que facilita a abordagem ao equipamento e aos melhores métodos de manutenção a aplicar.

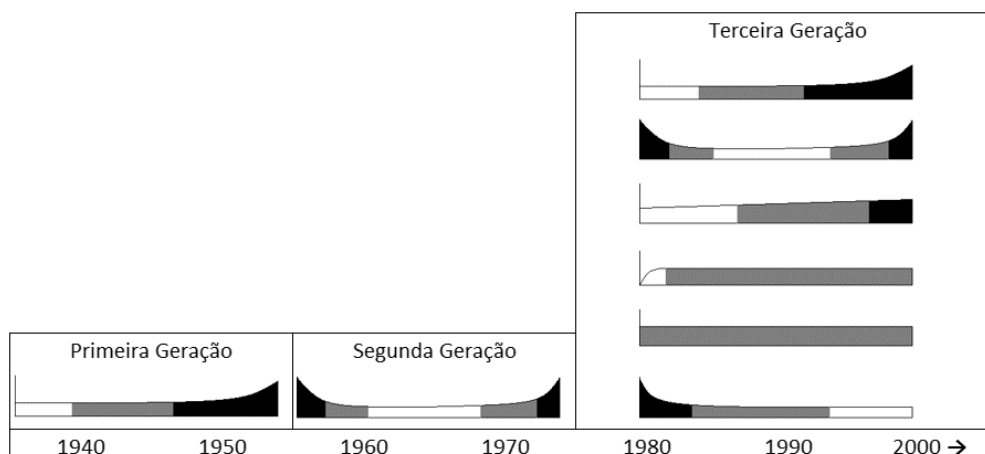


Figura 4 - Mudança de visão na falha dos equipamentos ao longo da evolução da manutenção [5]

Relativamente aos novos desenvolvimentos na manutenção na terceira geração, destacam-se naturalmente, novas técnicas e métodos de manutenção, como a monitorização da condição, ou manutenção baseada na condição, a ser abordada mais adiante. Também se criaram ferramentas de apoio à decisão, no momento de escolher a melhor técnica a aplicar, através de normas, ou estudos de falhas e análise dos seus efeitos. Relacionado com o projeto de equipamentos, deu-se ênfase a projetos que tornassem as operações de manutenção mais acessíveis, mas também evoluir em termos de longevidade, de segurança e de eficácia.

Todo este desenvolvimento só se tornou real mudando a mentalidade dos responsáveis em termos de organização, participando mais em equipa nas discussões de novas ideias e mostrando uma maior flexibilidade de pensamentos. Pois o grande desafio, além de elaborar e aplicar as técnicas, é perceber a altura certa para empregar esses métodos e se de facto irá gerar valor para as organizações, porque se for uma decisão acertada, resolve o problema e pode até reduzir custos de manutenção, caso contrário, acrescenta um segundo problema ao problema já existente.

Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		
<ul style="list-style-type: none"> Reparar quando partir 		<ul style="list-style-type: none"> Revisões regulares Sistemas de planeamento e controlo Computação básica e lenta 		<ul style="list-style-type: none"> Monitorização da condição Projetos baseados na fiabilidade e manutenibilidade Sistemas especializados Estudos e ensaios destrutivos Computação mais rápida Modos de falha e análise de efeitos Polivalência e trabalho em equipa 		
1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000 →

Figura 5 - Mudanças na manutenção ao longo da sua evolução [5]

Estudos mais recentes [6], ditam a criação de uma nova geração, denominada por geração recente ou atual, por dar ênfase a uma metodologia de manutenção baseada no risco, que já vinha sendo explorada a partir do ano de 1990 em várias inspeções baseadas no risco, mas só se tornou vulgar e firmemente aplicável em torno do ano 2000. Esta geração pouco mais apresenta em termos de padrões de qualidade ou de legislações do ambiente e de segurança, mas introduz o conceito de inspeção e manutenção baseada no risco (RBM – *Risk Based Maintenance*), em adição aos conceitos já conhecidos da manutenção centrada na fiabilidade (RCM – *Reliability Centered Maintenance*), e manutenção baseada na condição (CBM – *Condition Based Maintenance*).

Primeira geração		Segunda Geração		Terceira Geração			Geração Recente				
<ul style="list-style-type: none"> • Reparar quando partir • Manutenção básica e de rotina • Manutenção corretiva 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção preventiva planeada • Manutenção baseada no tempo • Sistemas de planeamento e controlo 	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenção baseada na condição • Manutenção baseada na fiabilidade • Sistemas computadorizados de gestão de manutenção e informação • Manutenção proactiva e estratégica • Polivalência e trabalho em equipa 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção baseada no risco • Manutenção baseada no risco • Avaliação da vida baseada no risco • Manutenção centrada na fiabilidade • Manutenção baseada na condição • Sistemas assistidos por computador de gestão de manutenção e de informação 	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000 →	Presente

Figura 6 – Revisão às mudanças na manutenção ao longo da sua evolução [6]

Até ao início desta geração, a segurança era analisada e tratada separadamente da manutenção, apesar da crescente importância que vinha a mostrar. Essa separação limitava em muitos aspetos a produção e a rentabilidade de uma empresa, pois as leis de segurança tornavam-se cada vez mais apertadas e rigorosas. Surgiu a ideia de incorporar os dois termos e trabalhar-los simultaneamente, com o objetivo de otimizar a capacidade produtiva de uma fábrica, sem comprometer as mesmas regras de segurança e sem prejudicar o ambiente.

O principal funcionamento desta metodologia passa por fazer um primeiro passo de avaliação do risco, seguida então do planeamento da manutenção baseada na avaliação feita, com o intuito de reduzir o risco global que possa resultar como consequência de falhas inesperadas das operações executadas na fabricação e consequentemente reduzir a probabilidade da ocorrência de falhas [6].

1.4.3 – Definição e principais filosofias de manutenção

Atualmente dispõe-se de diversas definições expressas em normas nacionais e internacionais relativamente ao conceito e definição de manutenção. A mais usual, a norma EN 13306 [7], entende por manutenção com sendo a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão, durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou a repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida [8].

Em termos de filosofias de manutenção, é possível, de entre todas as variantes e inúmeras possibilidades de tipos de manutenção, dividir em três principais filosofias [9]:

- **Manutenção corretiva**

Segundo a norma EN 13306 [7] [9], a manutenção corretiva define-se como sendo a manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria, e destinada a repor o bem num estado em que possa realizar uma função requerida.

Esta filosofia assume o funcionamento do equipamento até ao ponto em que este apresente uma falha, e só depois é realizada a reparação ou substituição do componente danificado. Este método implica que os tempos de paragem dos equipamentos não sejam prejudiciais para a produção e que a mão-de-obra, e os custos dos materiais, não sejam grande preocupação.

Além das desvantagens da redução da produção devido aos tempos de reparação e dos custos dos materiais e dos técnicos, coloca os responsáveis pela manutenção num estado de incerteza e de desorganização. Quando é descoberta a avaria, a equipa tem que reagir de imediato, e devido à imprevisibilidade da avaria, requer também que se disponha de uma larga quantidade de peças de reposição. Por forma a tentar reduzir os custos, os responsáveis procuram obter as peças de substituição a um preço mais baixo, portanto com menor qualidade, e ter pessoal menos qualificado para as reparações, acabando por agravar a situação. É nitidamente a filosofia menos vantajosa, e apesar disso, continua a ser comum, em fábricas, a pratica desta filosofia de manutenção;

- **Manutenção preventiva sistemática**

Pela norma EN 13306 [7], a manutenção preventiva sistemática é a manutenção efetuada a intervalos de tempo predeterminados ou de acordo com critérios prescritos com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um bem.

A manutenção preventiva, tal como o nome indica, tem como base prevenir avarias. As operações de manutenção são programadas e calendarizadas com intervalos de tempo predeterminados (pelos fornecedores ou pelos engenheiros responsáveis), baseadas geralmente no número de horas de funcionamento dos equipamentos. A reparação ou substituição dos componentes ou equipamentos presumivelmente danificados é realizada antes de ocorrer sintomas demasiado perceptíveis.

Esta abordagem é vista como vantajosa para equipamentos que não estejam continuamente em atividade, e quando os técnicos têm qualificações suficientes e tempo disponível para realizar os trabalhos de manutenção. Como inconveniente desta metodologia está que a manutenção previamente agendada pode resultar em intervenções de manutenção demasiado cedo ou já tardiamente. Ao parar o funcionamento dos equipamentos para as revisões datadas, as reparações ou substituições são efetuadas mesmo que não sejam detetadas quaisquer anomalias quer com os componentes do equipamento quer no seu funcionamento, implicando paragens desnecessárias e desaproveitamento de vida útil dos componentes, ou ainda incorretas operações de reparação.

- **Manutenção preventiva condicionada**

Define-se, segundo a norma EN13306 [7], como sendo uma manutenção condicionada efetuada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do equipamento.

São programadas intervenções de manutenção quando são detetadas falhas funcionais em alguma parte do equipamento em análise. As condições da máquina são periodicamente monitorizadas, seguindo também um agendamento, mas mais curto por serem operações de monitorização que não implicam a paragem do equipamento, e quando surge algum sintoma de problemas mecânicos ou operacionais, é então identificada a origem do problema e agendada convenientemente uma intervenção para se proceder à resolução do problema.

A grande vantagem de optar por uma filosofia de manutenção condicionada, é que a gestão feita sobre a manutenção pode ser programada de forma ordenada e controlada. Pode-se organizar por grau de severidade do problema, mas ainda precocemente, dando tempo e espaço de manobra para adquirir as peças de substituição adequadas e reduzindo a quantidade de peças de reserva em armazém. Uma vez que as reparações só são feitas quando realmente são fundamentais, a capacidade produtiva tende a aumentar.

Como desvantagens deste método, está a possibilidade de ser exigido muito mais tempo e verbas de capital para as operações de manutenção, se for feita uma incorreta avaliação do estado operacional e deterioração do equipamento. É fundamental ter pessoal especializado para efetuar estas avaliações, acompanhados também por instrumentos de monitorização específicos e necessários para adquirir dados suficientes para avaliar o estado da máquina.

A manutenção baseada na condição (*CBM – Condition Based Maintenance*), tem assim como objetivo, monitorizar condições mecânicas, eficiências dos equipamentos e outros parâmetros que sejam fundamentais para o bom funcionamento da máquina, chegando o mais próximo possível ao ponto de decisão de reparar ou não, funcionando um pouco em analogia com diagnósticos médicos. Qualquer defeito que surja irá ser avaliado através de diversos sintomas, quer em forma de vibrações excessivas ou outros parâmetros, sendo necessário recorrer a instrumentos específicos de medições, pois são parâmetros e sintomas que escapam à perceção humana. Assim, antes de escolher o instrumento e a técnica de análise, terá que se avaliar o tipo de indústria, os equipamentos disponíveis e também os resultados que se pretende obter.

Das mais variadas técnicas, destacam-se as seguintes:

- Análise de vibrações: Detecção de defeitos mecânicos em equipamentos rotativos;
- Emissão acústica: Detecção, localização e monitorização de fissuras em estruturas e condutas;
- Análise de óleos: Detecção de possíveis partículas microscópicas no óleo de lubrificação, podendo indicar deterioração em rolamentos ou engrenagens;
- Análise de partículas: Libertação de partículas de deterioração em componentes mecânicos desgastados, e posterior análise dos detritos para conhecer o estado dos equipamentos;
- Monitorização de corrosão: Medições de espessuras ultrassónicas em condutas ou outras estruturas de difícil acesso, para acompanhar o desgaste corrosivo dos materiais;
- Termografias: Deteta problemas térmicos ou mecânicos, tais como defeitos em geradores, sobreaquecimento por fricção;
- Monitorização de desempenho: Determinação de problemas operacionais dos equipamentos analisando a sua eficiência;
- Análise de corrente elétrica: Deteta possíveis fluxos de corrente ou outros problemas relacionados com os motores.

A metodologia da manutenção baseada na condição consiste em três principais etapas:

1) Aquisição de dados

Processo destinado à recolha e armazenamento de dados do equipamento em estudo. Trata-se de um passo essencial no CBM para o diagnóstico de falhas. A informação recolhida deve ser categorizada em dados de eventos e em dados de monitorização das condições. Os dados de eventos engloba a informação sobre o equipamento relativamente ao que foi realizado, as razões de analisar o mecanismo e o que foi feito nesse sentido. Os dados das condições relatam as condições e estado do equipamento;

2) Processamento de dados

O processamento de dados começa com uma avaliação da sua origem, sendo um passo fundamental para permitir uma análise mais correta, uma vez que é possível encontrar erros na aquisição de dados, principalmente nos dados de eventos, que são inseridos manualmente. Os erros possíveis na monitorização das condições podem estar relacionados com os sensores utilizados. Após a limpeza, efetua-se a análise de dados. Os modelos matemáticos ou ferramentas auxiliares na análise dependem do tipo de dados que são recolhidos;

3) Tomada de decisão

A tomada de decisão surge após um tratamento e uma análise cuidada dos dados adquiridos. A decisão tem em consideração o prognóstico, prevendo possíveis falhas ou avarias, e também o diagnóstico, englobando a identificação e análise das falhas após deteção.

1.4.4 – Análise de vibrações como ferramenta de manutenção condicionada

A vibração está presente em praticamente tudo o que nos rodeia, desde as atividades humanas básicas, até ao envolvimento de vibrações em máquinas, resultante das excitações causadas por interações dos elementos mecânicos que interferem no desempenho do equipamento. A vibração é vista como normal quando se mantém abaixo de determinados níveis de vibração e ruído, que estão normalizados e adaptados a cada situação fabril. O não cumprimento desses níveis vibratórios, surge como um indicativo de um mau funcionamento do equipamento, resultante de uma possível anomalia.

Sendo o tema deste trabalho uma análise de vibrações, é importante perceber em que circunstâncias essa análise é aplicada em métodos de manutenção, mais propriamente manutenção baseada na condição. Das técnicas mais modernas, a análise de vibrações é uma das mais importantes na análise de máquinas rotativas pela sua versatilidade na deteção de diversas falhas, e por onde se pode obter mais informação sobre as condições de um equipamento. Funciona recorrendo a instrumentos de medições específicos, que permitem uma análise monitorizada e detalhada sobre o estado da máquina e qualquer falha existente, ou que possa vir a surgir [10].

A análise pode ser realizada seguindo dois procedimentos diferentes:

- **Medições periódicas utilizando instrumentos portáteis:** Este método fornece informações sobre as alterações a longo prazo no estado do equipamento;
- **Monitorização contínua com instrumentação permanentemente instalada:** Procedimento aplicado em situações mais críticas de falhas frequentes de um equipamento, que tenham consequências mais graves.

O processo de análise de vibrações segue as etapas do esquema da figura 7. O movimento do corpo vibratório é convertido em sinal elétrico por um transdutor ou sensor de vibração. Este sinal de saída não é suficiente para ser registado diretamente, sendo necessário um conversor, ou amplificador de sinal, que serve para amplificar essa tensão até um valor capaz de ser guardado e lido numa unidade de armazenamento, como seja um computador ou no próprio analisador. Por fim, esses dados expostos são analisados de acordo com os objetivos definidos [11].

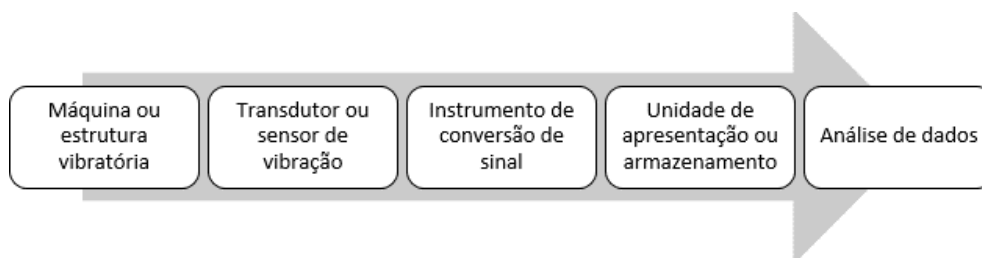


Figura 7 - Etapas na análise de dados de vibração [11]

Este tipo de análise é importante porque qualquer tipo de máquina, especialmente que contenha elementos rotativos, está sujeito a vibrações que se podem agravar consoante certo tipo de falha ou avaria. Através deste método de análise, a deteção de falhas pode ocorrer numa fase precoce do

defeito. Uma outra evidência da importância da análise de vibrações no contexto da manutenção baseada na condição é a versatilidade já mencionada da detecção de diversas falhas, como se pode observar no quadro seguinte, retirado da norma ISO 17359 [12], que compara as técnicas mais importantes e utilizadas e a sua adequabilidade na detecção de falhas.

Técnica Defeito	Análise de vibrações	Termografia	Análise de óleos	Análise acústica	Visualização c/ estroboscópio
Desequilíbrio	✓	●	●	●	●
Desalinhamento	✓	△	●	●	●
Empeno de veio	✓	●	●	●	●
Desaperto	✓	●	●	●	△
Ressonância	✓	●	●	●	●
Defeito em rolamento	✓	△	△	△	△
Cavitação	✓	●	●	△	●
Defeito em motor elétrico	✓	△	●	●	●
Defeito em engrenagem	✓	●	△	△	△
Defeito em transmissão	✓	△	●	●	△

Legenda: ✓ Técnica de monitorização adequada à deteção do defeito
 △ Técnica de monitorização parcialmente adequada à deteção do defeito
 ● Técnica de monitorização não adequada à deteção do defeito

Figura 8 - Deteção de problemas em máquinas por diversos métodos

Fica explícita a importância da análise de vibrações como ferramenta de manutenção baseada na condição, mostrando-se versátil em comparação com outras possibilidades, além da vantagem de ser uma técnica não intrusiva e permitir a identificação precoce de defeitos, facilitando a manutenção e reduzindo custos e tempos de paragens desnecessários.

2. Vibrações em bombas centrífugas

2.1 – Conceito básico de vibração

A vibração define-se como sendo qualquer movimento relativo de um ponto ou corpo em relação a uma posição de referência, ou posição de repouso, que se repita após um intervalo de tempo, também denominado por oscilação [11].

Um sistema vibratório é constituído essencialmente por um meio de armazenamento de energia potencial, representado por uma mola, um meio de armazenamento de energia cinética, definido pela massa do sistema, e um amortecedor, como meio de redução gradual da energia gerada pela transferência alternada entre as energias potencial e cinética.

2.2 – Análise espectral

O processo de análise espectral é o conjunto de técnicas matemáticas que permitem obter o conteúdo em frequências de qualquer sinal, a que se dá o nome de espectro, controlando as combinações de sinais de frequências distintas que o constituem. Aplicando esta técnica, assume-se que determinadas operações realizam-se mais facilmente no domínio da frequência, enquanto outras têm mais facilidade no domínio do tempo.

2.2.1 – Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) é uma versão mais rápida da Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*), razão pela qual é a forma mais comum de processamento de sinais [13].

Esta metodologia funciona decompondo um sinal real com variação no tempo, em várias componentes, cada uma contendo uma amplitude, fase e frequência. Relacionando as frequências com as características do equipamento e por observação das amplitudes, pode-se identificar problemas com relativa precisão. A transformada permite passar de uma descrição temporal de uns dados valores do sinal para uma descrição em frequência constituída pelos mesmos valores das amplitudes complexas das harmónicas constituintes do sinal. A FFT é um algoritmo de cálculo que funciona sobre uma amostra de um sinal, sendo necessário definir um período de amostragem e o número de amostras.

Como é natural que em aplicações reais não exista apenas uma frequência, mas sim uma frequência para cada componente de um equipamento, a visualização gráfica em função do tempo não retém muita informação útil, mas aplicada a transformação, e observando no domínio das frequências, a amplitude de frequência de cada componente irá ter uma notória identificação gráfica, como se demonstra na figura 9.

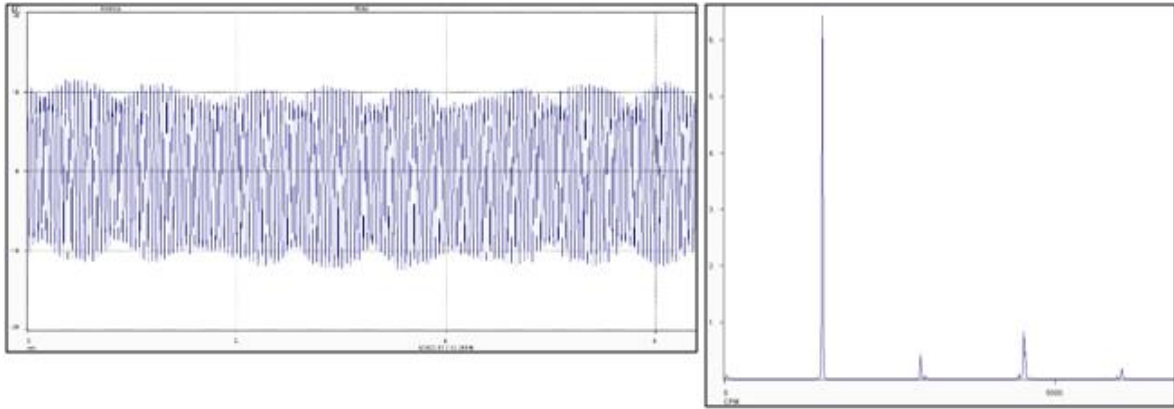


Figura 9 - Exemplo de um sinal em função do tempo (esquerda) e de um espectro de frequência (direita)

Graficamente, o que acontece na Transformada de Fourier é o que se mostra na figura 10. Na visualização do domínio do tempo o que se observa é uma única curva (a azul) que engloba todas as curvas referentes a cada componente do sistema (estas a cinzento). No domínio da frequência cada curva tem uma representação de uma frequência em toda a largura da banda de frequências.

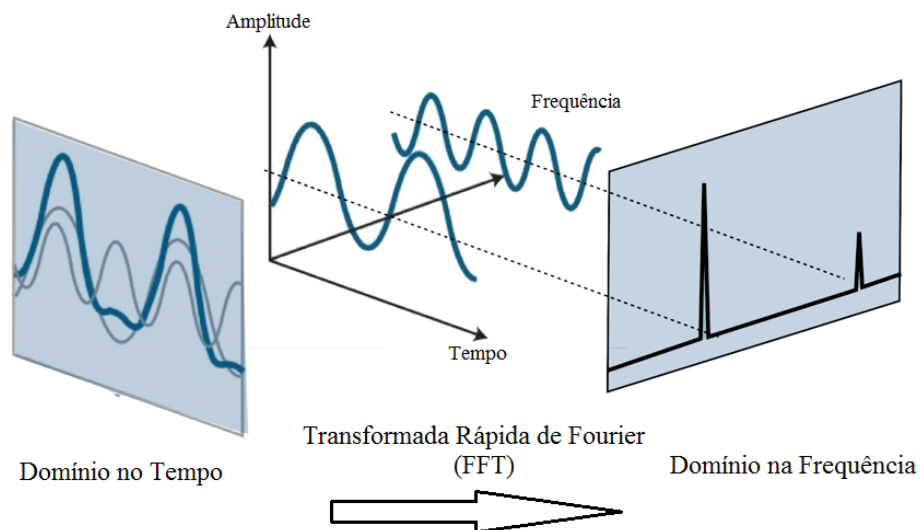


Figura 10 - Esquema de funcionamento da Transformada Rápida de Fourier (FFT) [14]

2.2.2 – Tipos de janelas (*Windowing*)

O sinal analógico obtido é submetido a amostragens com intervalos de tempo fixos, não sendo possível controlar com o período de tempo do sinal analógico, ocorrendo assim descontinuidades no início e no fim das amostragens. Desta forma é necessário atenuar esses extremos através da aplicação do processo de passagem do sinal pelo tipo de janela mais adequada para o efeito, considerando que as amplitudes no início e no fim da amostragem sejam nulas.

O algoritmo matemático FFT traduz as descontinuidades como frequências moduladas, assumindo frequências e respectivas amplitudes na forma de bandas laterais no espectro de frequência, quando na realidade, nenhuma dessas frequências está presente no sinal real.

O erro da janela pode ser reduzido ao optar pela janela mais adequada, consoante a aplicação ou o tipo de sinal analisado. As janelas mais comuns são:

Hanning – É o tipo de janela mais aplicado por ser viável em praticamente todo o tipo de situações. Estabelece resultados satisfatórios entre a precisão em termos de amplitude e a frequência, com o objetivo das amplitudes do espectro estarem muito próximas dos valores reais e reduzir assim o número de frequências características de componentes que não existam na realidade;

Flat-top – Segunda opção mais viável, apresenta boa precisão em termos de amplitude, mas peca na precisão das frequências;

Retangular – Utilizado em situações em que não se pretenda alterar muito o sinal com a aplicação do efeito de janela. Boa precisão em termos de frequências, mas fraco em amplitudes de vibração.

Além das três janelas acima referidas, também se aplica janelas do tipo *Kaiser Bessel* (que utiliza um parâmetro variável para aproximar as extremidades do centro), o tipo *Blackman* (semelhante à anterior) ou o tipo de janela *Bartlett* (uma variante da janela triangular). Na figura 11 pode-se observar graficamente, a sobreposição de alguns dos tipos de janela mencionados.

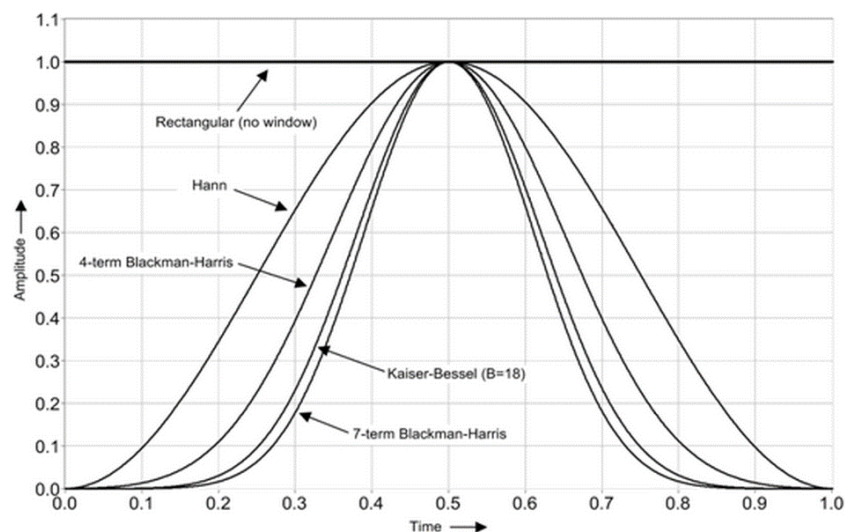


Figura 11 - Diferentes tipos de efeitos de janela [15]

2.2.3 – Largura de banda (*Bandwidth*)

A largura de banda é a largura de cada parcela que é visualizada no espectro de frequências do sinal. Engloba duas variáveis: A frequência máxima, F_{max} , e as linhas de resolução, LOR (*Lines of Resolution*).

- F_{max} é a frequência máxima selecionada manualmente pelo utilizador no analisador (ou no programa de análise) para a recolha de dados;
- LOR é o número de linhas usadas para exibir o espectro de frequências, tendo em conta a frequência máxima adotada. Dependendo do aparelho, podem ser de 400, 800, 1600, 3200, 6400 ou 12800 linhas, mas a zona de maior aplicação está entre as 400 e as 1600 linhas.

A largura de banda é calculada dividindo a frequência máxima adotada pelo número de linhas de resolução, ou seja:

$$\text{Largura de banda} = \frac{F_{max}[\text{Hz}]}{LOR [\text{uni}]} \quad (2.1)$$

Da mesma forma se pode controlar o tempo por cada amostra, que é o inverso da largura de banda:

$$\text{tempo de amostra} = \frac{LOR[\text{uni}]}{F_{max}[\text{Hz}]} = [\text{s}]/\text{amostra} \quad (2.2)$$

Fica claro que, aumentando a frequência máxima, aumenta o campo de visão do espectro e diminui o tempo de medição, o que pode parecer uma boa solução. No entanto, esse aumento compromete a resolução do espectro, se o valor de LOR se mantiver o mesmo, pois pode-se perder informação importante do sinal, uma vez que a diferença por cada parcela é muito grande que não capta alterações impulsivas no sinal.

Por outro lado, escolhendo um F_{max} muito pequeno, existe uma maior probabilidade de se perder informação útil em frequências mais altas. Uma vez que poderá haver uma perda de informação em ambas as situações, terá que haver um consenso e achar uma configuração que seja mais adequada para cada situação e de onde se possa retirar a informação com melhores condições, sem que para isso se perca muito tempo na medição.

2.2.4 – *Aliasing*

Aliasing é um fenómeno originado pela formação de ondas a frequências mais baixas do que seria na realidade, devido à frequência de amostragem, resultando que componentes de altas frequências sejam apresentados como se fossem de valores inferiores, tal como se observa na figura 12 [9].

A amostragem é o processo de guardar a amplitude de uma onda em um determinado instante sob a forma de pontos (forma de onda discreta ou digital), para posteriormente gerar uma curva através desses pontos. Por forma a garantir que as formas de onda reconstruídas se aproximem o melhor possível da forma de onda original, é necessário uma frequência de amostragem que seja

suficientemente superior à frequência máxima indicada. Essa necessidade, abordada por Nyquist no teorema de amostragem de Nyquist-Shannon, levou à conclusão que, por forma a não perder qualquer informação contida no sinal de amostra digital, a menor frequência de amostragem a aplicar será de pelo menos o dobro da frequência máxima. Concretamente, e por forma a ficar consistente com o mundo computacional, esse valor é 2,56 (na prática 2^8) multiplicado pela frequência de amostragem, devido ao filtro passa baixo, denominado por filtro *anti-aliasing* [13].

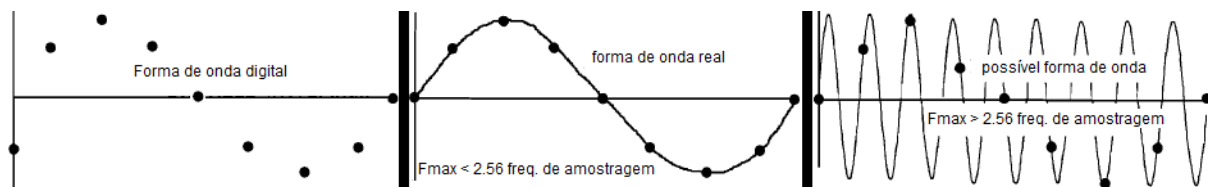


Figura 12 - Demonstração gráfica do fenómeno de Aliasing [13]

2.2.5 – Média (*Averaging*)

A média tem como principal objetivo reduzir efeitos de ruído ou vibrações aleatórias, e estranhas ao funcionamento do equipamento. Captando várias amostras e fazendo uma média dos resultados obtidos num só espectro. Usam-se tipicamente valores como 2, 4, 8, 16 ou 32, mas qualquer outro número pode ser usado, dependendo da aplicação e do rigor exigido. Quanto à tipologia, existem quatro principais tipos de médias:

Linear – O tipo linear utiliza o simples cálculo linear de médias. Cada medição é adicionada à anterior e no fim divide-se pelo número total de adições. Útil na repetição de dados que tende a reduzir ruídos e frequências de vibrações indesejadas, sendo por isso uma das técnicas mais utilizada;

Peak hold – Este método regista em cada parcela o pico, ou seja, o valor máximo. Ao contrário do linear que soma e faz uma média, o *peak hold* regista sempre o maior valor e o espectro final terá o aspeto com esses valores;

Exponencial – No método exponencial, é dada uma maior importância às medições mais recentes, seguindo uma função exponencial. Metodologia utilizada para observar certas condições que variem lentamente;

Tempo síncrono – Esta técnica usa sinais síncronos do equipamento em estudo e faz uma média no domínio do tempo. Surge na forma de impulsos gerados por um emissor eletromagnético colocado numa posição de referência do veio, fazendo com que as recolhas de dados possam ser feitas em relação ao eixo de rotação durante a média. Aplica-se este método em equipamentos que tenham vários elementos rotativos a diferentes velocidades.

2.2.6 – Sobreposição (*Overlap*)

O processo de sobreposição permite rentabilizar o tempo de medição e análise, utilizando para isso parte da informação da medição anterior, que seria perdida devido ao processo de janela, que geralmente é utilizada a janela *Hanning*.

Na figura 13, demonstra-se o processo de recolha de um sinal no tempo quando não existe sobreposição, em uma situação com quatro médias. O sinal é recolhido em quatro parcelas com o mesmo tamanho. O primeiro bloco é recolhido, passa pelo processo da aplicação da janela e resulta num espectro dessa parcela. O segundo bloco é recolhido quando o primeiro termina, e origina um outro espectro, e assim sucessivamente até ser recolhido o número de amostras pretendidas, sendo que no final é feita a média para resultar apenas em um único espectro. No entanto, nos extremos dos blocos recolhidos e tratados, devido ao processo do efeito da janela, é perdida muita informação sobre o estado do sinal.

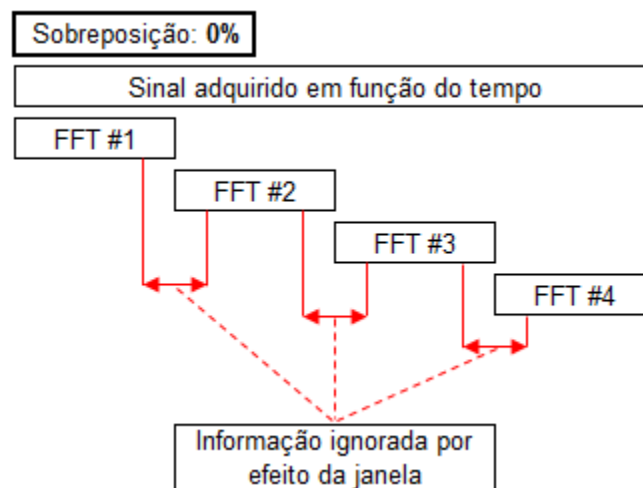


Figura 13 - Exemplo da passagem de um sinal pela FFT com 0% de sobreposição

Por outro lado, na figura 14, é tratado o mesmo sinal em função do tempo, mas com uma sobreposição de 50%. Verifica-se que a informação que estava a ser ignorada na figura 13, já é incluída no espectro de cada bloco. O primeiro bloco é recolhido, tratado pelo efeito de janela e resulta num primeiro espectro. O segundo bloco que se segue começa a recolha a meio (50%) da posição do primeiro bloco. Além de evitar perdas de informação, também reduz o tempo de contato com o equipamento que se está a medir com o analisador. Apesar destas duas vantagens, não se deve exceder muito na redução do tempo de recolha, pois embora se tenha recolhido o mesmo número de médias, pode-se estar a fazer essa recolha num período de contato com a máquina em que ocorreu algum problema, induzindo em erro.

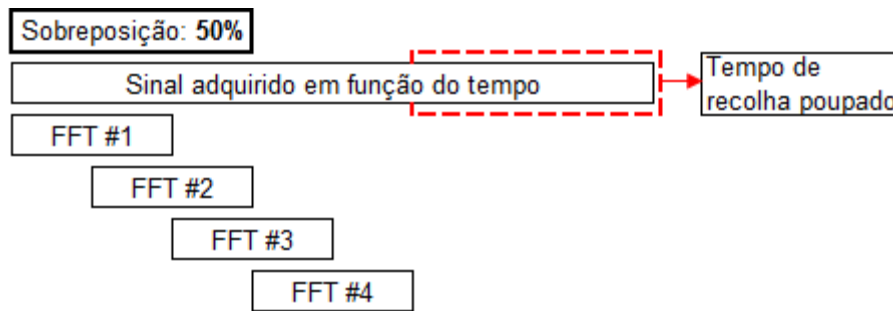


Figura 14 - Exemplo da passagem de um sinal pela FFT com 50% de sobreposição

Portanto, tem que ser feita uma análise sobre o tempo de contato do analisador com a máquina por forma a garantir que é recolhida informação útil e verdadeiramente explícita da condição do equipamento.

Assim sendo, pode-se determinar o tempo total de medição envolvendo a frequência máxima, F_{max} , as linhas de resolução, LOR , a média (considerando a linear), e a percentagem da sobreposição, O_{Lap} :

$$T_{total} [s] = \frac{LOR}{F_{max}} + O_{Lap} \times \left[(n - 1) \times \frac{LOR}{F_{max}} \right] \quad (2.3)$$

Sendo:

O_{Lap} – O valor da percentagem de overlap a dividir por 100

n – O número de averages assumido

2.2.7 – Grandezas de medição

A vibração engloba três unidades de medição, sendo geralmente expressa em:

- Deslocamento – micron (μm);
- Velocidade – milímetros por segundo (mm/s);
- Aceleração – g's ou mm/s^2 .

O uso de cada uma delas está dependente do equipamento, dos resultados esperados e do tipo de instrumentos de medições. Em termos de frequências de vibração é habitual haver várias designações, como sendo as rotações por minuto (RPM), ou Ciclos por minuto (CPM), ambos com o mesmo significado, ou também se utiliza a unidade *Hertz* (Hz). Na análise de vibrações é comum referir-se à frequência com a grandeza *Ordem* (*Order*), expressa em múltiplos da rotação da máquina.

2.2.8 – Amplitude de vibração

A amplitude de vibração é a característica que define a intensidade da vibração, de onde se tira conclusões acerca do estado de funcionamento de um equipamento a nível de vibrações, e existem nesta característica várias relações:

RMS – O valor eficaz, RMS, é a medida do nível de vibração mais utilizada, uma vez que considera o histórico da onda do sinal no tempo e está associado ao valor da energia contida no movimento. É a raiz quadrada do somatório dos quadrados de todos os pontos da curva de vibração.

Pico – O valor de pico (*peak* ou *pk*) tem em consideração apenas o máximo atingido no pico positivo, medido em relação à linha de referência. Ao contrário do RMS, não tem ligação com o histórico de contribuições de todo o sinal, não considerando qualquer evolução temporal do sinal.

Pico-a-Pico – O valor de pico-a-pico (*peak-peak* ou *pk-pk*) refere-se à amplitude total de onda, ou seja, mede a diferença entre o pico positivo e o pico negativo.

No caso particular de uma função harmónica, as relações matemáticas entre estes três valores são as seguintes:

$$RMS = 0,707 \times Pico \quad (2.4)$$

$$Pico-a-Pico = 2 \times Pico \quad (2.5)$$

Graficamente, essas relações mostram-se na figura 15, que se segue:

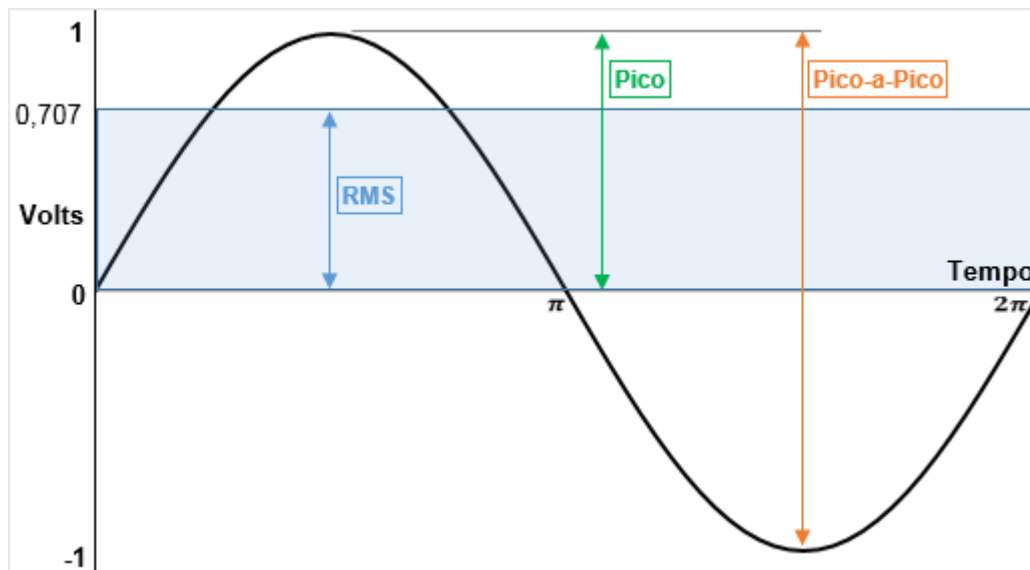


Figura 15 - Demonstração gráfica da relação de RMS, Pico e pico-a-pico

2.2.9 – Demodulação de sinais para detecção de defeitos em rolamentos

A análise espectral com recurso à FFT é a aproximação mais comum na detecção de falhas em rolamentos. No entanto, a análise direta do espectro do sinal é ineficaz, uma vez que não se obtêm picos significativos nas frequências de defeito. A explicação para esse facto é que as vibrações de alta frequência geradas pelos defeitos possuem uma intensidade relativamente reduzida, comparativamente com as amplitudes das componentes de baixa frequência (e altas energias), tais como desalinhamentos, folgas ou desequilíbrios [16].

O processo de demodulação, ou de análise *envelope*, consiste na eliminação das componentes de altas energias e baixas frequências, focando com maior precisão as frequências de defeitos dos rolamentos. É aplicado um filtro passa-alta, para remover as componentes de alta intensidade, que impedem a detecção das componentes de baixa amplitude. Após a aplicação do pré-filtro, o sinal passa por um retificador e um filtro passa-baixa, para extrair as envolventes das vibrações livres de alta frequência, geradas pelos rolamentos [17].

Essas frequências do sinal demodulado correspondem às repetições dos impactos que geram as vibrações livres de curta duração e alta frequência, tal como o caso de um rolamento de esferas e um defeito que terá ocorrido na pista externa. Por cada vez que uma esfera entrar em contacto com o defeito, irá gerar um impacto. Durante uma revolução completa do rolamento, que está diretamente relacionada com a velocidade de rotação do veio, um certo número de esferas irá entrar em contacto com o defeito, gerando o mesmo número de impactos.

Assumindo que a cada impacto (ou clique), que é gerado quando a esfera entra em contacto com o defeito, seja analogamente a tocar um sino com um martelo próprio, quando esse tocar do sino acontece, ocorrem dois fenómenos: a frequência do martelo ao bater no sino e o som proveniente do sino.

O som do sino é o resultado da sua ressonância, uma vibração de alta frequência e pode-se comparar à ressonância dos elementos do rolamento. O que se observa no espectro é o mesmo que se fosse o martelo a bater no sino.

No instante do impacto, a amplitude de vibração atinge um valor máximo, a partir do qual vai começar a decrescer até ocorrer o próximo impacto com a esfera seguinte. A esse fenómeno de variação da amplitude em função do tempo dá-se o nome de modulação. É necessário então realizar uma demodulação, que é o processo de retirar o tocar do sino, ou seja, a ressonância do rolamento, deixando assim visível no espectro do sinal *Envelope*, o impacto do rolamento com o defeito, e portanto a frequência que é multiplicada pela velocidade de rotação do veio.

Uma das principais técnicas de demodulação é a de energia de pico (*Spike Energy*), também denominada por espectro *gSE*. Que passa pelas seguintes etapas:

- Introdução de um filtro passa-alta, que remove as baixas frequências no sinal;
- Passa por um retificador, que permite o decaimento temporal para destacar o momento do impacto;

- Passa por um conversor analógico-digital que suaviza o sinal;
- É introduzido um filtro passa-baixa para remover o conteúdo das altas frequências;
- O sinal é por fim submetido a um detetor pico-a-pico que determina a frequência e a duração do impacto.

Este processo resulta em um pico no espectro e consequentes harmónicas que contenham as frequências do impacto. As amplitudes dos picos são denominadas por valores gSE, por não serem valores reais de aceleração [9].

2.3 – Sensores de vibrações – Acelerómetro

A captação de vibrações está dependente da utilização de sensores, que para o caso denominam-se por transdutores de vibrações mecânicas. O funcionamento básico dos transdutores passa pela conversão de sinais vibratórios mecânicos captados nas superfícies de contato com a máquina, em uma outra forma de energia, sinais elétricos. A resposta dada por estes sinais elétricos depende não só do transdutor utilizado, mas também do analisador de dados.

Dos mais variados transdutores, destaca-se um dos mais usados pela sua versatilidade, e consequentemente utilizado neste trabalho, o acelerómetro. O princípio de funcionamento do acelerómetro piezoelétrico baseia-se nas deformações dos cristais piezoelétricos no interior do transdutor, que gera um sinal elétrico proporcional à aceleração na superfície da máquina. Desta forma, o transdutor acompanha as vibrações transmitidas pela máquina devido a uma força de valor igual ao produto da aceleração com a massa sísmica. As principais vantagens do acelerómetro piezoelétrico são a robustez, a elevada sensibilidade e a alta gama de frequências com que pode operar [18].

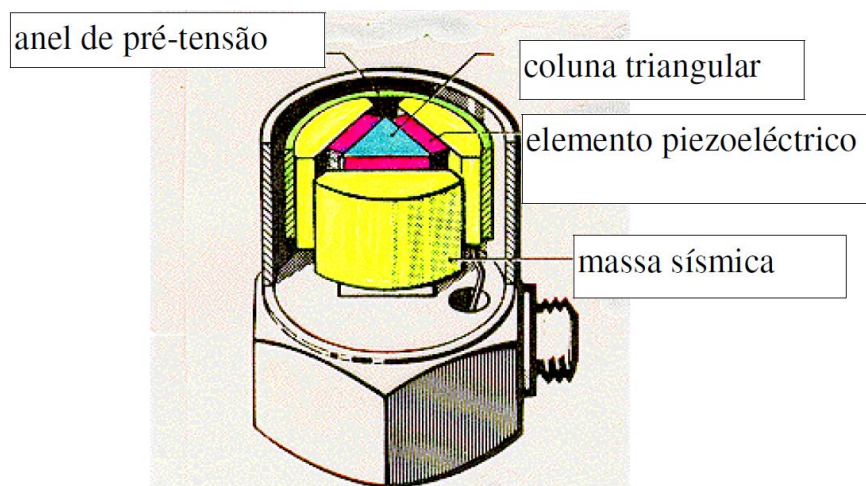


Figura 16 - Constituição de um acelerómetro piezoelétrico [19]

2.4 – Análise modal experimental

2.4.1 – Introdução à análise modal

A análise de vibrações pode ser realizada tendo em consideração duas categorias [11] [20]:

- **Vibração livre:** Uma vibração é considerada livre, se o sistema, após uma perturbação inicial que o coloca em movimento, continuar a vibrar por conta própria, sem a interação de forças externas. É a resposta natural da estrutura a um determinado impacto ou deslocamento, que se determina pelas propriedades da estrutura, através da análise modal;
- **Vibração forçada:** Uma vibração forçada acontece quando é exercida, no sistema vibratório, uma força externa que permita o movimento contínuo, ou controlado. É a resposta da estrutura a essa repetição de forças que provoca a vibração a uma determinada frequência de excitação. Determina-se relacionando (através das propriedades da estrutura), a amplitude da força aplicada, com o nível de vibração gerado.

A análise modal é o processo de descrição e estudo de uma estrutura mecânica em termos das suas características naturais, ou das suas propriedades dinâmicas, tais como a frequência, o amortecimento, e os modos de vibração [21].

Nesta análise aplica-se a função de resposta em frequência, FRF (*Frequency Response Function*), que é simplesmente a relação da resposta da estrutura em função da força aplicada, ou excitação.

$$FRF = \frac{\text{resposta}}{\text{excitação}} = \frac{\text{movimento}}{\text{força}} \quad (2.6)$$

Existem três tipos básicos de FRFs, de acordo com o tipo de parâmetro de resposta, quer seja de deslocamento, velocidade ou aceleração.

Neste trabalho é abordado apenas um dos parâmetros de descrição da estrutura, as frequências naturais, como sendo a frequência à qual a estrutura vibra quando sujeita à vibração livre. Cada sistema diferente tem as suas características, e portanto as suas frequências naturais, que são tantas quanto os graus de liberdade o sistema tiver.

Considere-se o caso simples de um grau de liberdade de um sistema de massa, mola e amortecedor, da figura 17.

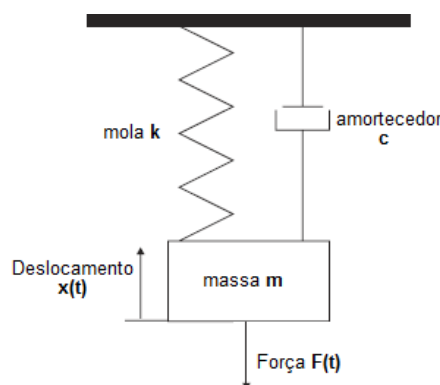


Figura 17 - Sistema de um grau de liberdade de massa, mola e amortecedor

Este sistema é definido pela seguinte equação de movimento:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.7)$$

Sendo que a frequência natural define-se da seguinte forma:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.8)$$

E a relação que define o fenómeno de ressonância:

$$r = \frac{\omega_f}{\omega_n} \quad (2.9)$$

Ou seja, quando uma certa frequência de funcionamento de uma excitação exercida, na forma de vibração forçada, coincide, ou aproxima-se de uma das frequências naturais do sistema, ocorre o fenómeno de ressonância. Este fenómeno é responsável pela amplificação dos níveis de vibração, resultado de incorretas configurações do sistema, como a massa, rigidez ou amortecimento [22].

A FRF pode ser representada de várias maneiras, sendo a mais básica a representação gráfica da parte real e parte imaginária. No entanto, a mais usual e simples, é em coordenadas polares, contendo magnitude e fase, ambos em relação à frequência. Na figura 18, ilustra-se uma curva FRF em magnitude para o caso simples do sistema de massa, mola e amortecedor (figura 17). Uma vez que o sistema representado só tem um grau de liberdade, surge apenas uma frequência natural, ou um modo de vibração.

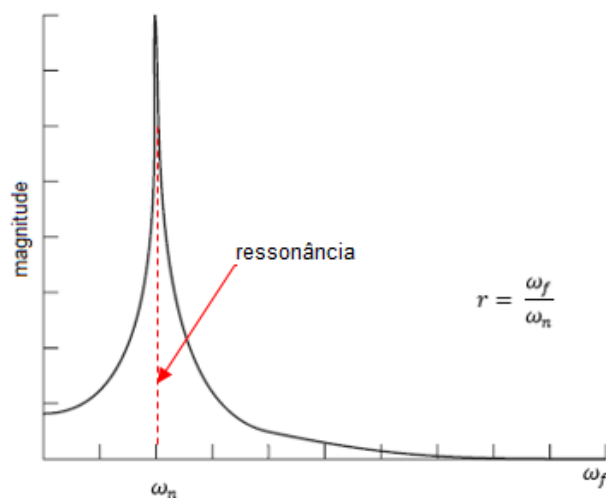


Figura 18 - FRF em magnitude em coordenadas polares para um sistema de 1 grau de liberdade

2.4.2 – Ensaio de impacto como método de detecção de frequências naturais

Uma das técnicas mais rápidas e simples de aplicar na análise modal experimental para provocar excitações de vibrações num mecanismo é o teste de impacto com martelo. É uma técnica que requer pouco equipamento, necessitando apenas de um martelo de impacto, com um cabo com capacidade de ligação a uma placa dados, para ser utilizado no ponto de excitação, um acelerómetro para colocar no ponto de resposta, podendo ser um simples acelerómetro uniaxial, e um programa que seja capaz de tratar os dados que são fornecidos [23].

Permite tempos de medição bastante curtos e práticos, e não necessita de uma preparação especial dos mecanismos a serem ensaiados, contudo a obtenção de resultados consistentes não é usual, e um dos principais fatores para essa irregularidade é a direção e o ponto de impacto, não ser completamente controlável utilizando o martelo, pois é o utilizador humano que gere esses mesmos impactos.

Sendo que o impulso gerado é uma força, o nível de amplitude da energia aplicada à estrutura mecânica é uma função que depende da massa do martelo, e da velocidade com que é provocada essa força, que não é tão facilmente controlável. Assim, juntamente com o próprio martelo, vem uma série de cabeças de diferentes gamas (corpos com diferentes massas colocados na parte de trás do martelo, de acordo com a aplicação) e também uma série de ponteiros, com rigidez variável.

Este controlo vai depender da estrutura que se está a estudar. Geralmente para mecanismos mais rígidos e com maior capacidade, utiliza-se uma ponteira mais rígida, podendo acrescentar também as massas ao martelo, se necessário, caso contrário, a ponteira de borracha mais suave pode ser o suficiente. Na figura 19 (à esquerda) observa-se o gráfico da duração do impulso gerado de acordo com vários tipos de ponteiros, constatando que quanto mais rígida a ponta for, menor a duração do impulso, ampliando assim o conteúdo em frequência.

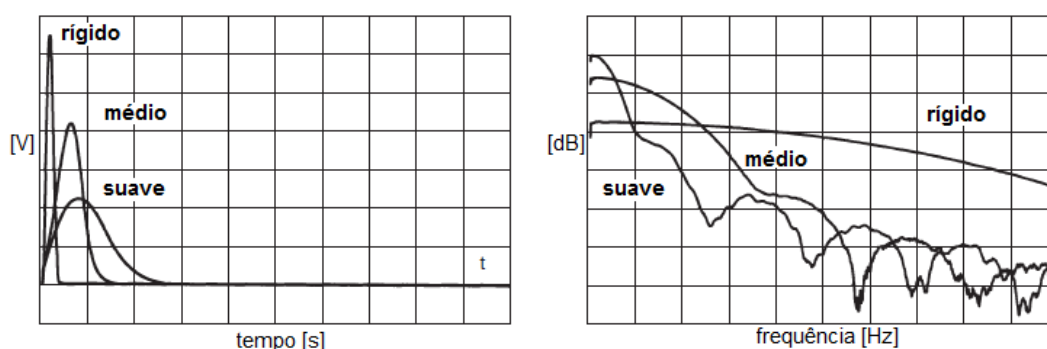


Figura 19 - Efeito da rigidez da ponteira no impulso gerado em função do tempo (esquerda) e em função da frequência em decibéis (direita) [24]

O ruído é um dos grandes problemas do teste de impacto do martelo no processamento de sinais, tanto pode estar presente na força aplicada como na resposta do sinal. Um outro contratempo é a perda de informação, resultando na inconsistência da resposta, consequência do curto tempo de medição, compensando o teste com a implementação de efeitos de janela, tal como acontece no caso dos espectros [24].

2.5 – Bomba centrífuga

Uma bomba mecânica define-se como sendo um sistema que transmite energia cinética e potencial, proveniente de uma fonte externa, a um fluido por forma a provocar a sua descarga para um outro sistema [25].

As bombas classificam-se em duas principais categorias:

- **Bombas dinâmicas, ou cinéticas** – Funcionam transmitindo uma certa pressão e velocidade ao fluído à medida que atravessa o impulsor, e conseqüentemente, converte parte dessa velocidade em pressão complementar. A energia é continuamente aplicada para aumentar a velocidade do fluído para níveis superiores aos que ocorrem na descarga, de tal forma que, posteriores reduções de velocidade possam aumentar a pressão. Dentro desta categoria existem as bombas centrífugas, bombas de turbina ou de jato;
- **Bombas volumétricas** – O elemento móvel provoca o deslocamento do fluido a partir da caixa da bomba, aumentando a pressão do fluído. A energia é aplicada periodicamente, na forma de uma força, aos elementos móveis inseridos em caixas que contenham o fluido, resultando em níveis de pressão suficientemente elevados para movimentar o fluido para a zona de descarga. Bombas recíprocas (de movimento alternado) e rotativas são exemplo deste tipo.

Neste trabalho será dado foco às bombas centrífugas, utilizadas em maioria dos casos, e como tal, as que serão objeto de estudo.

As bombas centrífugas dividem-se em três subtipos:

- **Bomba de fluxo Radial** – Tiram máximo proveito das altas pressões, com fluxo baixo que acelera o fluido através das pás do impulsor que se encontra perpendicular ao eixo do veio;
- **Bomba de fluxo Axial** – Bombas de alto fluxo, baixas pressões, que elevam o fluído paralelamente ao eixo do impulsor;
- **Bomba de fluxo misto** – Aproveita algumas características dos dois anteriores, com fluxo e pressões médias. O fluido é empurrado para a zona de descarga com um ângulo maior que 90°.

Em casos em que a tubagem de aspiração não esteja sujeita a pressão positiva, em carga, é necessário ferrar a bomba, antes de ser por em funcionamento. Este processo passa por encher e preencher os espaços vazios na corpo da bomba com o fluido a ser utilizado na sua normal aplicação, por forma a extrair todo o ar contido.

Uma bomba centrífuga consiste num conjunto de pás rotativas, encaixadas num corpo, que pode ser em espiral, denominada por voluta (figura 20). As pás rotativas são responsáveis por transmitir energia ao fluido através do fenómeno da força centrífuga, descarregando o fluido periféricamente a velocidades elevadas, em que parte dessas velocidades convertem-se em pressões altas devido ao formato em voluta do corpo da bomba. Basicamente constitui duas partes principais: um conjunto de elementos rotativos, que inclui o impulsor e o veio; e o elemento fixo, constituído pelo corpo, difusores, caixa de vedação (isoladores e retentores) e rolamentos.

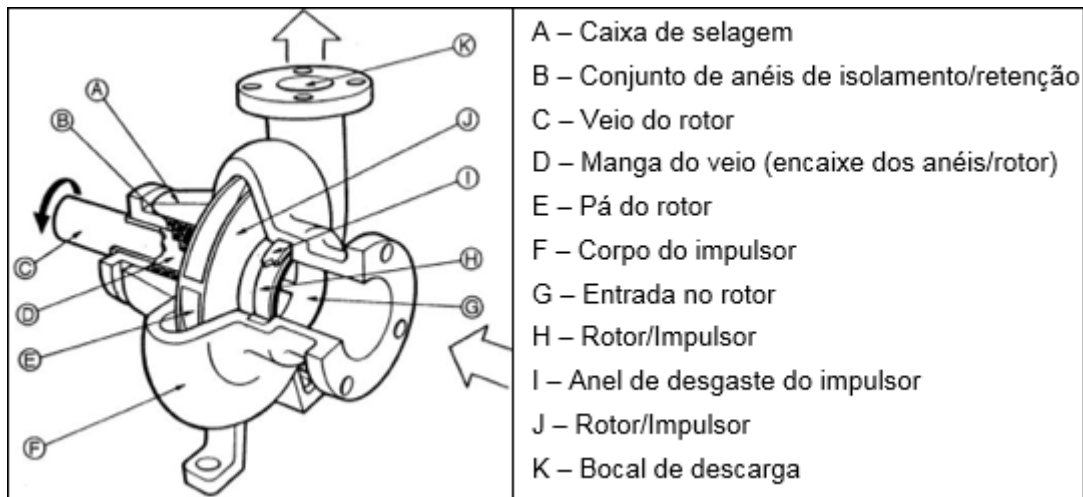


Figura 20 - Descrição de uma bomba centrífuga e respetiva legenda [26]

- **Corpo**

O corpo da bomba centrífuga apresenta em muitos dos casos um formato em espiral, a que se dá o nome de voluta. Este formato caracteriza-se por um aumento gradual do volume disponível para o fluido circular no interior, por forma a acompanhar o aumento de pressão do fluido, ajudando também a imprimir uma velocidade crescente que permite ao fluido sair pelo bocal de descarga com velocidade e pressão suficiente para distribuir para os destinos previstos.

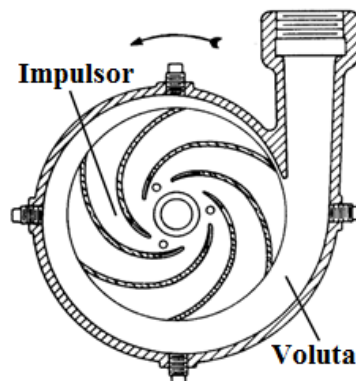


Figura 21 - Corpo de uma bomba centrífuga vista em corte [27]

- **Impulsor**

Os impulsores são projetados de acordo com a aplicação pretendida, e como tal, dividem-se em três tipos principais:

- **Impulsor aberto** – É o mais simples, é uma série de pás ligadas a uma base, sem paredes. Mais propício a desgaste do material, por ser adequado a fluidos com uma maior viscosidade e devido a eventuais sólidos em suspensão;
- **Impulsor semiaberto** – Este tipo de rotor incorpora no prato do impulsor umas pequenas coberturas ou saliências de um dos lados. Utilizado para fluidos ligeiramente viscosos ou com sólidos em suspensão;
- **Impulsor fechado** – É o género de impulsor mais utilizado e comum em bombas que seguem a norma ISO. Possuem dois pratos, que fecham as pás dos dois lados. É o impulsor mais eficiente e é utilizado para fluidos menos viscosos.

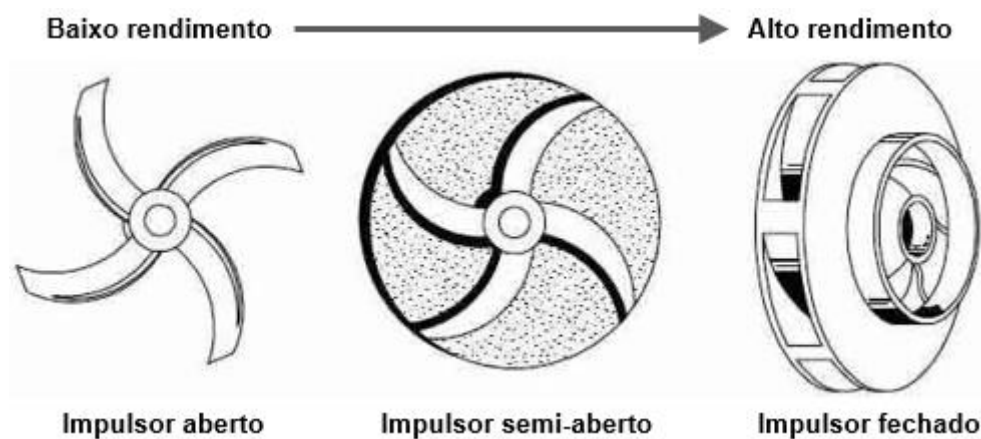


Figura 22 - Tipos de impulsores [28]

2.6 – Defeitos típicos de bombas centrífugas detetados por análise de vibrações

As origens das vibrações em bombas centrífugas podem ser categorizadas em três tipos [29]:

- **Causas mecânicas** – Associadas a desequilíbrios ou desalinhamento dos elementos rotativos, impulsores ou veios danificados, fundações mal concebidas ou rolamentos gripados;
- **Causas hidráulicas** – Como seja a cavitação, funcionamento da bomba abaixo da melhor eficiência ou recirculação interna;
- **Causas periféricas** – Tais como vibrações harmônicas de equipamentos adjacentes, funcionamento das bombas a velocidades máximas excessivas ou cedências temporárias dos materiais de isolamento.

2.6.1 – Vibração de passagem de pás do impulsor

As vibrações resultantes da passagem das pás do impulsor por uma localização, geralmente não é sinal de gravidade se atuarem isoladamente, pois trata-se da normal vibração de um elemento, apesar de gerar ruído. Pode no entanto significar problemas nos rolamentos ou desgaste dos componentes.

A frequência de passagem das pás, BPF (*Blade pass frequency*), é determinada multiplicando o número de pás do impulsor pela velocidade de rotação.

Este problema pode ter origem no espaço existente entre a extremidade do impulsor e a folga da carcaça da bomba. Caso essa abertura não esteja entre o recomendado, o espectro de frequências mostra a BPF com amplitude elevada, bem como harmônicas. A presença de turbulência provoca alterações nessa distância, e pode gerar vibrações no veio do rotor devido a essas diferenças de pressões dinâmicas. Outros problemas como a falha dos anéis de isolamento ou falhas na soldadura dos difusores no impulsor (quando existem) também causam uma BPF elevada.

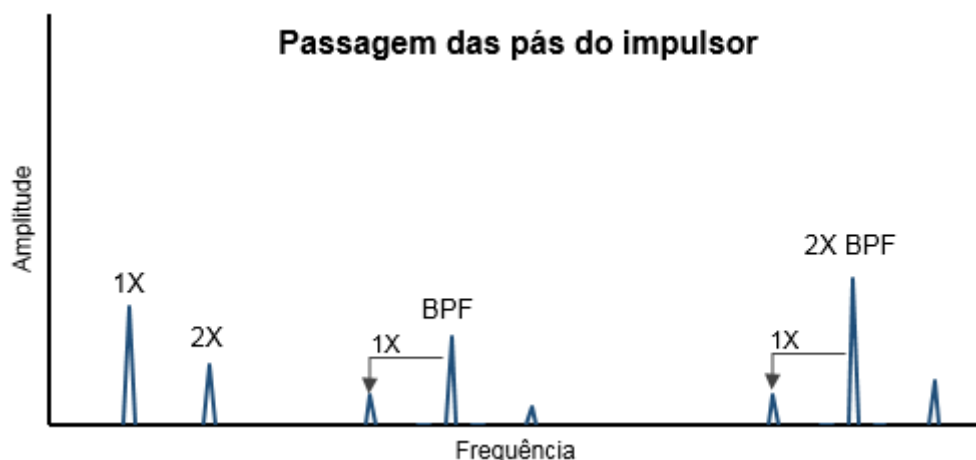


Figura 23 – Espectro FFT de um defeito de passagem das pás do impulsor [9]

2.6.2 – Desequilíbrio do impulsor

O desequilíbrio do rotor, e as vibrações que daí resultam, é talvez o defeito mais comum em todo o tipo de equipamentos, a sua deteção é relativamente fácil e pode ser descoberto precocemente.

O desequilíbrio define-se como a condição, que existe em um rotor em vibração, de transmitir forças ou movimentos aos rolamentos, resultante das forças centrífugas, ou como uma distribuição desigual da massa sobre o seu eixo de rotação [9].

Considera-se o eixo do centro de massa, ou de rotação, e o eixo do centro geométrico. Numa situação em que os dois eixos são exatamente coincidentes, define-se o sistema como estando equilibrado. Quando tal não acontece, caracterizam-se três tipos de desequilíbrios, baseados na relação entre os dois eixos:

- **Desequilíbrio estático** – Os dois eixos são paralelos;
- **Desequilíbrio de momento** – Os dois eixos intercetam-se no centro de massa do rotor;
- **Desequilíbrio dinâmico** – Os dois eixos não são paralelos nem se intercetam no centro.

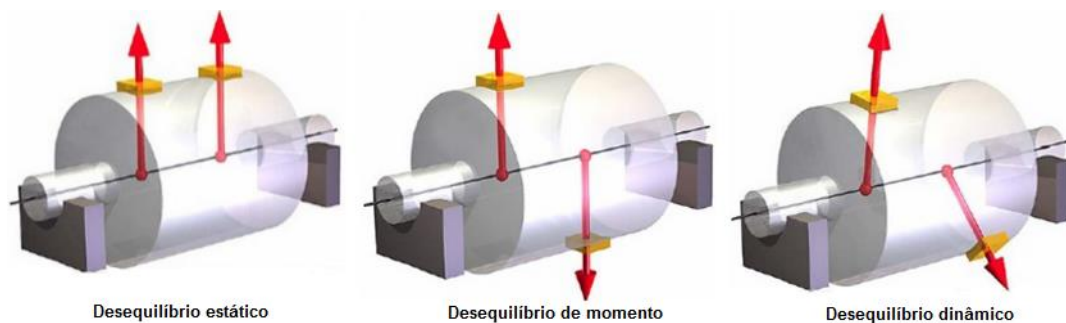


Figura 24 - Tipos de desequilíbrios e as relações entre os eixos [30]

Para todos os tipos de desequilíbrios, o espectro FFT coincide com a frequência de rotação do eixo, ou seja, uma frequência predominante em $1 \times rpm$, com amplitude que varia proporcionalmente com o quadrado da velocidade de rotação. As vibrações podem-se notar axial e radialmente.



Figura 25 - Espectro FFT de um defeito de desequilíbrio [9]

2.6.3 – Desalinhamento

O desalinhamento é um problema muito comum que ocorre entre as bombas e os motores, e de fácil resolução. Existem dois tipos de desalinhamento que merecem destaque:

- **Desalinhamento angular** – Acontece quando os eixos dos veios do motor e da bomba se interceptam ou encontram a um determinado ângulo. Numa situação de desalinhamento angular puro, o espectro FFT mostraria uma predominante frequência axial em $1 \times rpm$, mas como tal pureza não acontece, tipicamente observa-se no espectro, picos de frequências nas 3 primeiras ordens de rotação do veio, $1 \times$, $2 \times$ e $3 \times$, mas com a primeira ordem acentuada;



Figura 26 - Esquema de um desalinhamento angular [31]

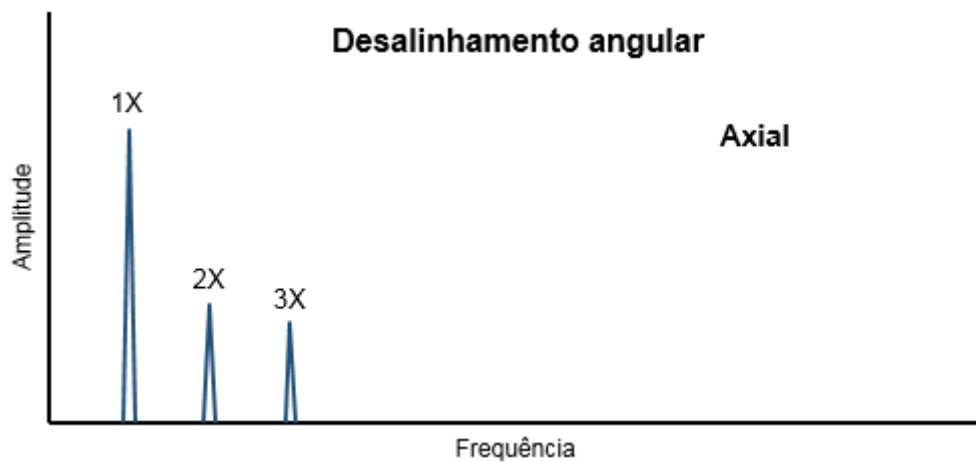


Figura 27 - Espectro FFT de um defeito de desalinhamento angular [9]

- **Desalinhamento paralelo** – Acontece quando os eixos dos veios do motor e da bomba são paralelos e têm um *offset* entre eles. Apresenta sintomas semelhantes ao angular, mas as vibrações são mais notáveis radialmente e na segunda ordem, $2 \times rpm$. Como não existe um desalinhamento puro, o espectro de frequências mostrará uma maior amplitude em $2 \times rpm$ mas também em $1 \times rpm$ e $3 \times rpm$, ainda que menos significativo.

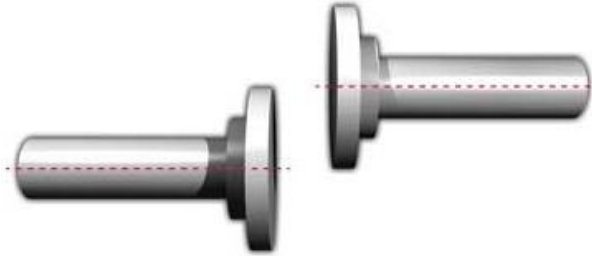


Figura 28 - Esquema de um desalinhamento paralelo [31]

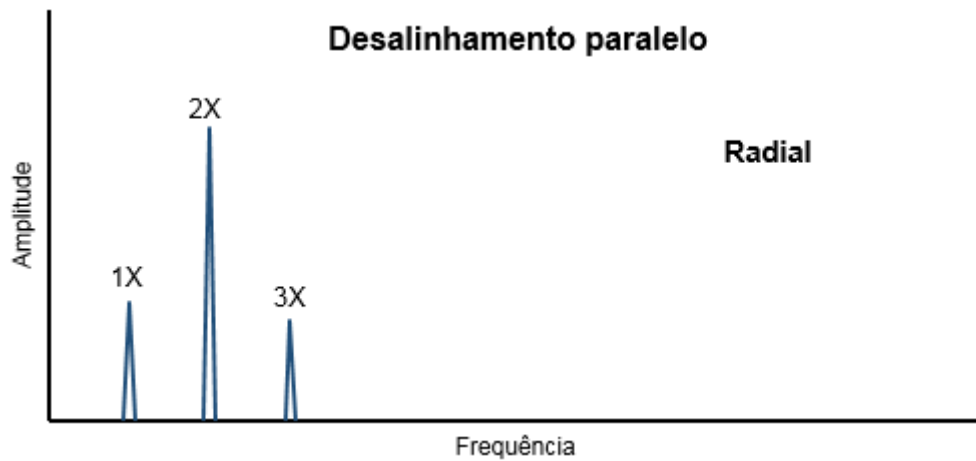


Figura 29 - Espectro FFT de um defeito de desalinhamento paralelo [9]

Também é comum ocorrerem problemas de desalinhamento de rolamentos com os veios, principalmente devido a montagem defeituosa, como se mostra na figura 30. Estes problemas causam o deterioramento do rolamento, que gera vibrações axiais consideráveis, visíveis no espectro FFT nas três primeiras ordens de rotação. A pista interna que está em contacto com o veio acaba por acamar no veio, sendo necessário a substituição do rolamento.

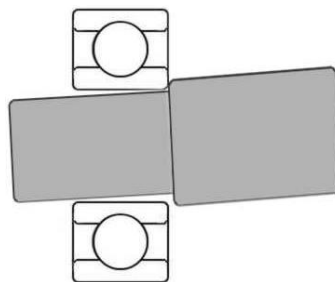


Figura 30 - Desalinhamento em rolamentos [32]

2.6.4 – Empeno no veio

O veio empenado acontece quando o seu eixo passa a apresentar uma curvatura. As vibrações serão notadas na direção axial e radial, com maior intensidade na direção axial. O espectro de frequências mostrará normalmente frequências em $1 \times rpm$ e $2 \times rpm$, com predominância na primeira ordem de frequência, se a curvatura for mais próxima da zona central do veio, caso contrário, a amplitude em $2 \times rpm$ será dominante.

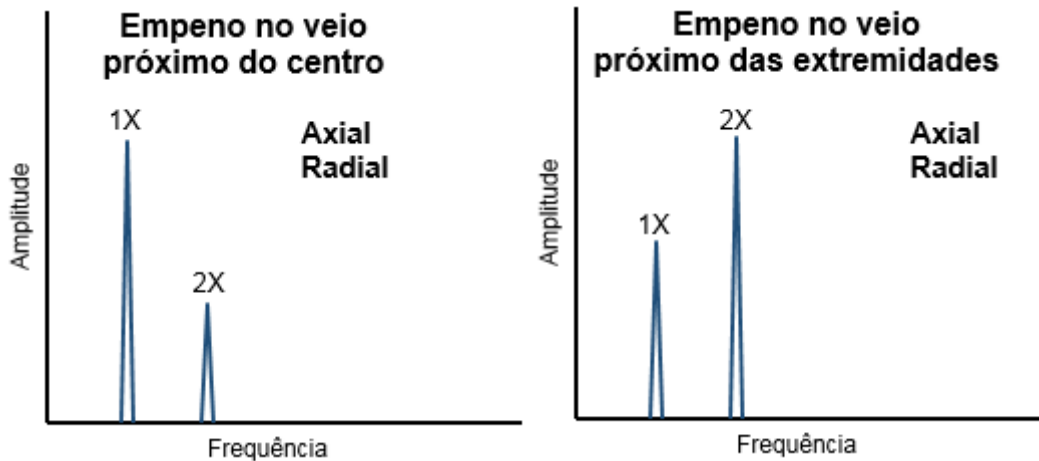


Figura 31 - Espectro FFT de um defeito de empeno no veio consoante a localização da deformação [9]

2.6.5 – Elementos mecânicos soltos

O problema de excessivas folgas entre componentes mecânicos pode ocorrer em três situações:

- **Folgas internas relacionadas com tolerâncias** – Pode ocorrer entre um impulsor e o veio da bomba, ou entre um rolamento e o veio. Deve-se a ajustamentos incorretos, produzindo um espectro FFT irregular preenchido com harmónicas maioritariamente na direção radial, dependendo da posição do impulsor no veio. Pode também gerar múltiplas sub-harmónicas;

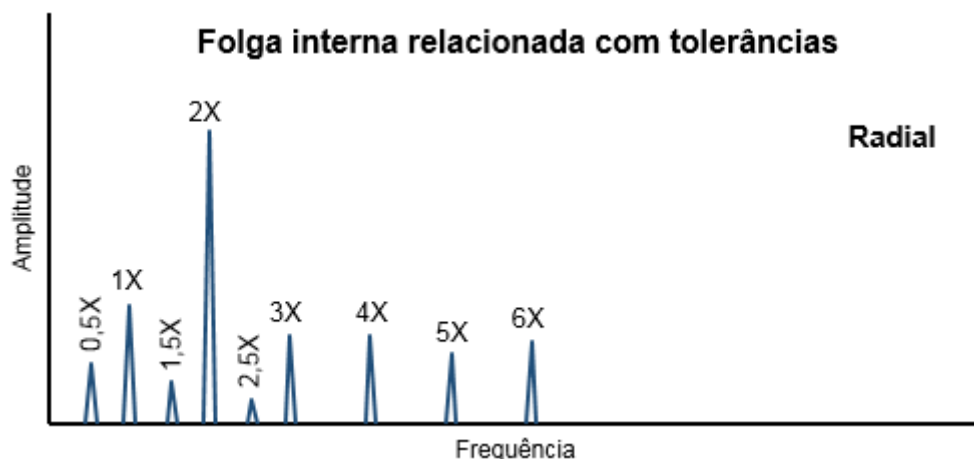


Figura 32 - Espectro FFT de um defeito de folga interna relacionada com tolerâncias [9]

- **Na interface entre a máquina e a fundação** – Associado a apertos defeituosos dos parafusos que fixam a máquina à sua fundação, causando problemas na estrutura ou nos rolamentos. É gerado um espectro com múltiplas harmônicas com amplitudes elevadas devido ao impacto dos parafusos;

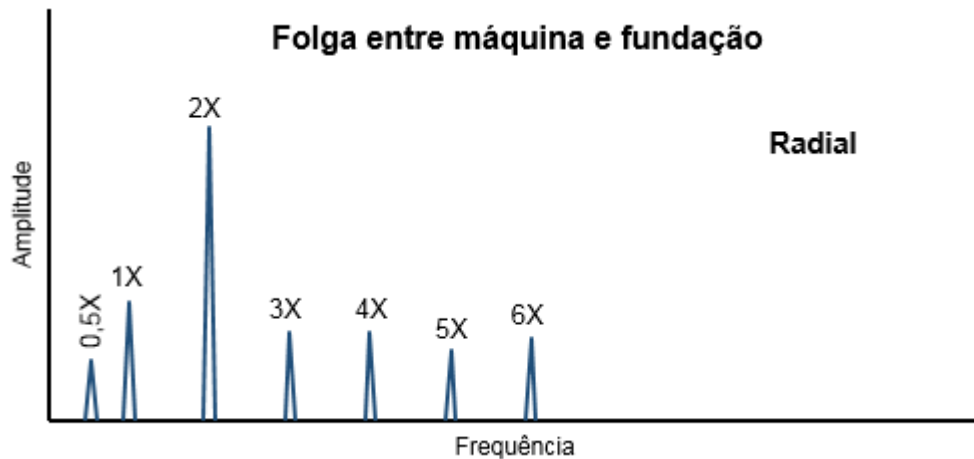


Figura 33 - Espectro FFT de um defeito de folga entre a máquina e a sua fundação [9]

- **A nível estrutural** – Relacionado com folgas estruturais ou enfraquecimento da fundação, consequência dos apertos dos parafusos ou da qualidade do betão, causando a sua deformação, fenómeno denominado por “*soft foot*”. Medições feitas em cada apoio da fundação mostrará um espectro em $1 \times rpm$.

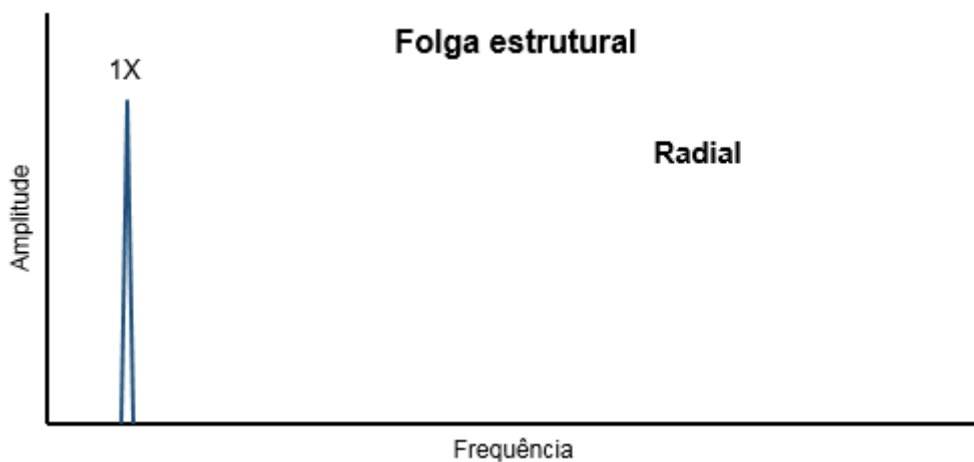


Figura 34 - Espectro FFT de um defeito de folga estrutural [9]

2.6.6 – Cavitação

A cavitação ocorre quando gases sob pressão dissolvem-se no fluido. Quando essa alta pressão é reduzida drasticamente, para valores próximos dos valores de tensão de vapor do fluido, surgem então bolhas causadas pela vaporização do fluido. À medida que essas bolhas passam pelo impulsor, aumenta novamente a pressão, provocando a implosão entre elas, que têm potencial energético suficiente, na forma de impactos, para perturbar o funcionamento da bomba e causar danos aos componentes internos, principalmente erosão gradual do impulsor [9].

Cada implosão gera um impacto, o que resulta num espectro com zonas aleatórias a altas frequências. A detecção da cavitação é feita medindo diretamente no corpo da bomba ou ainda na tubagem de sucção (entrada), e não na zona dos rolamentos, como se faz para a detecção dos outros problemas [29].

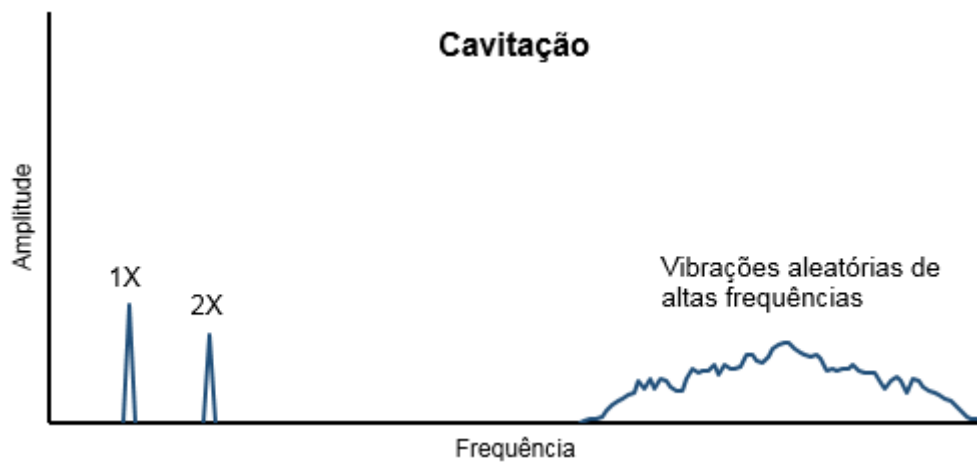


Figura 35 - Espectro FFT de um defeito de cavitação [9]

2.6.7 – Rolamentos

Um rolamento é projetado para reduzir a fricção entre elementos mecânicos com movimentos rotativos. Existem quatro tipos de rolamentos principais: de deslizamento; de esferas; de rolos; e rolamentos axiais. Encontram-se em praticamente todo o tipo de equipamento, e têm grande influência no funcionamento e rendimento de uma máquina. Em instalações de bombas centrífugas, os rolamentos são projetados para suportar cargas hidráulicas sobre o impulsor e veio da bomba, responsáveis por manter a integridade do sistema.

A constituição de um rolamento consiste em dois anéis, ou pistas. Uma pista interna, onde será encaixado o veio, e uma pista externa, que será colocada sobre a carcaça da bomba. Entre as duas pistas está um conjunto de esferas ou rolos, que podem rodar livremente dentro da pista, guiadas por uma gaiola (figura 36).

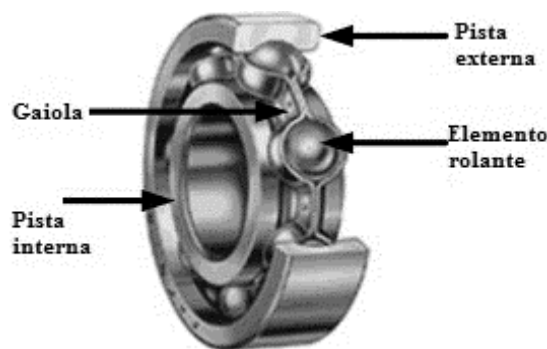


Figura 36 - Exemplo de um rolamento de esferas com descrição dos componentes [33]

Grande parte dos problemas em rolamentos iniciam-se pela fadiga do material, através de pequenas fissuras localizadas na superfície interna das pistas (que está em contacto dos os elementos rolantes). Esse defeito é propagado até à superfície, gerando ruído e níveis de vibração elevados [34].

Parte dos rolamentos falham prematuramente devido a vários fatores [35]:

- **Ambientais** – Danos no transporte, no armazenamento ou contaminações externas;
- **De manutenção** – Permutabilidade, toleranciamento incorreto, incorreta instalação dos bocais de injeção de massa nos rolamentos, ou acabamentos superficiais deficientes;
- **Operacionais** – Temperaturas excessivas, lubrificação inadequada, carga ou velocidade excessiva, exposição a vibrações externas ou passagem de corrente elétrica nos rolamentos.

As frequências dos defeitos em rolamentos são calculadas por expressões matemáticas conhecidas, tendo em conta que um sinal vibratório emitido por um rolamento com defeito engloba frequências que se relacionam com a geometria do rolamento, a localização do defeito, a velocidade de rotação do anel interno ou externo, e outras velocidades relativas entre os elementos rolantes. Estas frequências,

quando aparecem no espectro, indicam realmente a existência de um defeito, não sendo frequências naturais dos rolamentos.

- **BPFI** – (*Ball Pass Frequency of the Inner Race*) – Frequência emitida por uma esfera ou rolo quando passa por um defeito superficial da pista interna;
- **BPFO** – (*Ball Pass Frequency of the Outer Race*) – Frequência emitida por uma esfera ou rolo quando passa por um defeito superficial da pista externa;
- **BSF** – (*Ball Spin Frequency*) – Frequência emitida por um defeito superficial na esfera ou rolo quando este entra em contacto com a pista interna ou externa;
- **FTF** – (*Fundamental Train Frequency*) – Frequência emitida por um defeito da gaiola.

Estas frequências são calculadas através das seguintes expressões já simplificadas [16]:

$$BPFI = \frac{N}{2}(f_i - f_e) \left[1 + \left(\frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$BPFO = \frac{N}{2}(f_i - f_e) \left[1 - \left(\frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$BSF = f_r = \frac{D_p}{2d}(f_i - f_e) \left[1 - \left(\frac{d \cos \theta}{D_p} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

$$FTF = f_g = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) + f_e \left(1 + \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right] \quad (2.13)$$

N – Número de esferas ou rolos

f_i – Frequência de rotação da pista interna

f_e – Frequência de rotação da pista externa

f_g – Frequência de rotação da gaiola

f_r – Frequência de rotação do rolo ou esfera

d – Diâmetro da esfera ou rolo

D_p – Diâmetro primitivo

θ – Ângulo de contacto

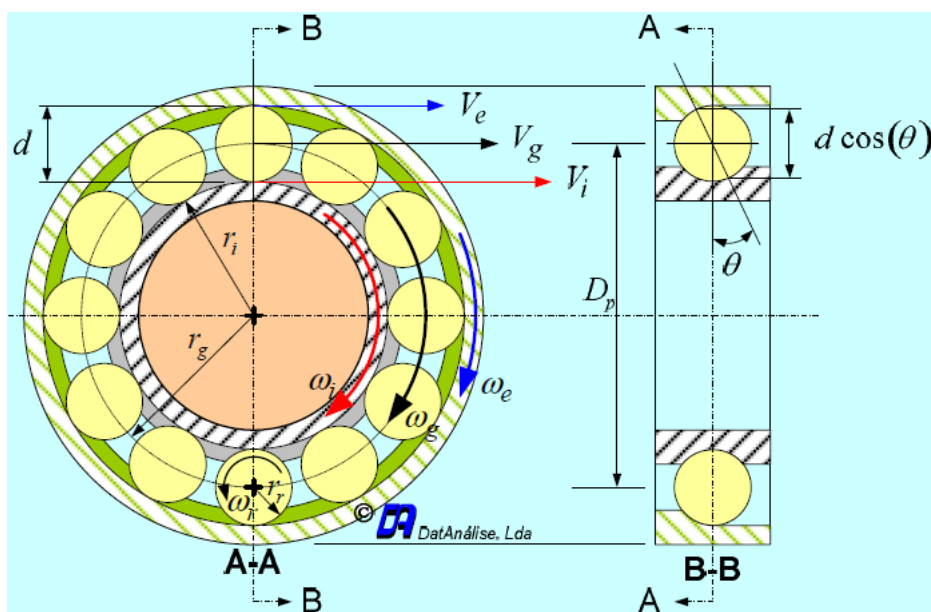


Figura 37 - Geometria de um rolamento [16]

Estágios de degradação de um rolamento –

O espectro FFT pode ser dividido em quatro zonas distintas, aquando da deteção de defeitos em rolamentos, descritas como:

- Zona A – Zona de frequências da máquina e harmónicas;
- Zona B – Zona de frequências de defeitos dos rolamentos (5-30 kcpm)
- Zona C – Zona de frequências naturais dos elementos do rolamento (30-120kcpm)
- Zona D – Zona de altas frequências (*HFD – High Frequency Detection*) (120kcpm a diante)

Seguem-se então os estágios de degradação de um rolamento:

- 1) No primeiro estágio, o rolamento não aparenta ter qualquer defeito visível, e a deteção só é possível através de métodos de HFD, tal como o gSE, pois as primeiras indicações de desgaste ocorrem em bandas de frequências aproximadamente entre 120-360 kcpm;
- 2) Nesta fase, começam a surgir falhas nas pistas, e os elementos rolantes ao passar nessas zonas geram frequência que predominam na banda entre 30-120kcpm. Também há a possibilidade de surgirem frequências de bandas laterais em torno das frequências naturais dos componentes do rolamento;
- 3) No terceiro estágio de degradação, já começam a ser visíveis os sinais de desgaste no rolamento. As falhas que haviam sido formadas durante o segundo estágio estão agora mais desenvolvidas e existem em maior número. As frequências e harmónicas são visíveis no espectro FFT, com a possibilidade de bandas laterais;
- 4) No último estágio, o rolamento deixa de ter condições de operação suficientes, pois as falhas são cada vez maiores, provocando um aumento em todas as frequências que já surgiam no espectro. Caso não sejam substituídos pode provocar danos severos aos outros elementos da bomba, devido à excessiva vibração e aumento de temperatura por fricção.

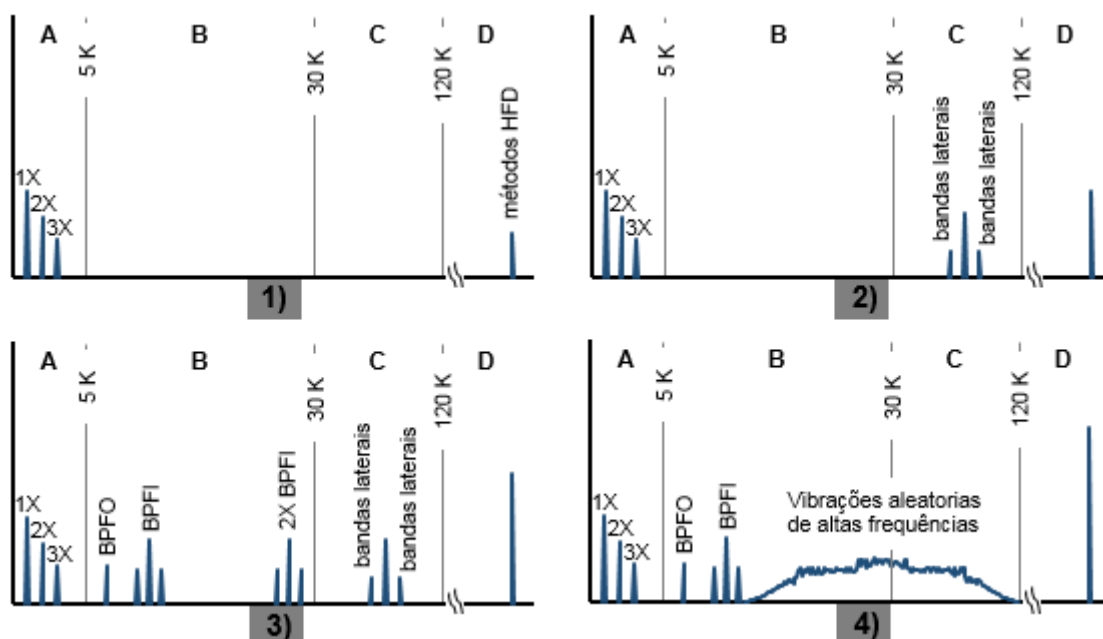


Figura 38 - Espectros FFT de um defeito dos diferentes estágios de degradação de um rolamento [9]

3. Caso de estudo experimental

O trabalho experimental incide sobre a medição e análise de vibrações num conjunto de eletrobombas da Estação Elevatória de Vale de Milhaços, situada na freguesia de Corroios, no Concelho do Seixal, mas pertencendo ao SMAS Almada. Tem-se como objetivo avaliar o comportamento a nível de vibrações de cada bomba, quer individualmente, quer em funcionamento com outras bombas, e interligar esses dados com os planos de manutenção existentes. Este grupo de bombas foi selecionado por pertencer a uma das principais estações elevatórias a fazer distribuição de água potável para a rede de águas de Almada. Tal análise de vibrações nunca tinha sido realizada nas instalações e pretende-se extrair conclusões sobre possíveis procedimentos a adotar no futuro.

3.1 – Descrição e características das eletrobombas

Neste trabalho foram estudadas cinco eletrobombas, cada uma é constituída por um motor elétrico trifásico, uma bomba centrífuga, um veio de ligação entre os dois e uma base especial dimensionada para a bomba, bem como todos os componentes e as secções de tubagem necessárias ao correto fluxo de água.

As eletrobombas estão agrupadas em dois conjuntos, denominados por grupo A e grupo B, que se distinguem por terem pré-reservatórios de origem e zonas de destino diferentes. Existe, no entanto, uma ligação entre os grupos para que possam existir compensações em caso de falhas ou necessidades extremas de uma das zonas de destino.

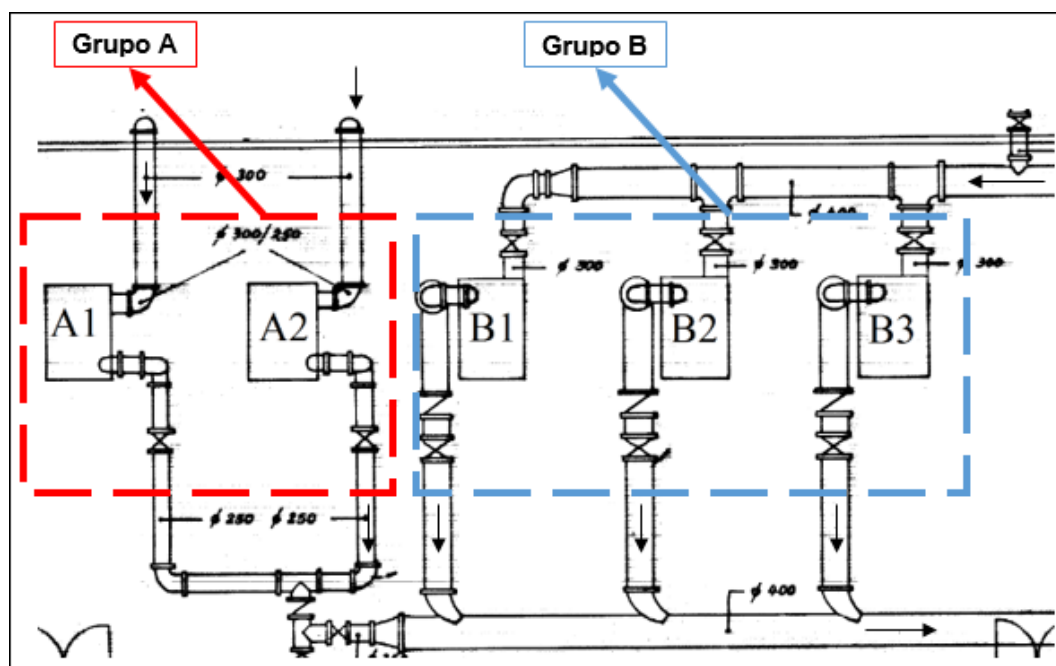


Figura 39 - Esquema da planta da Estação Elevatória de Vale de Milhaços

Uma das principais características que diferencia as eletrobombas dos dois grupos, é a existência de mangas de expansão nas eletrobombas do grupo B, tanto na secção de entrada como na secção de saída, como se pode observar no desenho em *Solidworks* do conjunto das eletrobombas da sala de máquinas (figura 40).

As mangas de expansão servem essencialmente para diminuir as vibrações geradas pelo normal funcionamento das eletrobombas, e assim evitar a propagação destas vibrações para as bombas adjacentes ou para a estrutura da sala de máquinas.

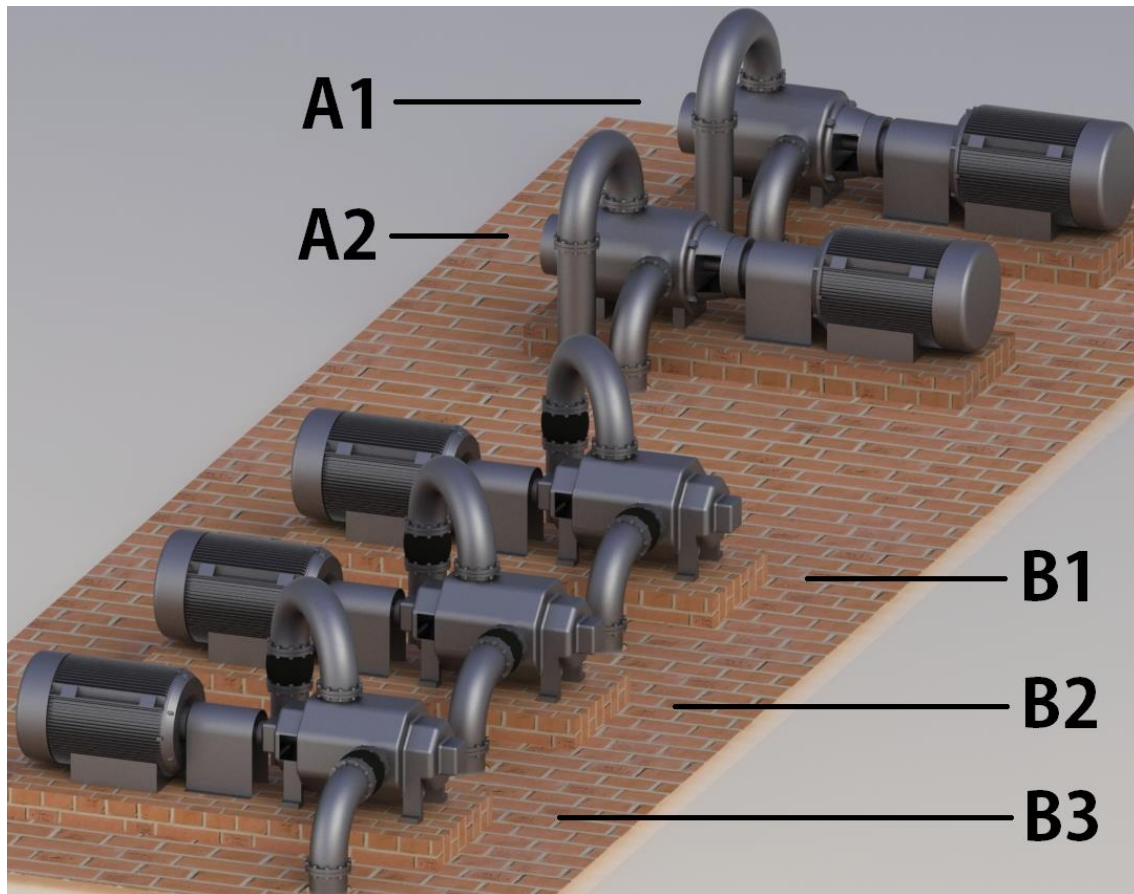


Figura 40 – Conjunto das eletrobombas da sala de máquinas. Desenhado em SolidWorks

Nas figuras 41 e 42, mostra-se uma fotografia da eletrobomba típica do grupo A e do grupo B, respetivamente, juntamente com a indicação da trajetória do fluido, desde a secção de entrada até à secção de saída.



Figura 41 - Fotografia de uma eletrobomba do grupo A, com trajetória da água



Figura 42 - Fotografia de uma eletrobomba do grupo B, com trajetória da água

A tabela 1 fornece as características das eletrobombas do grupo A, incluindo informação sobre os motores, bombas, rolamentos do motor e bomba, impulsores e mangas de expansão.

Tabela 1 - Características das eletrobombas do grupo A

	Eletrobomba A1	Eletrobomba A2
Motor		
Modelo	SIEMENS 1LA6 316-4AA60-Z 315L	SIEMENS 1LA6 316-4AA60-Z 315L
Potência [kW]	160	160
Rotação [rpm]	1486	1485
Voltagem [V Δ]	400	400
Frequência [Hz]	50	50
Amperagem [A]	275	275
Fator de potência [cos φ]	0,87	0,87
Rolamentos do motor		
Traseiro	6319C3	6319C3
Dianteiro (acoplamento)	6319C3	6319C3
Lubrificação rolamentos	massa lub. 1	massa lub. 1
Bomba		
Modelo	KSB MTC D 150/04-12.2-11.65	KSB MTC D 150/04-12.2 11.65
Secção de descarga [mm]	150	150
Caudal Q [m³/h]	288	306
Altura manómetro H [m]	130	130
Rotação [rpm]	1485	1485
Rolamentos da bomba		
Traseiro	6315/C3	6315/C3
Dianteiro (acoplamento)	2x 7315/BECBJ	2x 7315/BECBJ
Lubrificação rolamentos	massa lub. 1	massa lub. 1
Impulsores		
Tipo	Fechados	
Número de impulsores	4	
Composição	1 de aspiração com 5 pás 3 de compressão com 7 pás Difusor de 9 pás entre impulsores	
Mangas de Expansão		
Entrada da bomba	Não	
Saída da bomba	Não	

Na tabela 2, observa-se as características das eletrobombas do grupo B, com informação sobre os motores, bombas, rolamentos do motor e das bombas, e mangas de expansão. Falta contudo informações sobre o número de pás dos impulsores e difusores, porque não foi possível fazer essa identificação após entrar em contacto com um representante da marca.

Tabela 2 - Características das eletrobombas do grupo B

	Eletrobomba B1	Eletrobomba B2	Eletrobomba B3
Motor			
Modelo	SIEMENS 1LG4 318-4AA60 315L	SIEMENS 1LG4 318-4AA60 315L	SIEMENS 1LG4 318-4AA60 315L
Potência [kW]	250	250	250
Rotação [rpm]	1488	1488	1488
Voltagem [V Δ]	400	400	400
Frequência [Hz]	50	50	50
Amperagem [A]	430	430	430
Fator de potência [cos φ]	0,87	0,87	0,87
Rolamentos do motor			
Traseiro	6319C3	6319C3	6319C3
Dianteiro (acoplamento)	6319C3	6319C3	6319C3
Lubrificação rolamentos	massa lub. 1	massa lub. 2	massa lub. 1
Bomba			
Modelo	Flowserve 202 NM 2L	Flowserve 202 NM 2L	Flowserve 202 NM 2L
Secção de descarga [mm]	200	200	200
Caudal Q [m³/h]	550	550	550
Altura manómetro H [m]	108	108	108
Rotação [rpm]	1485	1485	1485
Rolamentos da bomba			
Traseiro	2x 7219 BE	2x 7219 BE	2x 7219 BE
Dianteiro (acoplamento)	NU219 EC	NU219 EC	NU219 EC
Lubrificação rolamentos	massa lub.1	massa lub. 2	massa lub. 1
Impulsores			
Tipo	Fechados		
Número de impulsores	2		
Composição	(Informação em falta)		
Mangas de Expansão			
Entrada da bomba	Sim		
Saída da bomba	Sim		

3.2 – Equipamento coletor de dados

Por forma a poder realizar os ensaios e a análise dos resultados que se obtêm, é necessário a utilização de um equipamento que seja capaz de medir e armazenar os valores da vibração nas instalações. A recolha de dados de vibrações foi feita recorrendo ao programa de análise do coletor de dados, implicando que todas as configurações importantes são alteradas e definidas no próprio programa, e então transferidas as listas para o analisador, sendo no entanto possível fazer alterações no menu de configuração do instrumento.

3.2.1 – O aparelho – Enpac 2500

O aparelho utilizado neste trabalho é um coletor de dados portátil, da *Allen-Bradley*, Enpac 2500. Possui dois canais, servindo-se do método de análise FFT (*Fast Fourier Transform*) em tempo real, concebido para a aplicação da manutenção preventiva condicionada, mas também para diagnósticos em máquinas através da análise de vibrações e de ruído. Tem capacidade de efetuar medições, processar e exibir em tempo real uma variedade de funções, armazenando toda a informação captada na memória disponível. Opera como um coletor de dados independente, fazendo uso das funções que nele se dispõe, ou pode-se trabalhar em conjunto com o Software de análise, exclusivo do aparelho.



Figura 43 - Fotografia do Analisador portátil Enpac 2500

- **Configurações de medições no aparelho**

A possibilidade de alterações no aparelho tanto podem ser configurações gerais a qualquer recolha, ou também configurações exclusivas de medições fora de rotina. Uma definição importante a ter em conta no aparelho é o tipo de aquisição. Este tanto pode ser aquisição única (denominada por “*Single Shot*”), o que faz com que tudo o que é recolhido num determinado ponto, será feito apenas através de uma parcela aleatória de todo o tempo de exposição do acelerómetro à vibração. Este método tem o

inconveniente de que se existir algum problema no exato momento da parcela recolhida, toda a análise ao ponto pode induzir em erro.

Por outro lado, existe o tipo de aquisição contínua. Este procedimento permite uma obtenção mais alargada de dados, em que cada definição de medição terá a sua parcela de todo o tempo de exposição, e caso ocorra algum problema em uma parcela, esse erro só irá prejudicar a definição de medição correspondente, e não todas as outras incluídas em um determinado ponto.

3.2.2 – O programa de análise – EMONITOR Odyssey

O Enpac opera fazendo uso das funções que ele dispõe e tirando medições que não foram previamente planeadas, denominadas por medições fora de rotina, ou pode-se trabalhar através de listas estruturadas e configuradas.

O EMONITOR Odyssey é um programa exclusivo para os aparelhos Enpac, serve essencialmente para criar rotinas de manutenção ou de diagnóstico, e transferir os dados para o instrumento, ou no caminho inverso, após terem sido feitas as medições.

Com a combinação do programa com o aparelho, é possível criar listas de configurações de medições de acordo com o tipo de vibrações que a máquina pode estar sujeita, ou o tipo de análise que queremos realizar, permitindo saber mais sobre a condição geral da máquina ou algo específico numa certa banda de frequências. Também se pode acrescentar e gerir alarmes, nesse caso o aparelho emite um alerta quando uma medição excede o limite definido no alarme.

Além de outras funções mais específicas, a combinação permite captar valores globais de magnitudes, gráficos de variação no tempo e espectros de frequência, que são geralmente os mais utilizados na indústria.

No que diz respeito à análise dos dados, na fase após as medições, transfere-se a lista para o programa, e examina-se os gráficos, incidindo sobre as configurações de medições da lista em questão.

Dentro das opções dos gráficos, pode-se alterar o tipo de cursor, existindo cursor unitário, de harmónicas, de bandas laterais e disponibiliza também um cursor para a deteção das frequências de defeitos em rolamentos. Também se pode alterar as unidades (na mesma grandeza física), acrescentar notas e limites dos alarmes. Permite também uma vasta personalização visual do gráfico a nível de cores, tamanho da letra ou a informação que será visível na janela do gráfico.

Essa análise, no entanto, terá que ser feita individualmente para cada ponto de medição, não sendo possível, na versão disponível do programa, a sobreposição ou outra transformação de gráficos de pontos diferentes.

- **Configurações de medições no programa**

A configuração da recolha de dados tem uma enorme importância na análise de vibrações, pois os resultados esperados estão inteiramente dependentes dessa mesma configuração. Ao utilizar somente as configurações por defeito que o programa de análise dispõe, pode-se estar a perder muita informação, essencial para detetar alguns defeitos específicos.

No programa de análise a utilizar neste trabalho, EMONITOR Odyssey, ao criar uma nova configuração, surge a janela que se mostra na figura 44, que dispõe de todas as variáveis que podem ser geridas e que irão influenciar a qualidade da recolha de dados, bem como o tempo da amostragem. Cada configuração terá um nome indicativo para auxiliar a escolha.

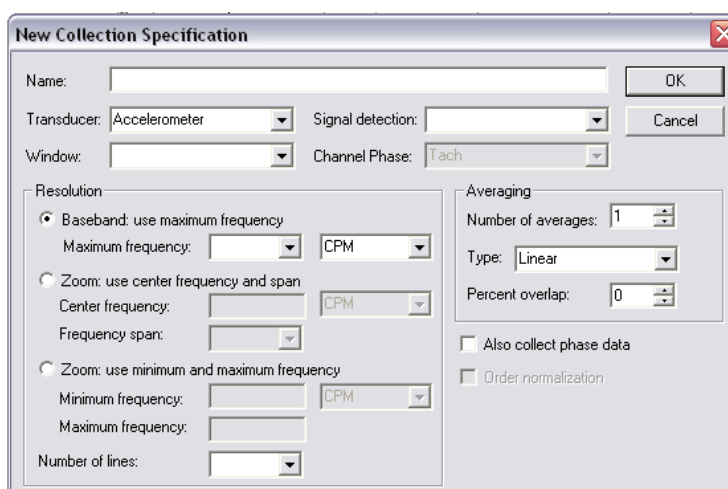


Figura 44 - Janela retirada do EMONITOR Odyssey, ao criar uma nova configuração de medição

As configurações dependem essencialmente dos resultados pretendidos para determinada medição. Como regra geral e para uma primeira análise, segue-se como base a informação da tabela 3 [36]. Estas configurações dependerão sempre de cada caso específico, servindo apenas para retirar uma informação mais geral ao equipamento a todos os níveis.

Tabela 3 - Configurações base para medições em velocidade e aceleração

Configurações	Objetivo e defeitos típicos
Velocidade – RMS Fmax: 0-15x RPM; LOR: 1600	Análise com melhor resolução das 15 primeiras ordens de vibração: desequilíbrio, desalinhamento, empeno no veio, frequência de pás do impulsor
Aceleração g's – Pico Fmax: 0-100x RPM; LOR: 800	Análise de maiores ordens de vibração e amplificação de altas frequências: cavitação, frequência de pás do impulsor, harmónicas
Aceleração g SE – Pico-a-Pico Fmax: 0-5x BPF; LOR: 800	Análise envelope, para deteção de defeitos em rolamentos através da aplicação de um filtro, geralmente 5kHz

3.2.3 – O Sensor – Acelerómetro

O acelerómetro utilizado neste trabalho é da marca Wilcoxon Research, modelo 786A (figura 45). Transdutor uniaxial simples e versátil para uma vasta gama de aplicações. Para auxiliar no contacto entre as superfícies da máquina e o acelerómetro, é roscado a este uma base magnética capaz de fixar o acelerómetro em qualquer área metálica plana, ou com pequenas curvaturas (com capacidade magnética) e qualquer que seja o posicionamento sem que este ceda às oscilações da máquina e do ambiente envolvente.



Figura 45 - Acelerómetro 786A da Wilcoxon Research, com a base magnética

O acelerómetro apresenta as seguintes características:

Tabela 4 - Características do acelerómetro 786A da Wilcoxon Research

Wilcoxon Research 786A		
Sensibilidade ($\pm 5\%$, 25°C) [mV/g]		100
Alcance da aceleração [g - peak]		80
Frequência de ressonância [Hz]		30
Sensibilidade transversal, Max.		5 % Axial
Resposta à temperatura		
- 25°C		-10%
+ 120°C		-10%
Gama de Frequência [Hz]		
Erro	$\pm 5\%$	3 a 5000
	$\pm 10\%$	1 a 9000
	$\pm 3\text{ dB}$	0,5 a 14 000

3.3 – Medições

3.3.1 – Sistema de eixos

Antes de qualquer definição de pontos de medições, é necessário adotar um sistema de eixos geral para todos os casos e que seja de fácil compreensão, apesar da disposição dos grupos A e B serem diferentes, as direções dos eixos serão as mesmas. Este sistema de coordenadas cartesiano é composto por 3 eixos ortogonais, definidos por X, Y e Z, e todas as medições são realizadas nessa mesma ordem.

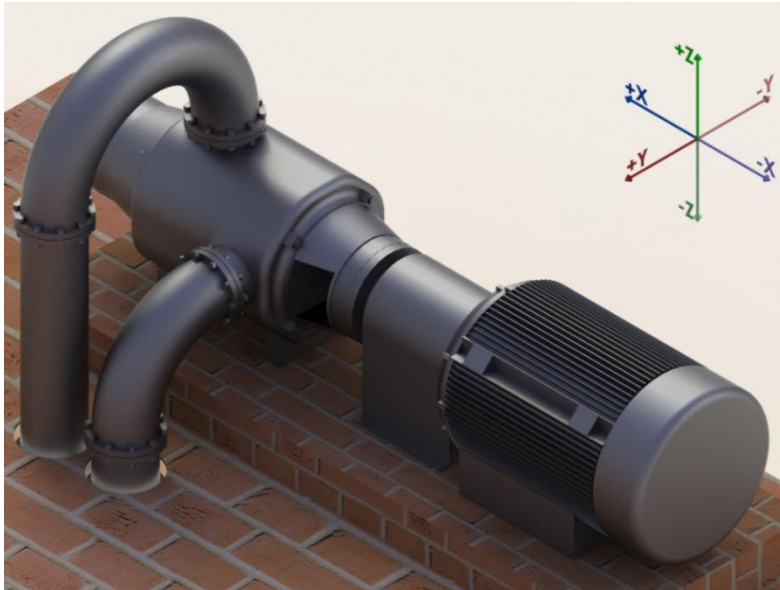


Figura 46 - Grupo A - Sistema de Coordenadas

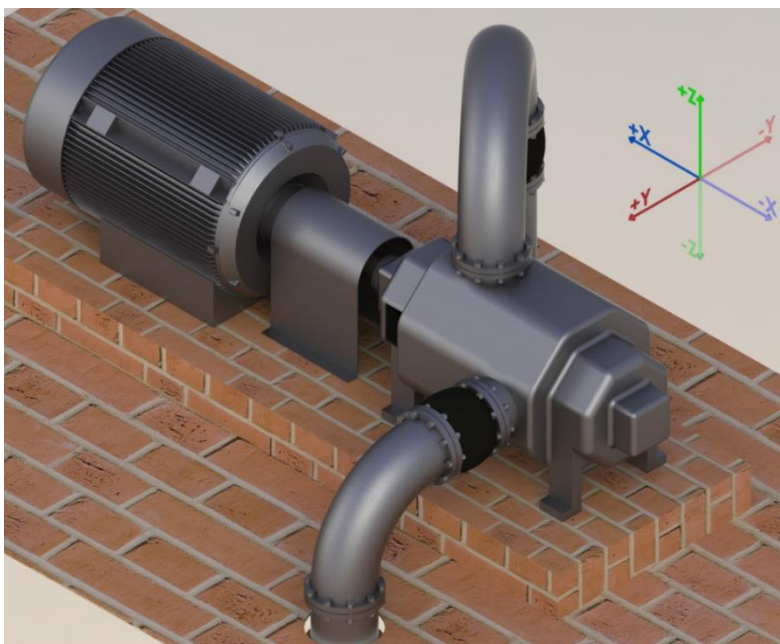


Figura 47 - Grupo B - Sistema de coordenadas

3.3.2 – Pontos de medição – Grupo A

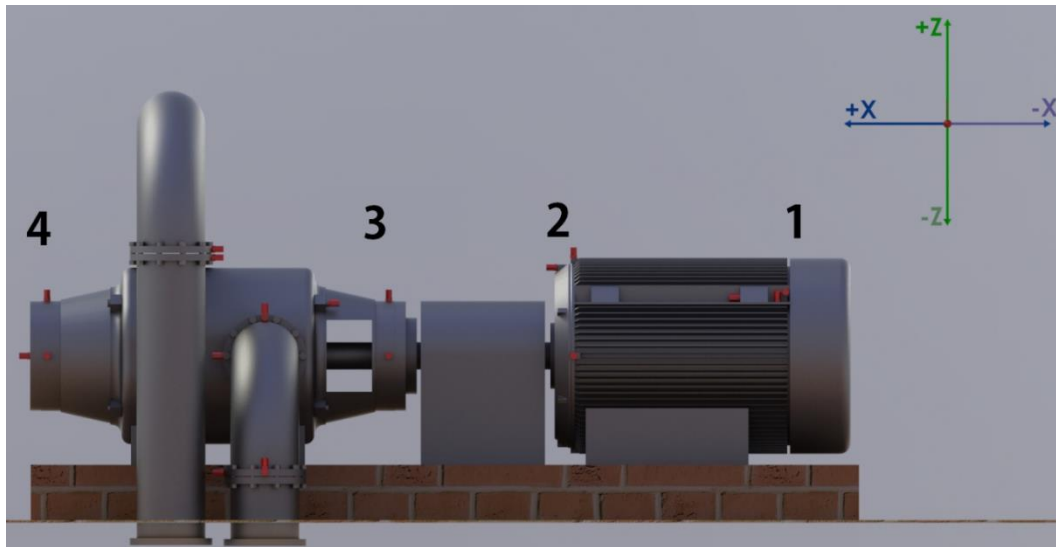


Figura 48 - Grupo A - Pontos de medição vista de frente

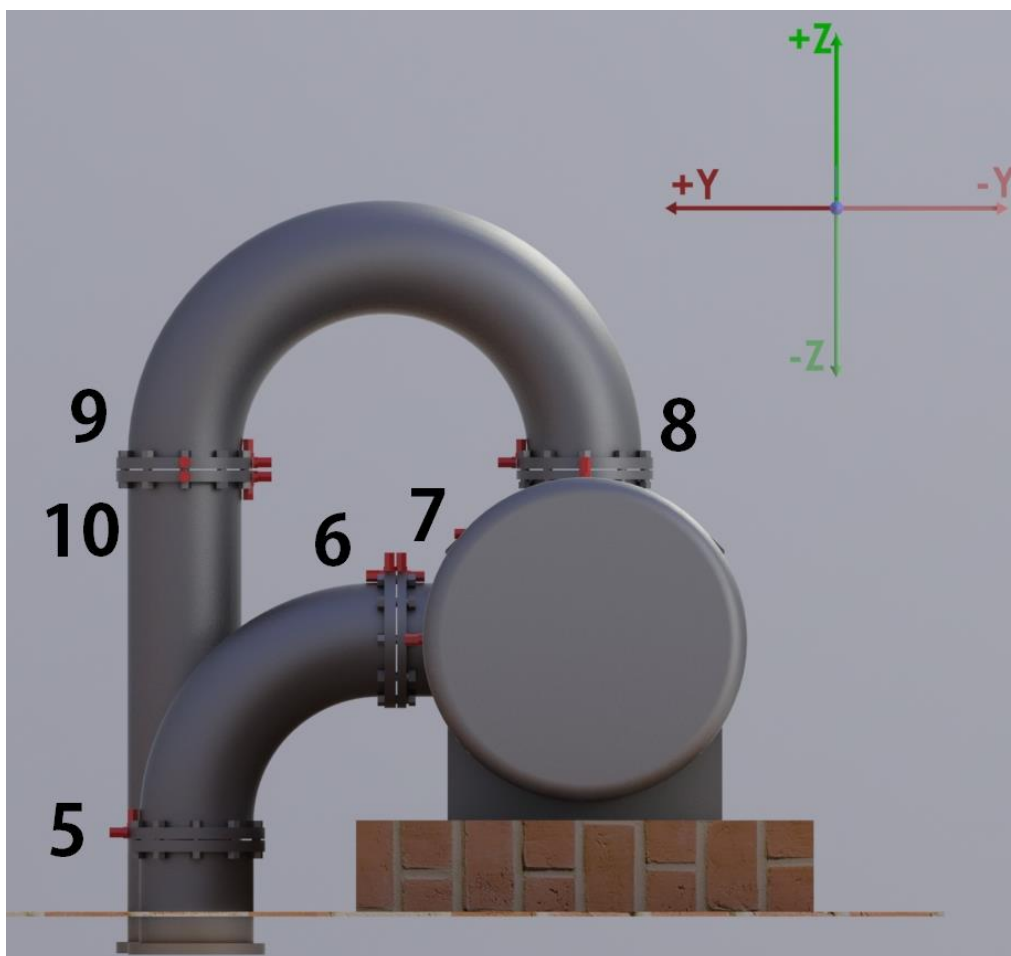


Figura 49 - Grupo A - Pontos de medição vista lateral

A tabela 5 tem a descrição dos pontos de medição utilizados com o coletor de dados portátil, com a identificação, em que # será 1 ou 2, consoante for a bomba A1 ou a bomba A2, com a posição e respetiva direção e sentido de colocação do acelerómetro.

Tabela 5 - Grupo A - Pontos de medição

Grupo A				
	Identificação	Posição	Direção	Sentido
1	A#_1X-	1	X	Negativo
	A#_1Y+	1	Y	Positivo
	A#_1Z+	1	Z	Positivo
2	A#_2X+	2	X	Positivo
	A#_2Y+	2	Y	Positivo
	A#_2Z+	2	Z	Positivo
3	A#_3X-	3	X	Negativo
	A#_3Y+	3	Y	Positivo
	A#_3Z+	3	Z	Positivo
4	A#_4X+	4	X	Positivo
	A#_4Y+	4	Y	Positivo
	A#_4Z+	4	Z	Positivo
5	A#_5X+	5	X	Positivo
	A#_5Y+	5	Y	Positivo
	A#_5Z+	5	Z	Positivo
6	A#_6X+	6	X	Positivo
	A#_6Y+	6	Y	Positivo
	A#_6Z+	6	Z	Positivo
7	A#_7X+	7	X	Positivo
	A#_7Y-	7	Y	Negativo
	A#_7Z+	7	Z	Positivo
8	A#_8X-	8	X	Negativo
	A#_8Y+	8	Y	Positivo
	A#_8Z+	8	Z	Positivo
9	A#_9X-	9	X	Negativo
	A#_9Y-	9	Y	Negativo
	A#_9Z+	9	Z	Positivo
10	A#_10X-	10	X	Negativo
	A#_10Y-	10	Y	Negativo
	A#_10Z-	10	Z	Negativo

3.3.3 – Pontos de medição – Grupo B

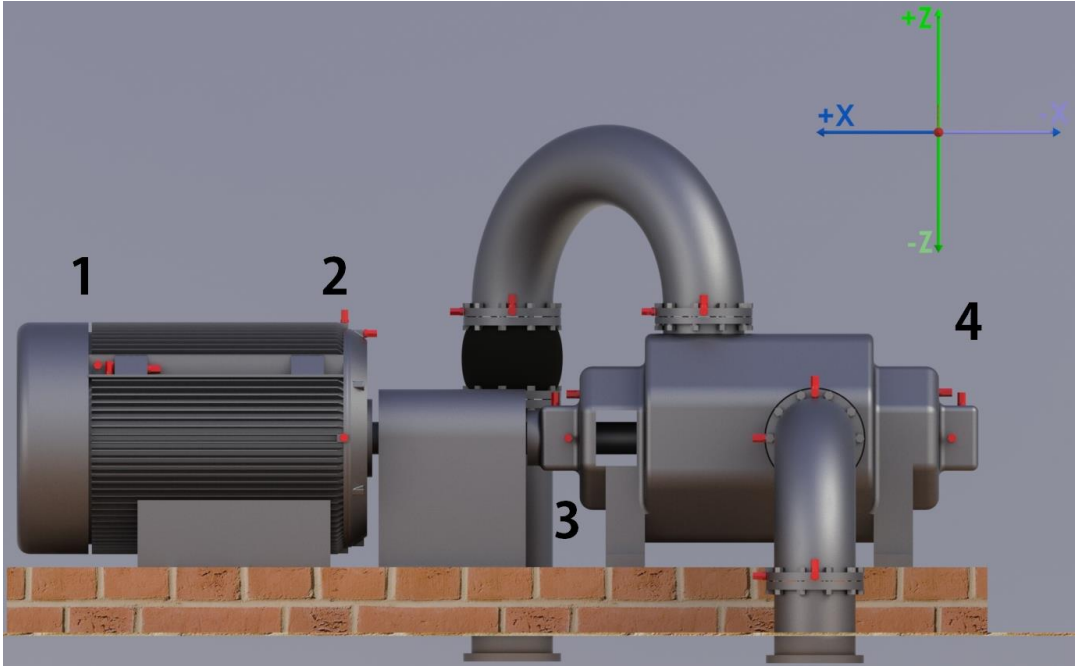


Figura 50 - Grupo B - Pontos de medição vista de frente

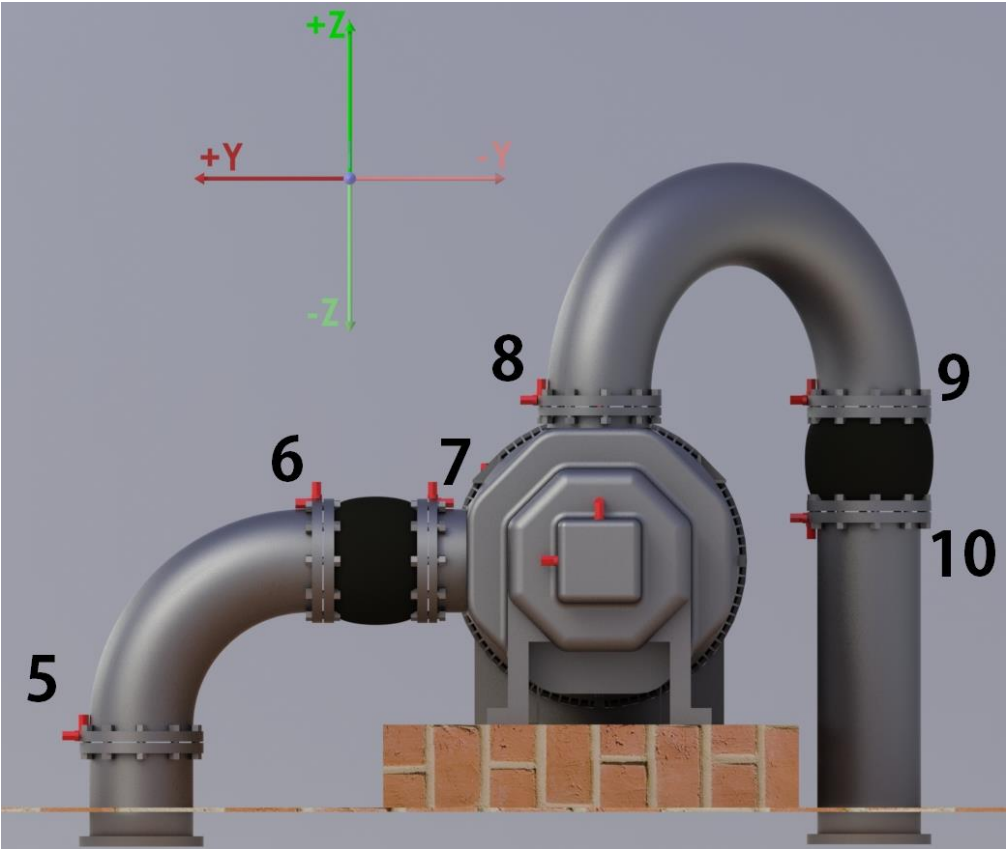


Figura 51 - Grupo B - Pontos de medição vista lateral

A tabela 6 descreve os pontos de medição utilizados com o coletor, com a identificação, em que # será 1, 2 ou 3, consoante for a bomba B1, B2 ou B3, respetivamente. Também contém informação sobre a direção e o sentido da colocação do acelerómetro.

Tabela 6 - Grupo B - Pontos de medição

Grupo B				
	Identificação	Posição	Direção	Sentido
1	B#_1X+	1	X	Positivo
	B#_1Y+	1	Y	Positivo
	B#_1Z+	1	Z	Positivo
2	B#_2X-	2	X	Negativo
	B#_2Y+	2	Y	Positivo
	B#_2Z+	2	Z	Positivo
3	B#_3X+	3	X	Positivo
	B#_3Y+	3	Y	Positivo
	B#_3Z+	3	Z	Positivo
4	B#_4X-	4	X	Negativo
	B#_4Y+	4	Y	Positivo
	B#_4Z+	4	Z	Positivo
5	B#_5X+	5	X	Positivo
	B#_5Y+	5	Y	Positivo
	B#_5Z+	5	Z	Positivo
6	B#_6X+	6	X	Positivo
	B#_6Y+	6	Y	Positivo
	B#_6Z+	6	Z	Positivo
7	B#_7X+	7	X	Positivo
	B#_7Y-	7	Y	Negativo
	B#_7Z+	7	Z	Positivo
8	B#_8X+	8	X	Positivo
	B#_8Y+	8	Y	Positivo
	B#_8Z+	8	Z	Positivo
9	B#_9X+	9	X	Positivo
	B#_9Y+	9	Y	Positivo
	B#_9Z+	9	Z	Positivo
10	B#_10X+	10	X	Positivo
	B#_10Y+	10	Y	Positivo
	B#_10Z-	10	Z	Negativo

3.3.4 – Etapas de medições

As medições realizadas para este trabalho foram realizadas tendo em consideração uma preparação e planeamento das configurações mais adequadas. Começou-se por trabalhar em laboratório na mesa de ensaios. Foram simuladas situações de desequilíbrios de um disco em rotação semelhante à das bombas em estudo, e feitas diversas medições com diferentes configurações para observar os espectros e poder retirar a melhor informação possível. Após esta fase inicial de conhecimento do coletor de dados em laboratório, abordou-se as próprias eletrobombas da estação elevatória.

- **Preparação das medições**

Nesta primeira fase de medições no local de estudo, começou-se por tentar escolher pontos de medição que fossem influentes, e que da mesma forma, seguissem o percurso do fluido desde a entrada na bomba até à saída.

Na extremidade do motor, ponto 1, a escolha do ponto de medição teve que ser feita junto ao olhal de suspensão (que serve para posicionar o motor com o auxílio de um diferencial elétrico). Como o motor possui um outro olhal, foi feita uma medição teste no olhal de suspensão 1, e uma outra medição no olhal de suspensão 2, nas três direções (figura 52). Verificou-se, com o programa de análise, que não havia diferenças significativas entre as duas medições, e portanto a escolha recaiu, no caso que serve como exemplo (motor do grupo B) sobre o olhal de suspensão 1.



Figura 52 - Demonstração da localização do ponto 1

Tiradas as dúvidas em situações semelhantes à acima exemplificada, e escolhidos os pontos em definitivo (que foram sempre os mesmos ao longo de todas as medições), efetuou-se uma medição teste ampla, por forma a ter conhecimento das zonas e ordens de funcionamento dos equipamentos. Esta medição teve configurações padrão, com uma largura de banda suficientemente larga, cerca de 100 ordens da rotação de funcionamento do motor. A partir desta medição, ajustou-se as configurações por forma a otimizar a informação recolhida.

3.3.5 – Configurações do coletor de dados

Para as medições completas, que servirão para análise das eletrobombas, foram utilizadas nas várias medições, um conjunto de configurações idênticas, por forma a manter a coerência e facilitar a comparação entre os dados.

Mediu-se tendo em conta a localização, havendo apenas alterações na medição gSE, por forma a definir uma largura de banda que fosse possível ter informação até à 4ª harmónica do defeito dos rolamentos de maior frequência, a identificação dessas configurações por localização estão referidas na tabela 7 e 8, para o grupo A e B, respetivamente.

Tabela 7 - Grupo A - Configurações por localização

Grupo A		Configurações por localização		
Tipo	Motor (1 a 2)	Bomba (3 a 4)	Tubagem (5 a 10)	
Magnitude de velocidade	RMS (60Krpm-40x)			
Espectro de velocidade	RMS (60Krpm-40x)			
Magnitude de aceleração	PEAK (96Krpm-65x)			
Espectro de aceleração	PEAK (96Krpm-65x)			
Magnitude de aceleração gSE	pk-pk (48Krpm-32x)			
Espectro de aceleração gSE	pk-pk (48Krpm-32x)			
Tempo de medição por ponto [s]	13,8	13,8	7,8	

Tabela 8 - Grupo B - Configurações por localização

Grupo B		Configurações por localização		
Tipo	Motor (1 a 2)	Bomba (3 a 4)	Tubagem (5 a 10)	
Magnitude de velocidade	RMS (60Krpm-40x)			
Espectro de velocidade	RMS (60Krpm-40x)			
Magnitude de aceleração	PEAK (96Krpm-65x)			
Espectro de aceleração	PEAK (96Krpm-65x)			
Magnitude de aceleração gSE	pk-pk (48Krpm-32x)	pk-pk (60Krpm-32x)		
Espectro de aceleração gSE	pk-pk (48Krpm-32x)	pk-pk (60Krpm-32x)		
Tempo de medição por ponto [s]	13,8	12,6	7,8	

As configurações em detalhe são as seguintes:

Tabela 9 - Configurações detalhadas utilizadas

Identificação	RMS (60Krpm-40x)
Tipo	Espectro de Velocidade
Unidade	mm/sec
Sinal	RMS
Janela	Hanning
Resolução [Fmax RPM]	60 000
Número de linhas [LOR]	1600
Médias	5
Tipo de média	Linear
Overlap [%]	50
Filtro	Overall
Tempo de medição [s]	4,8

Identificação	pk-pk (48Krpm-32x)
Tipo	Espectro de Aceleração gSE
Unidade	g's
Sinal	peak-peak
Janela	Hanning
Resolução [Fmax RPM]	48 000
Número de linhas [LOR]	1600
Médias	5
Tipo de média	Linear
Overlap [%]	50
Filtro	5kHz gSE
Tempo de medição [s]	6

Identificação	PEAK (96Krpm-65x)
Tipo	Espectro de Aceleração
Unidade	g's
Sinal	Peak
Janela	Hanning
Resolução [Fmax RPM]	96 000
Número de linhas [LOR]	1600
Médias	5
Tipo de média	Linear
Overlap [%]	50
Filtro	Overall
Tempo de medição [s]	3

Identificação	pk-pk (60Krpm-32x)
Tipo	Espectro de Aceleração gSE
Unidade	g's
Sinal	peak-peak
Janela	Hanning
Resolução [Fmax RPM]	60 000
Número de linhas [LOR]	1600
Médias	5
Tipo de média	Linear
Overlap [%]	50
Filtro	5kHz gSE
Tempo de medição [s]	4,8

3.3.6 – Frequências de defeito dos rolamentos

A informação mais detalha sobre os rolamentos das eletrobombas da estação elevatória em estudo está descrita na tabela 10 para o grupo A, e na tabela 11 para o grupo B. O cálculo das frequências de defeito dos rolamentos foi feito recorrendo a uma ferramenta disponibilizada pela marca SKF no sítio da *internet* oficial, “*SKF Engineering Calculator – Bearing Frequencies Calculator*” [37], selecionando o rolamento pretendido numa base de dados, sabendo a velocidade de rotação do veio e qual o anel do rolamento que está em rotação, irá calcular as frequências dos quatro defeitos, FTF, BSF, BPFO e BPFI, assunto já abordado anteriormente no capítulo 2.6.7 da página 38.

Tabela 10 - Grupo A - Características dos rolamentos e respetivas frequências de defeitos

Bomba A				
Localização	Motor (1) e (2)	Bomba (3)	Bomba (4)	
Identificação	6319C3	2x 7315 BECBJ	6315C3	
Tipo de rolamento	DGBB	ACBB	DGBB	
Diâmetro de primitivo [mm]	147,5	117,5	117,5	
Diâmetro de elementos rolantes [mm]	33,338	26,988	26,988	
Nº de elementos rolantes	8	13	8	
Ângulo de contato [°]	0	40	0	
Anel rotativo	interno	interno	interno	
Frequência de rotação [Hz]	24,8	24,8	24,8	
Frequências de defeitos [Hz]				
FTF	9,597	10,218	9,552	
BSF	52,06	52,316	51,139	
BPFO	76,779	132,837	76,415	
BPFI	121,621	189,563	121,985	

Tabela 11 - Grupo B - Características dos rolamentos e respetivas frequências de defeitos

Bomba B				
Localização	Motor (1) e (2)	Bomba (3)	Bomba (4)	
Identificação	6319C3	NU219EC	2x 7219BE	
Tipo de rolamento	DGBB	CRB	ACBB	
Diâmetro de primitivo [mm]	147,5	133,5	132	
Diâmetro de elementos rolantes [mm]	33,338	21	24	
Nº de elementos rolantes	8	17	16	
Ângulo de contato [°]	0	0	40	
Anel rotativo	interno	interno	interno	
Frequência de rotação [Hz]	24,8	24,8	24,8	
Frequências de defeitos [Hz]				
FTF	9,597	10,449	10,673	
BSF	52,06	76,878	66,877	
BPFO	76,779	177,64	170,767	
BPFI	121,621	243,96	226,033	

3.3.7 – Esquemas de funcionamento das bombas

Foram realizadas três medições com as configurações mencionadas anteriormente, sendo as duas primeiras antes da operação de manutenção. Uma vez que se trata de uma estação elevatória em serviço, não era possível efetuar as medições em cada bomba individualmente, sem estar pelo menos uma outra em funcionamento, por forma a não prejudicar o abastecimento normal de água. As figuras 54 e 55 demonstram os esquemas de funcionamento da medição 1 e 2, respetivamente.

Nos esquemas que se seguem, as cores têm o seguinte significado:



Figura 53 - Legenda do esquema de funcionamento das bombas



Figura 54 - Esquema de funcionamento da medição 1, do dia 23-09-2015



Figura 55 - Esquema de funcionamento da medição 2, do dia 24-09-2015

No período entre as medições 1 e 2, e a medição 3, foram realizadas duas operações de manutenção. A primeira operação de manutenção engloba a mudança de anéis retentores, um componente de desgaste, que não se espera que tenha efeitos nos níveis de vibração ou ruído, apenas influencia a estanquicidade da água em circulação dentro da bomba centrífuga.

A segunda operação de manutenção e a mais importante para a análise, foi a injeção de massa de lubrificação nos rolamentos. É de esperar alguma melhoria em termos globais de vibração, e principalmente nas medições dos pontos junto aos rolamentos, ou seja, do ponto 1 ao ponto 4, englobando as extremidades tanto do motor como da bomba. De referir também que relativamente à eletrobomba B2, possui uma massa de lubrificação diferente das restantes eletrobombas, situação que foi propositadamente planeada, a fim de testar a diferença entre massas. A figura 56 demonstra o esquema de funcionamento da medição 3, após as operações de manutenção.



Figura 56 - Esquema de funcionamento da medição 3, do dia 30-09-2015

3.3.8 – Ensaio de impacto

A fim de determinar as frequências naturais das eletrobombas, recorreu-se a um martelo de ensaio de impacto, da marca *Kistler*, modelo 9726A, e a um programa de análise para trabalhar com FRF e análise modal, *DATS Analysis*. Este programa, e a metodologia da aplicação do martelo de impacto, permite abordar e fazer uma análise modal experimental. No entanto, para este trabalho interessa apenas o conhecimento das frequências naturais.



Figura 57 - Fotografia do martelo de impacto utilizado, da Kistler

Durante os ensaios, são dados 3 impactos num mesmo ponto de excitação escolhido, é feita uma média e resulta numa FRF com parte real e parte imaginária, bem como com a indicação da fase. Através de uma simples programação em blocos, aplicada no *DATS Analysis*, é possível passar da FRF em bruto (real e imaginário), aplicar um bloco de modulação e um segundo bloco de conversão linear para decibéis, é criado um último bloco que permite extrair os valores para folha Excel, facilitando assim a manipulação dos gráficos da forma mais adequada e por fim o bloco que permite gravar o resultado final no local pretendido, como se verifica na figura 58.

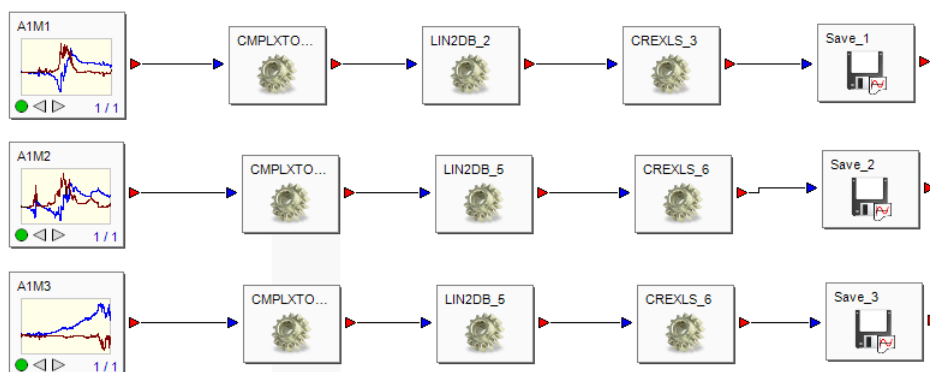


Figura 58 – Programação em bloco aplicada para extrair as FRF

Tendo em conta que existem dois grupos distintos, grupo A e grupo B, escolheu-se dez pontos diferentes para apenas uma bomba de cada grupo, bomba A1 e bomba B2. Os pontos não são necessariamente iguais nas duas bombas, uma vez que a sua escolha recaiu sobre abordar várias situações que poderiam ser interessantes em cada uma das bombas, tal como se verifica na tabela 12.

Tabela 12 - Pontos de 10 medições com o martelo de impacto para uma bomba de cada grupo

Bomba A1	Bomba B2
$A1m1 - \frac{3Y}{3Y}$	$B2m1 - \frac{4Y}{4Y}$
$A1m2 - \frac{3Z}{3Z}$	$B2m2 - \frac{6Y}{4Y}$
$A1m3 - \frac{7Y}{7Y}$	$B2m3 - \frac{7Y}{4Y}$
$A1m4 - \frac{7X}{7X}$	$B2m4 - \frac{6Y}{6Y}$
$A1m5 - \frac{7Z}{7Z}$	$B2m5 - \frac{7X}{7X}$
$A1m6 - \frac{8X}{8X}$	$B2m6 - \frac{6X}{6X}$
$A1m7 - \frac{8Z}{8Z}$	$B2m7 - \frac{8Y}{8Y}$
$A1m8 - \frac{9X}{9X}$	$B2m8 - \frac{9X}{9X}$
$A1m9 - \frac{9Y}{9Y}$	$B2m9 - \frac{9Z}{9Z}$
$A1m10 - \frac{9Z}{9Z}$	$B2m10 - \frac{10Z}{10Z}$

Num segundo ensaio, foram medidos cinco pontos em cada bomba, desta vez mantendo sempre o mesmo ponto de resposta (colocação do acelerómetro), no ponto 9Y, e variando apenas os pontos de excitação, 8Y, 3Y, 2Y, 7Y e 5Y para o caso do grupo A, e pontos 8Y, 3Y, 4Y, 7Y e 5Y para o grupo B, como se indica na tabela 13.

Tabela 13 - Pontos de 5 medições com o martelo de impacto para todas as bombas

xxBomba A1	xxBomba A2	xxBomba B1	xxBomba B2	xxBomba B3
$xxA1F1 - \frac{9Y}{8Y}$	$xxA2F1 - \frac{9Y}{8Y}$	$xxB1F1 - \frac{9Y}{8Y}$	$xxB2F1 - \frac{9Y}{8Y}$	$xxB3F1 - \frac{9Y}{8Y}$
$xxA1F2 - \frac{9Y}{3Y}$	$xxA2F2 - \frac{9Y}{3Y}$	$xxB1F2 - \frac{9Y}{3Y}$	$xxB2F2 - \frac{9Y}{3Y}$	$xxB3F2 - \frac{9Y}{3Y}$
$xxA1F3 - \frac{9Y}{2Y}$	$xxA2F3 - \frac{9Y}{2Y}$	$xxB1F3 - \frac{9Y}{4Y}$	$xxB2F3 - \frac{9Y}{4Y}$	$xxB3F3 - \frac{9Y}{4Y}$
$xxA1F4 - \frac{9Y}{7Y}$	$xxA2F4 - \frac{9Y}{7Y}$	$xxB1F4 - \frac{9Y}{7Y}$	$xxB2F4 - \frac{9Y}{7Y}$	$xxB3F4 - \frac{9Y}{7Y}$
$xxA1F5 - \frac{9Y}{5Y}$	$xxA2F5 - \frac{9Y}{5Y}$	$xxB1F5 - \frac{9Y}{5Y}$	$xxB2F5 - \frac{9Y}{5Y}$	$xxB3F5 - \frac{9Y}{5Y}$

3.4 – Resultados da análise global

Na análise aos resultados, aborda-se primeiro o nível global de vibrações através dos valores globais de magnitude de velocidades das três medições efetuadas no conjunto das cinco bombas, comparando com a norma ISO aplicada, por forma a verificar as zonas de funcionamento das bombas, e referenciar possíveis zonas de mau funcionamento.

De seguida apresentam-se os resultados dos ensaios com o martelo de impacto, para conhecer a resposta livre do sistema, nomeadamente as frequências naturais, comparando com uma medição em funcionamento do mesmo ponto e tentando encontrar frequências coincidentes que possam gerar problemas de ressonância.

3.4.1 – Normas para a análise global das medições efetuadas

Ao longo deste capítulo descrevem-se em gráficos de barras os níveis globais de magnitudes de velocidades em RMS, de aceleração em pico, e da aceleração gSE, para cada conjunto de bomba, e considerando as três medições efetuadas neste trabalho de acordo com os esquemas de funcionamento do capítulo 3.3.7, da página 59 (figuras 54 a 56).

3.4.1.1 – Norma para os valores globais de magnitude de velocidade

A norma utilizada para a análise das bombas centrífugas é a norma ISO 10816-1 [38], que apesar de não estar atualizada, continua a ser amplamente aplicada com estes valores e a ser uma referência para a avaliação de vibrações mecânicas em máquinas com elementos rotativos, tal como acontece nas bombas. Nesta norma, dividem-se os equipamentos em quatro classes diferentes, a serem descritas de seguida:

Classe I: Elementos individuais de mecanismos, que sejam ligados a outras máquinas em normal funcionamento, tipicamente com motores elétricos até 15 kW;

Classe II: Máquinas com potências entre 15 kW e 75 kW sem qualquer tipo de fundação especial, mecanismos montados rigidamente ou máquinas montadas em fundações especiais até 300 kW de potência;

Classe III: Máquinas de grande porte com elementos rotativos montados em fundações rígidas e pesadas;

Classe IV: Máquinas de grande porte com elementos rotativos montados em fundações relativamente flexíveis na direção em que se mede a vibração, turbogeradores ou turbinas com potências acima de 10 MW.

Classificou-se as eletrobombas deste trabalho como pertencendo à classe II, tendo em conta que tanto no grupo A, como o grupo B, as bombas são de tamanho intermédio, com potências respetivas de 160 kW e 250 kW, e possuem todas elas uma fundação própria do conjunto, propositadamente projetada para a bomba, podendo-se considerar uma fundação especial.

Na tabela 14, está a tabela traduzida e adaptada da norma dos limites das zonas típicas de funcionamento, sendo que se assume quatro zonas, com grau crescente de severidade para o equipamento, a saber:

Zona A: Níveis de vibrações típicos de máquinas novas e ainda com poucas horas de funcionamento;

Zona B: Zona de valores aceitáveis para equipamentos que não operem durante um longo período de tempo seguido;

Zona C: Valores insatisfatórios para equipamentos com funcionamento contínuo e durante um longo período de tempo;

Zona D: Valores considerados suficientemente severos para danificar os equipamentos em funcionamento.

Tabela 14 - Limites das zonas típicas de funcionamento para os níveis de vibração

Velocidade RMS [mm/sec]	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	B	B
4,5	D	C	C	
7,1		D	C	
11,2		D	C	
18		D	D	
28			D	D
45				D

3.4.1.2 – Carta de severidade para os valores globais de aceleração gSE

Para a análise dos rolamentos, utiliza-se uma carta de severidade para rolamentos em “*spike energy*”, fornecida pela *IRD Mechanalysis*, entidade que desenvolveu este método de deteção de defeitos em rolamentos.

Na figura 59, observa-se o gráfico com a identificação das zonas de aceitação de valores globais de aceleração gSE, para cada velocidade de rotação do equipamento, com escala logarítmica. Tendo em conta a velocidade de rotação para os grupos é 1488 rpm (24,8 Hz), considerou-se no gráfico da figura um ponto ligeiramente abaixo de 1500 rpm, e traçou-se linhas horizontais sobre o limite superior da zona aceitável e sobre o limite inferior da zona não aceitável, para identificação desses valores limites, sendo de aproximadamente 0,775 gSE como limite superior de zona aceitável e 1,40 gSE como limite inferior de zona não aceitável.

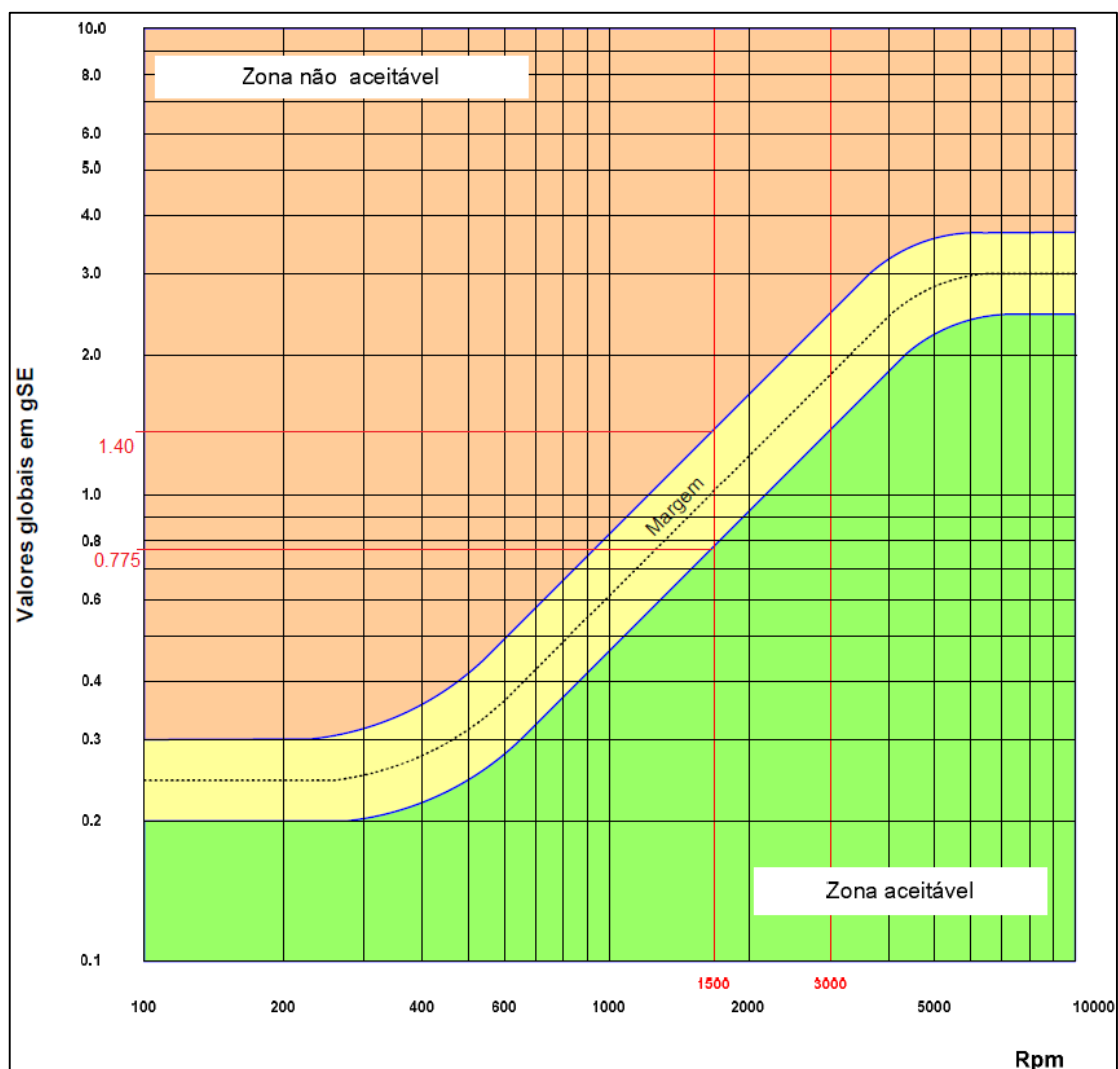


Figura 59 - Carta de severidade para os rolamentos, em gSE (*IRD Mechanalysis*)

3.4.2 – Bomba A1

Na figura 60, observa-se o gráfico dos valores globais de magnitude de velocidade das 3 medições efetuadas na bomba A1 e na figura 61 o gráfico dos valores globais de magnitude de aceleração. Fica visível pela figura 60 que praticamente todos os valores estão inseridos na zona A, a verde, resultante da menor potência dos motores, relativamente ao grupo B.

Observando os esquemas de funcionamento das medições efetuadas, na figura 54, referente à medição 1, que enquanto se media a bomba A1, apenas a bomba B1 estava a funcionar em simultâneo. Na medição 2 (figura 55), juntamente com a bomba A1, estava também as bombas B1 e B2 a funcionar. E na figura 56, referente à medição 3, funcionavam em simultâneo, com a bomba A1, as bombas B1 e B3. Espera-se um menor valor global de velocidade para a medição 1, por ser a situação onde a carga, resultado da influência das bombas adjacentes, é menor. Da medição 2 resulta um acréscimo no valor global de magnitude da velocidade, relativamente às medições 1 e 3, devido a uma maior proximidade das bombas. No caso da medição 3, os valores tendem a ser menores, pois o espaçamento entre as bombas em funcionamento é maior, e portanto a transmissibilidade para a bomba A1 é menor, comparativamente com a medição 2.

No ponto de medição 3Z, pertencendo à direção vertical na bomba junto ao acoplamento, verifica-se nas três medições, que o valor global de velocidade se encontra na zona de funcionamento B, podendo causar problemas em casos de longos períodos de operação da bomba.

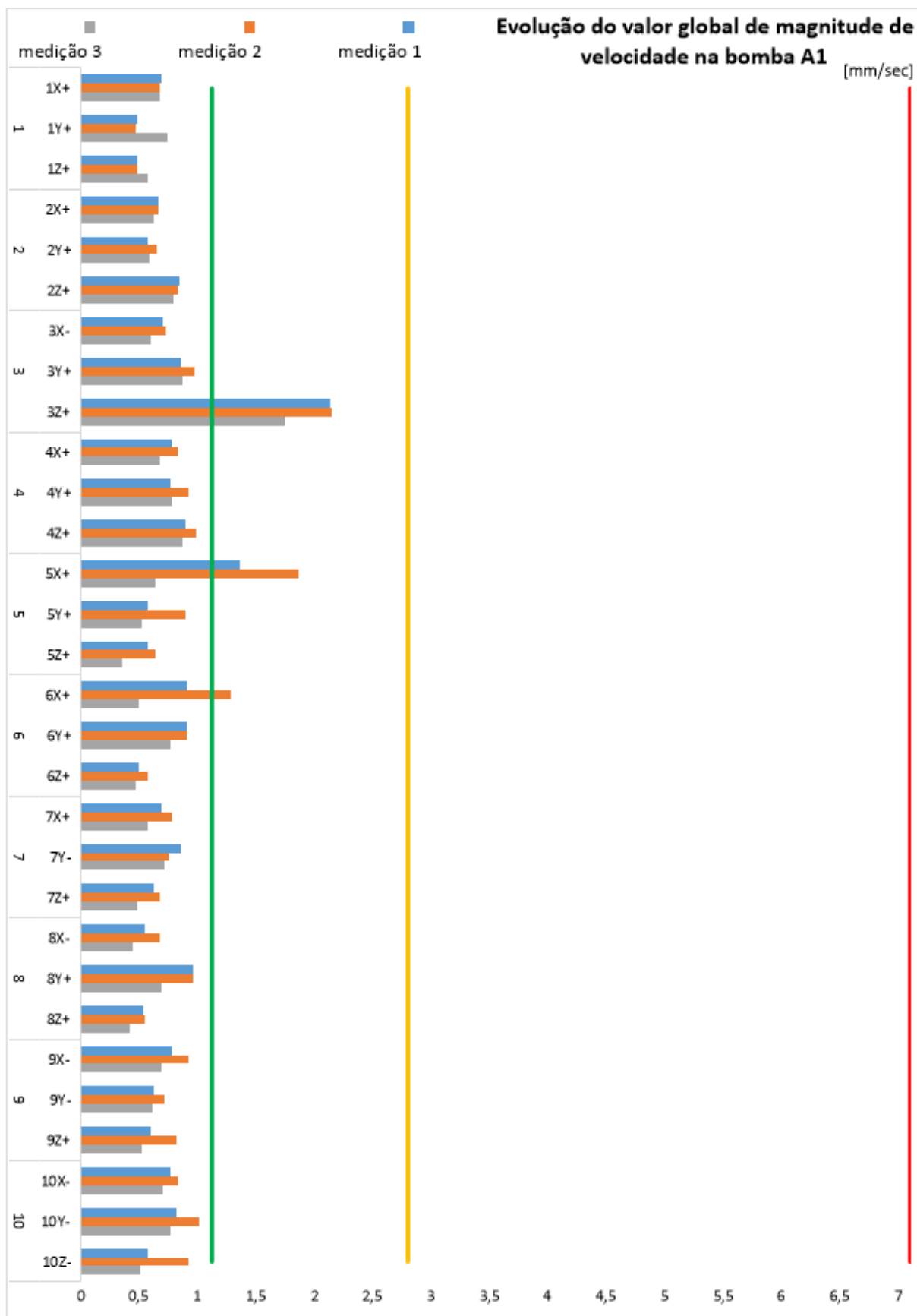


Figura 60 – Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba A1

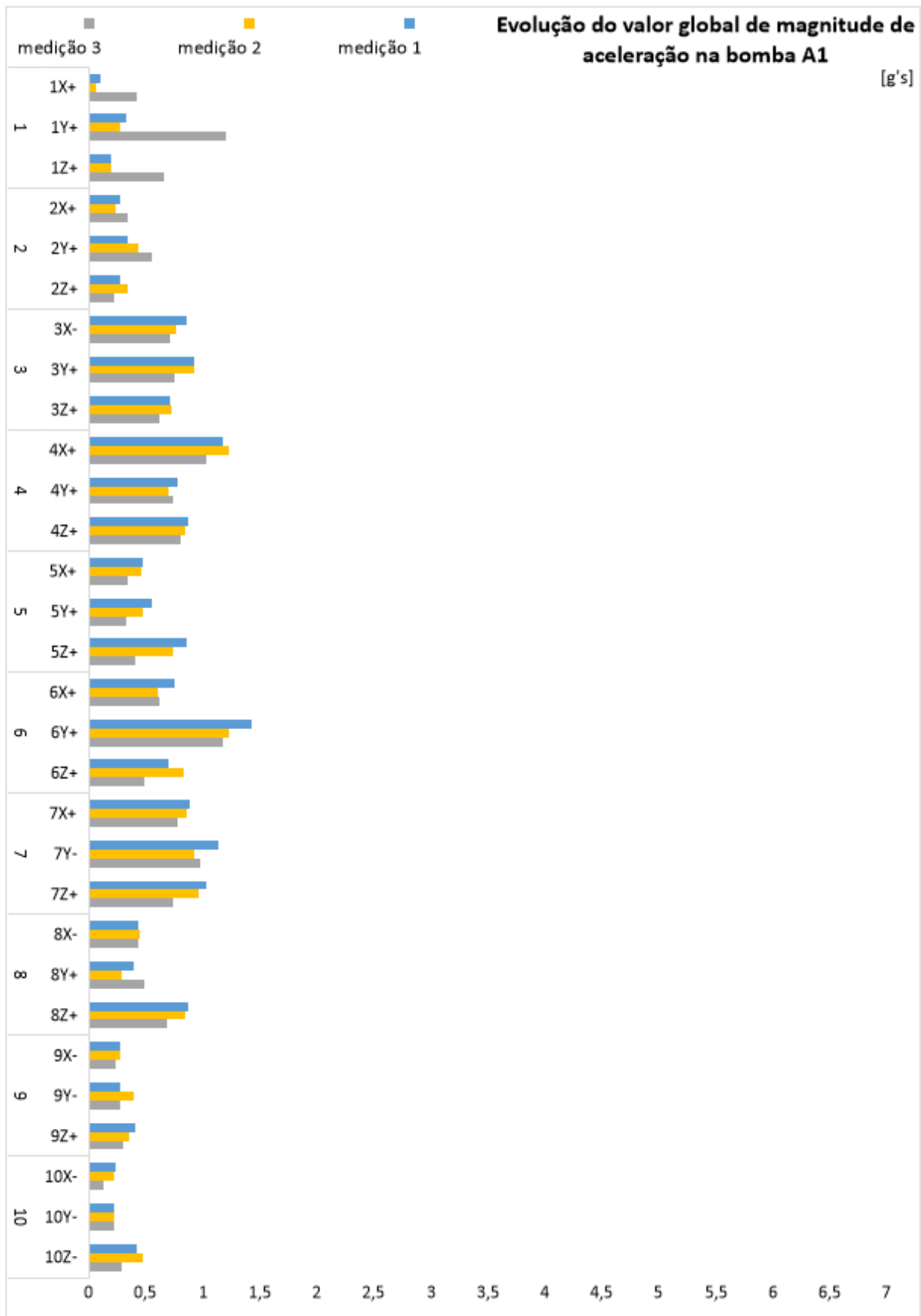


Figura 61 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba A1

Na figura 62, referente aos espectros de velocidade das três medições do ponto A1_3Z, observam-se semelhanças em termos de picos e de amplitudes nas medições 1 e 2. Já na medição 3, as amplitudes diminuem ligeiramente, resultado da injeção de massa ter surtido efeito. Também não existe problemas de ressonância no ponto, ao comparar com a FRF da figura 63, medida no ponto 3Z como ponto de resposta e como ponto de excitação. A transmissibilidade de outras bombas em funcionamento não é verificada através dos espectros de velocidade para a largura de banda admitida, pois as amplitudes, para a frequência de rotação do veio, mantiveram-se idênticas nas medições 1 e 2, antes da injeção de massa, e decresceu ligeiramente na medição 3, após a manutenção, tal como se observa na figura 62.

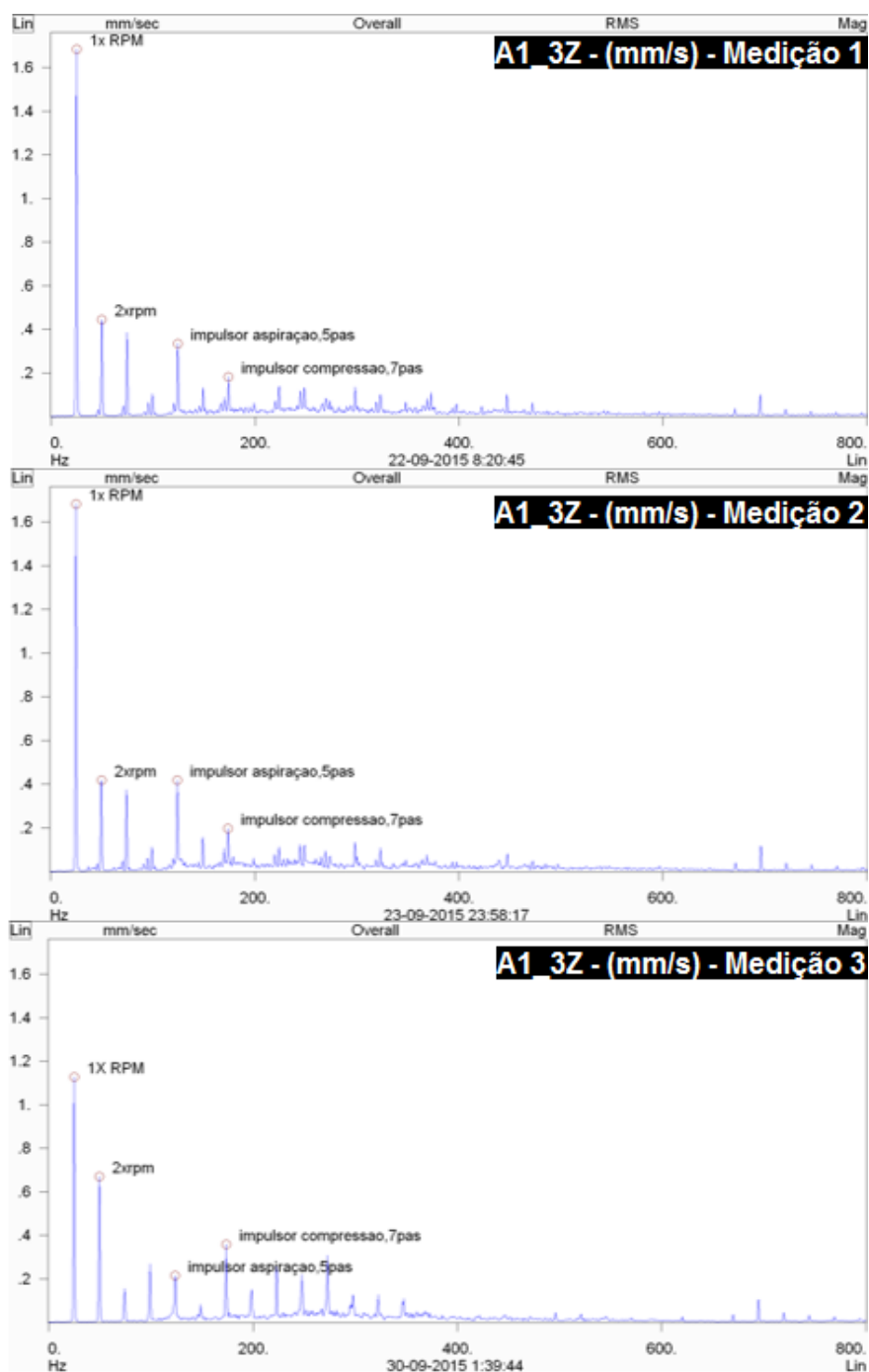


Figura 62 - Espectros de velocidade das três medições do ponto A1_3Z

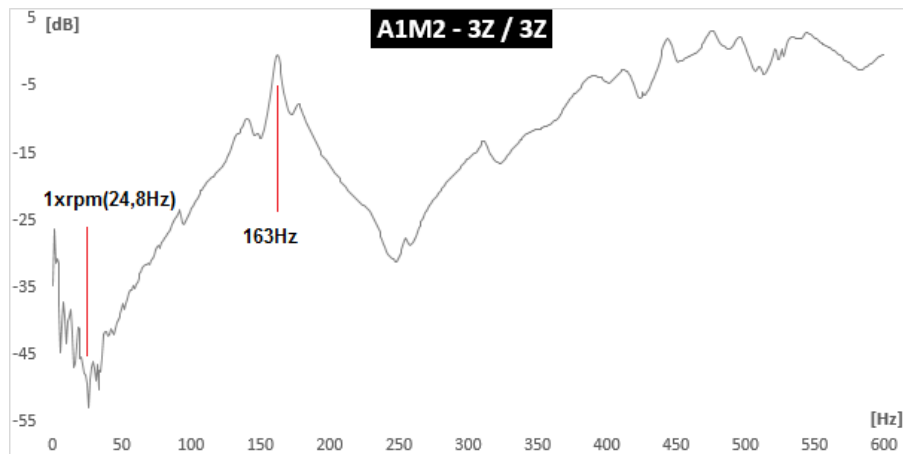


Figura 63 – Gráfico da FRF A1M2 do ponto 3Z da bomba A1 efetuada com o martelo de ensaio de impacto

Os efeitos da injeção de massa são mais visíveis na figura 64, referente aos espectros de aceleração gSE. Nas medições 1 e 2, apresentam mais uma vez picos semelhantes, apenas com oscilação nas amplitudes, e com bandas laterais ou picos de meias ordens. Na medição 3, os picos no espectro gSE são quase inexistentes, passando a primeira ordem de rotação de 0,045 g's e 0,051 g's (medição 1 e 2) para 0,0078 g's. É visível a segunda ordem de rotação e um pico a 28,5 Hz com um valor de 0,021 g's.

Por observação dos espectros da figura 64, verifica-se a falta de massa lubrificante na altura das medições 1 e 2, porque os picos que surgem nas duas primeiras medições desaparecem na medição 3, bem como uma diminuição dos níveis de amplitude de vibração, resultando num menor valor global de velocidade na medição 3 (figura 60).

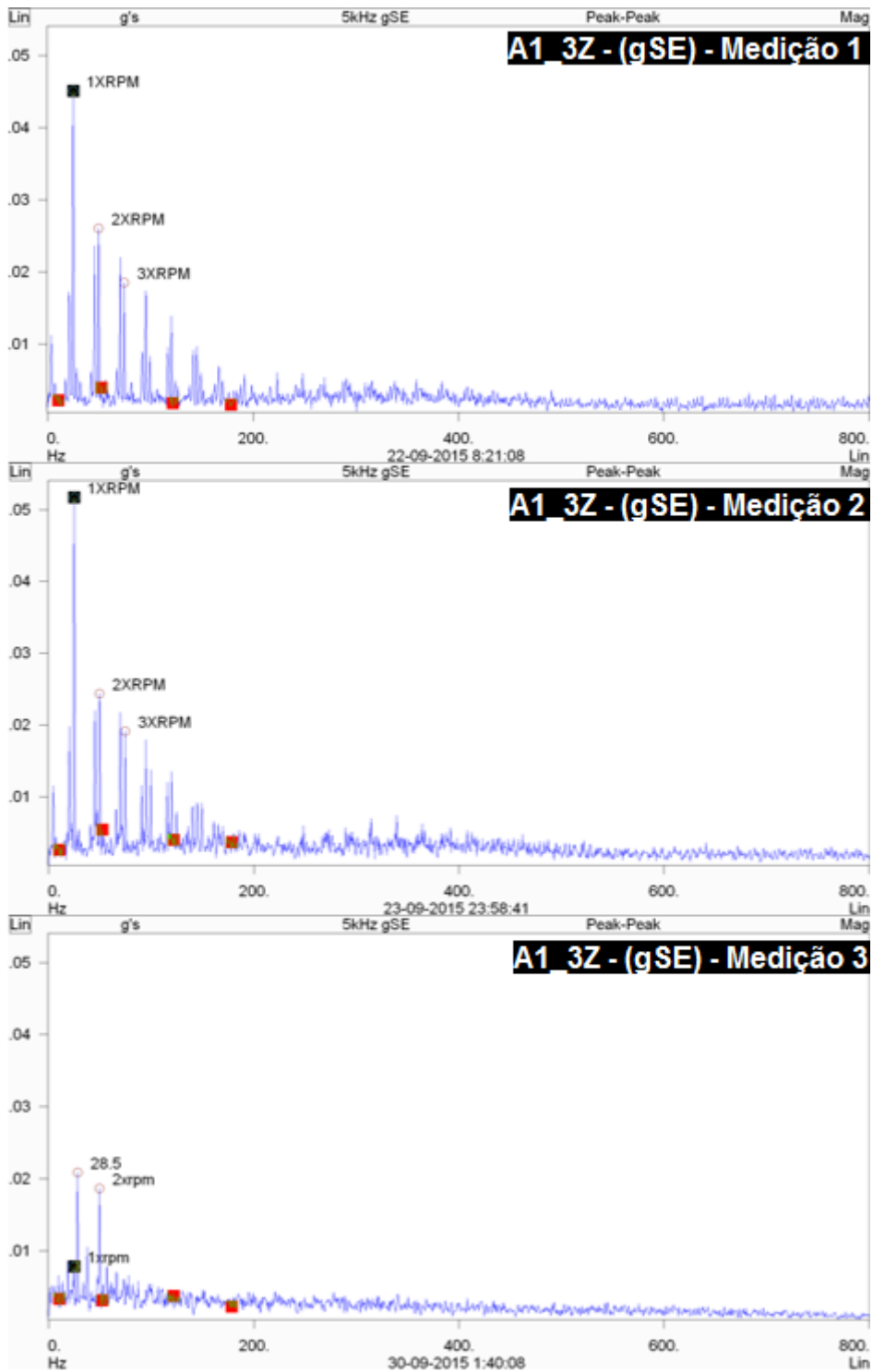


Figura 64 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A1_3Z

Por observação da figura 60, nos pontos A1_5X e A1_6X, referentes à direção axial em relação ao eixo de simetria da bomba, na secção de entrada (tal como a localização 7), a medição 2 mostra os valores globais na zona amarela, B.

A figura 65 representa o gráfico da resposta livre do sistema do ensaio A1M4 – 7X/7X, com destaque para uma zona que surge uma frequência natural a aproximadamente 122 Hz, cerca de cinco vezes a rotação do veio, com um pico coincidente visível nos espectros de velocidade da figura 66, pois como os pontos 5, 6 e 7 estão relativamente próximos, considera-se a estrutura da secção de entrada da bomba como uma única estrutura e portanto espera-se comportamentos semelhantes.

Analisando os espectros da figura 66, verificam-se semelhanças nas curvas, variando nas amplitudes do pico a 124 Hz, que corresponde ao número de pás do impulsor de aspiração, 5 pás, e portanto a quinta ordem de rotação do veio. As amplitudes tendem a diminuir conforme se vai aproximando do interior da bomba, ou seja, do ponto 5 para o ponto 7, tal como se observa na tabela 15.

Devido à coincidência da frequência natural a 122 Hz com o pico que surge nos espectros de velocidade a 124 Hz, e sendo que nesta frequência corresponde o impulsor de aspiração da bomba, é indicativo que seja o impulsor a provocar o fenómeno de ressonância na sua frequência fundamental de funcionamento.

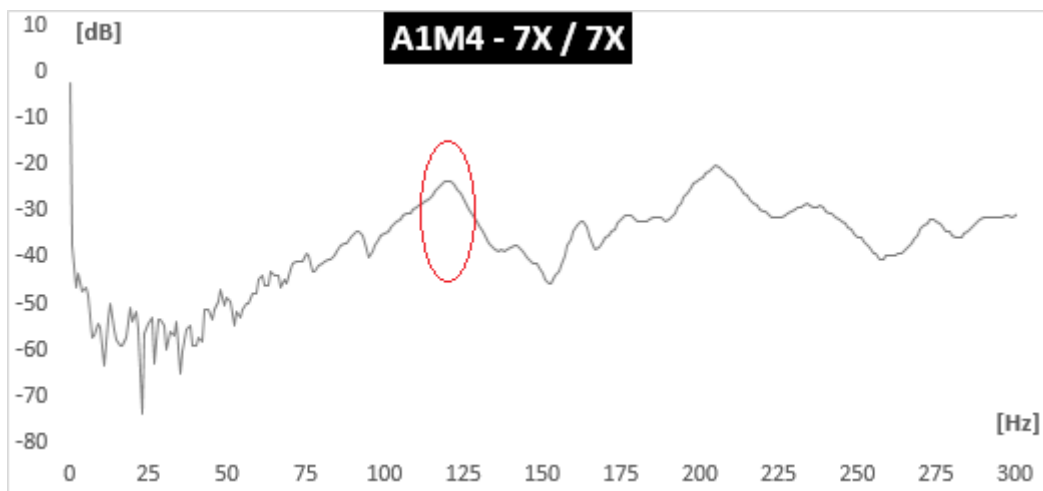


Figura 65 – Gráfico da FRF A1M4 - 7X/7X efetuada com o martelo de ensaio de impacto

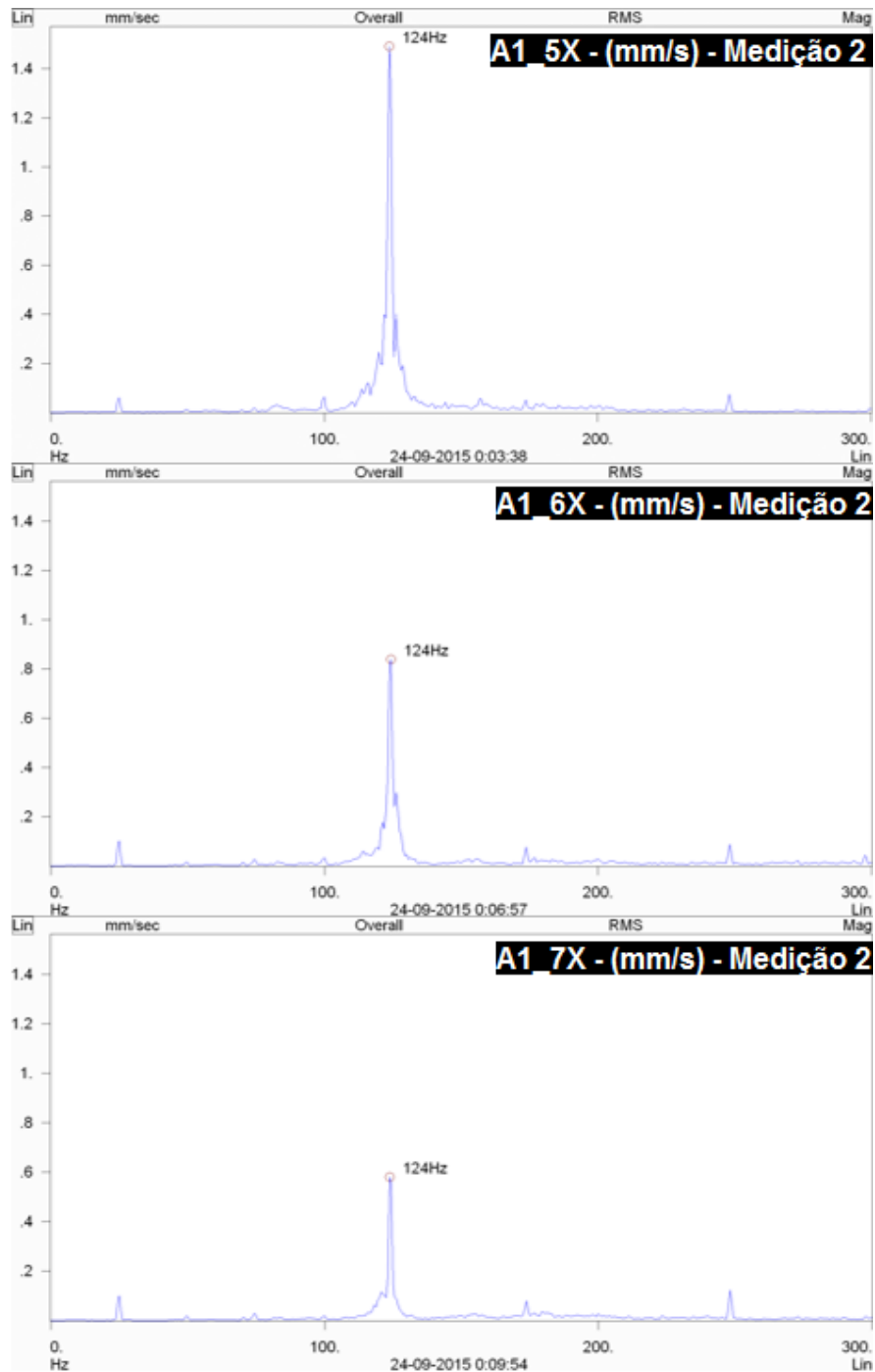


Figura 66 - Espectros de velocidade da medição 2 dos pontos A1_5X, A1_6X e A1_7X

Tabela 15 - Amplitudes de velocidade para 124 Hz dos pontos A1_5X, A1_6X, A1_7X para as três medições

	Velocidade [mm/s]		
	124 Hz		
	A1_5X	A1_6X	A1_7X
Medição 1	0,645	0,65	0,268
Medição 2	1,49	0,839	0,58
Medição 3	0,463	0,157	0,126

Na figura 67 observa-se o gráfico dos valores globais de aceleração gSE para a análise dos rolamentos na bomba A1, com as linhas dos limites referenciados na carta de severidade da figura 59.

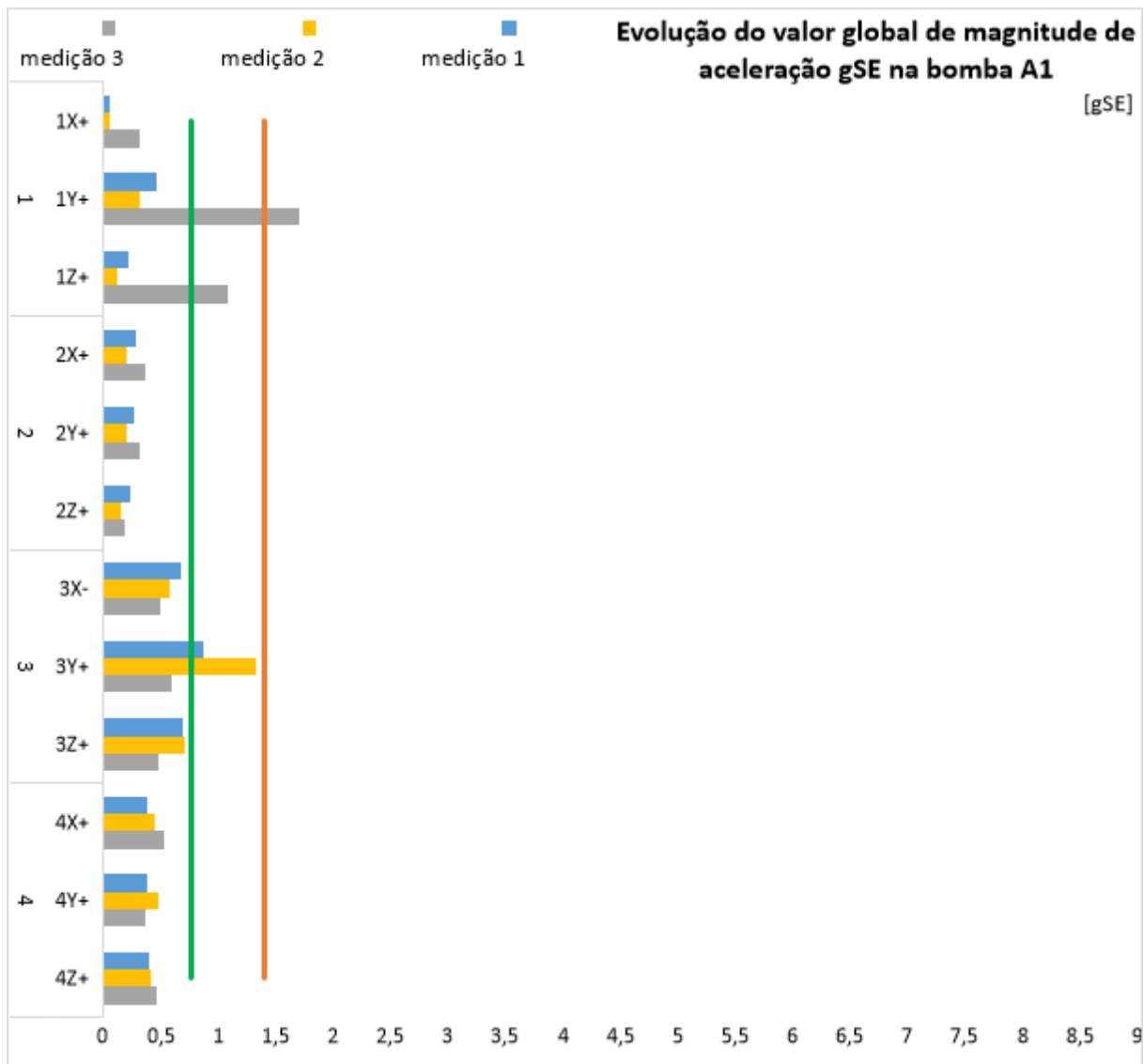


Figura 67 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba A1

O único ponto de interesse é o A1_1Y, nomeadamente a medição 3, realizada após a manutenção. Visualizando os espectros de aceleração gSE da figura 68, referente ao ponto A1_1Y, verifica-se que em termos de amplitude os picos consideram-se insignificantes, em qualquer uma das medições, apesar de haver picos que coincidem com as frequências de defeitos dos rolamentos. A explicação para o aumento acentuado do valor global de gSE da medição 3 deve-se a um possível erro de medição, pois é visível no espectro um excessivo ruído mesmo a baixas frequências. O erro pode estar relacionado com uma calibração deficiente do acelerómetro, ou colocação incorreta sobre uma face que não é perfeitamente plana.

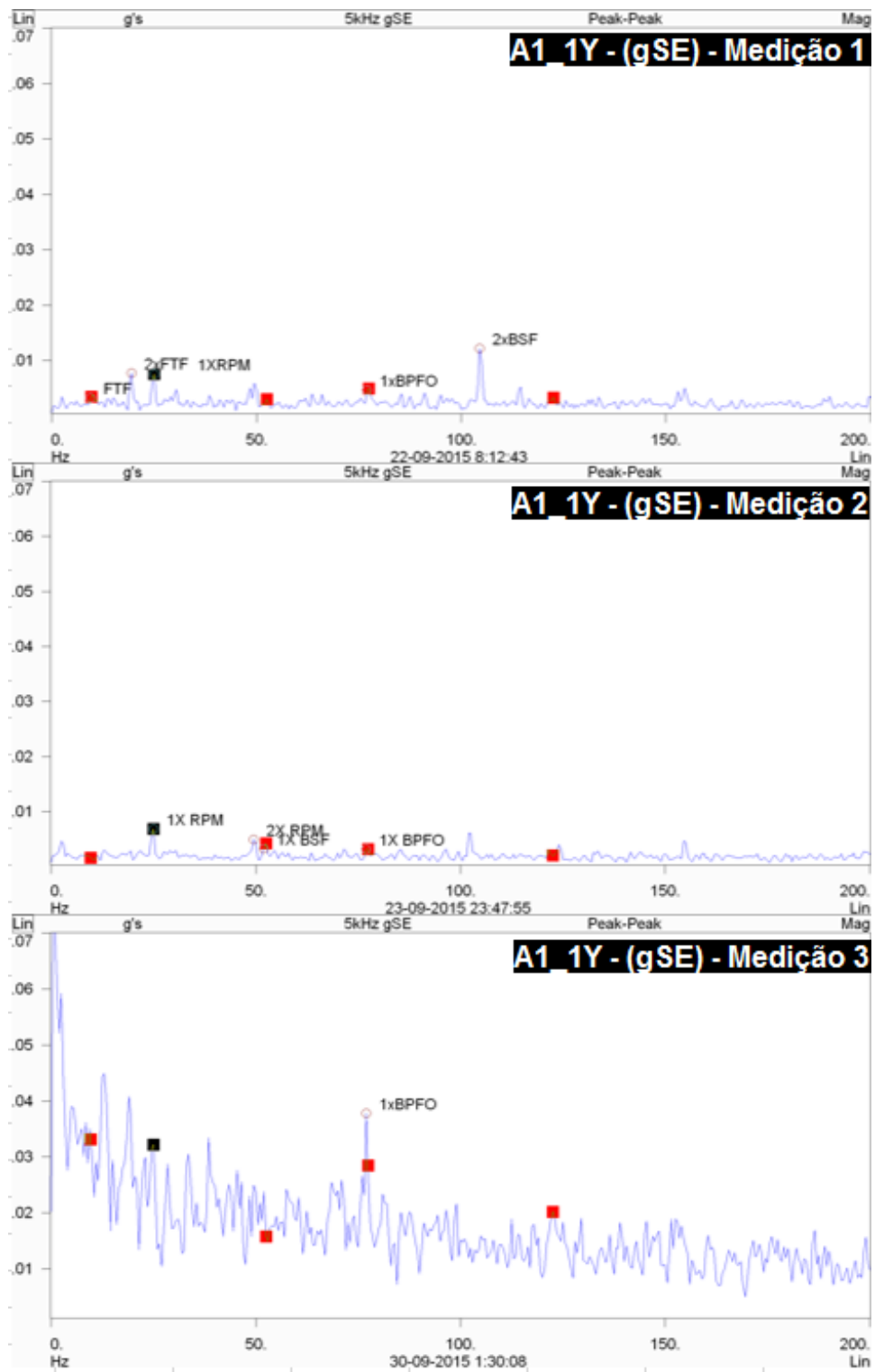


Figura 68 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A1_1Y

3.4.3 – Bomba A2

A figura 69 demonstra o gráfico dos valores globais de magnitude de velocidades das três medições na bomba A2, com a indicação dos limites das zonas de funcionamento de acordo com a norma mencionada, e na figura 70 observa-se o gráfico dos valores globais de magnitude de aceleração.

À semelhança da bomba A1, os valores de magnitude de velocidade situam-se praticamente todos dentro da zona a verde, devido à menor potência dos motores elétricos comparativamente com o grupo B.

Neste caso, a influência das outras bombas simultaneamente em funcionamento não é tão visível, referenciando apenas que a medição 2 ocorreu com a bomba B3 em funcionamento (figura 55), e sendo a situação onde o espaçamento entre equipamentos em operação é maior, já seria de esperar que os valores globais fossem inferiores relativamente às outras duas medições. No caso da medição 1 da figura 54, tem em funcionamento a bomba B1, e na medição 2, acrescenta além da B1, a bomba B3.

Esperava-se portanto que esta última medição resultasse em valores globais de magnitude mais elevados, contudo tal não se verifica, provavelmente devido à operação de manutenção realizada tendo efeito positivo neste parâmetro.

O único ponto a ter em consideração na bomba A2 será o ponto A2_4Z, referente à extremidade da bomba, com valores situados na zona B nas três medições completas.

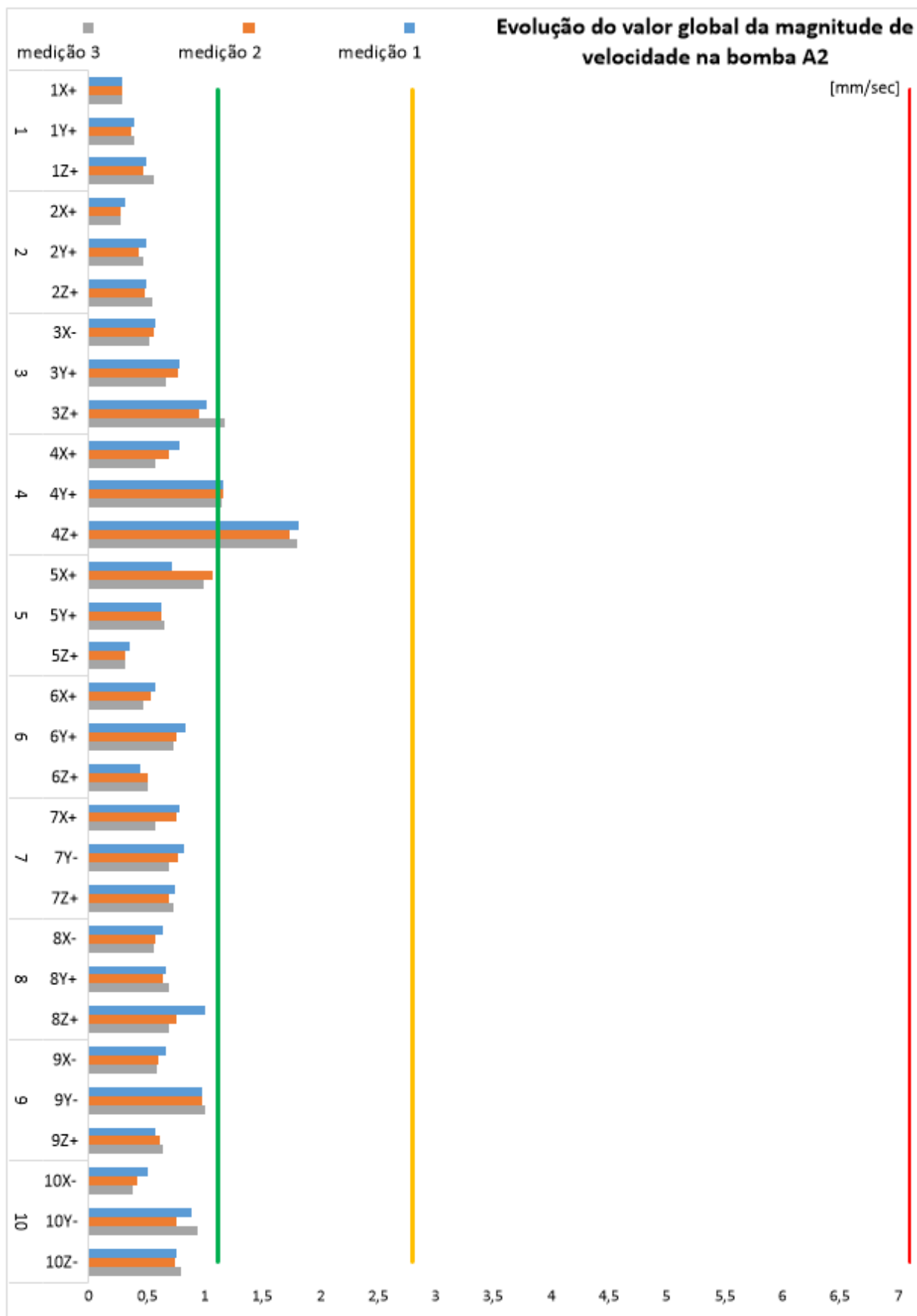


Figura 69 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba A2

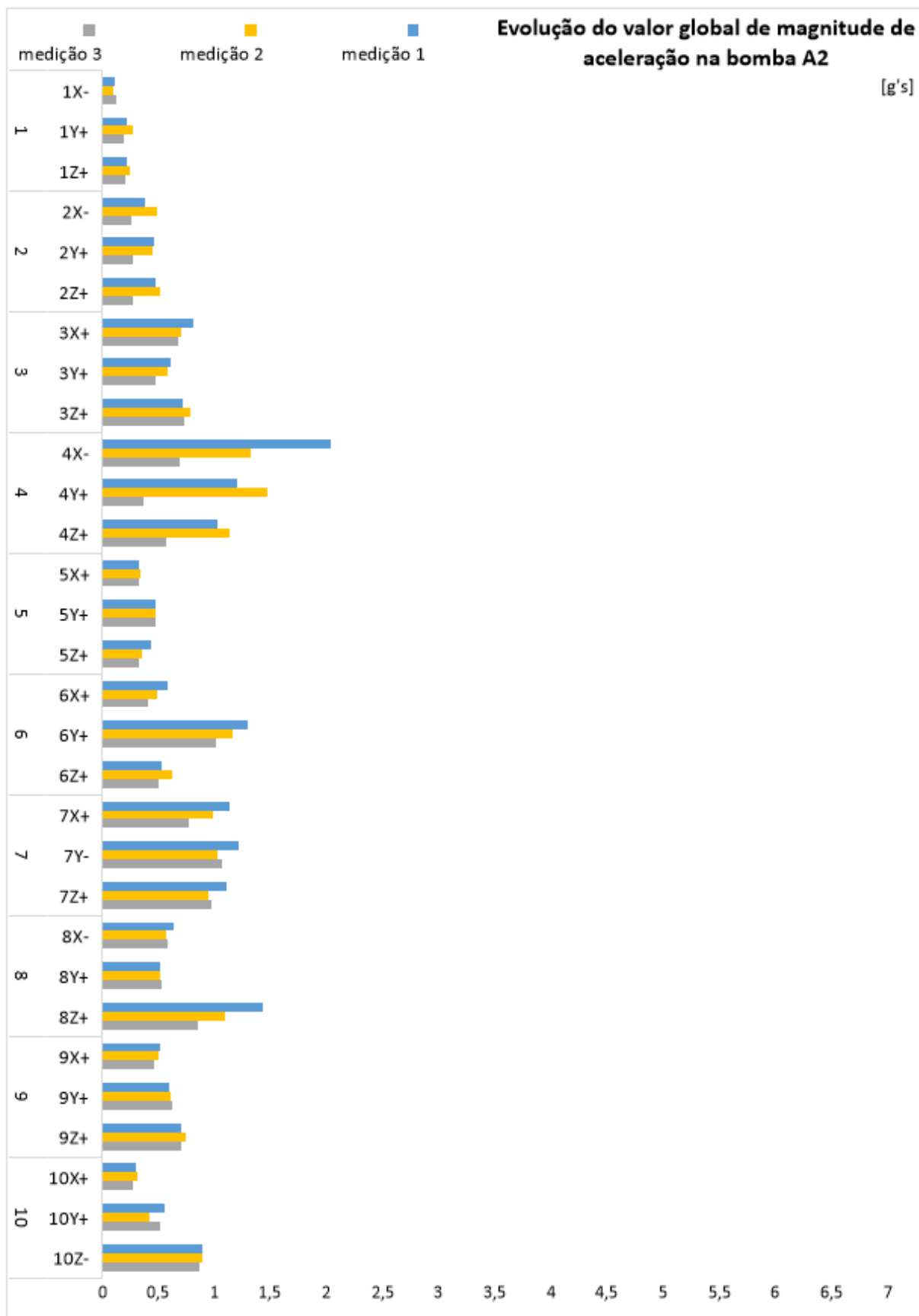


Figura 70 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba A2

No ponto A2_4Z, verificou-se semelhanças, quer em termos de curva, quer em amplitudes dos picos para as três medições (figura 71). A primeira ordem de rotação tem como amplitude 0,28 mm/s, muito inferior a 1,49 mm/s que ocorre a 248 Hz, corresponde no caso, à segunda harmónica da frequência de passagem das pás do impulsor de aspiração (a primeira ordem, com 5 pás, mede cerca de 0,04 mm/s). Indica um possível funcionamento incorreto do impulsor de aspiração.

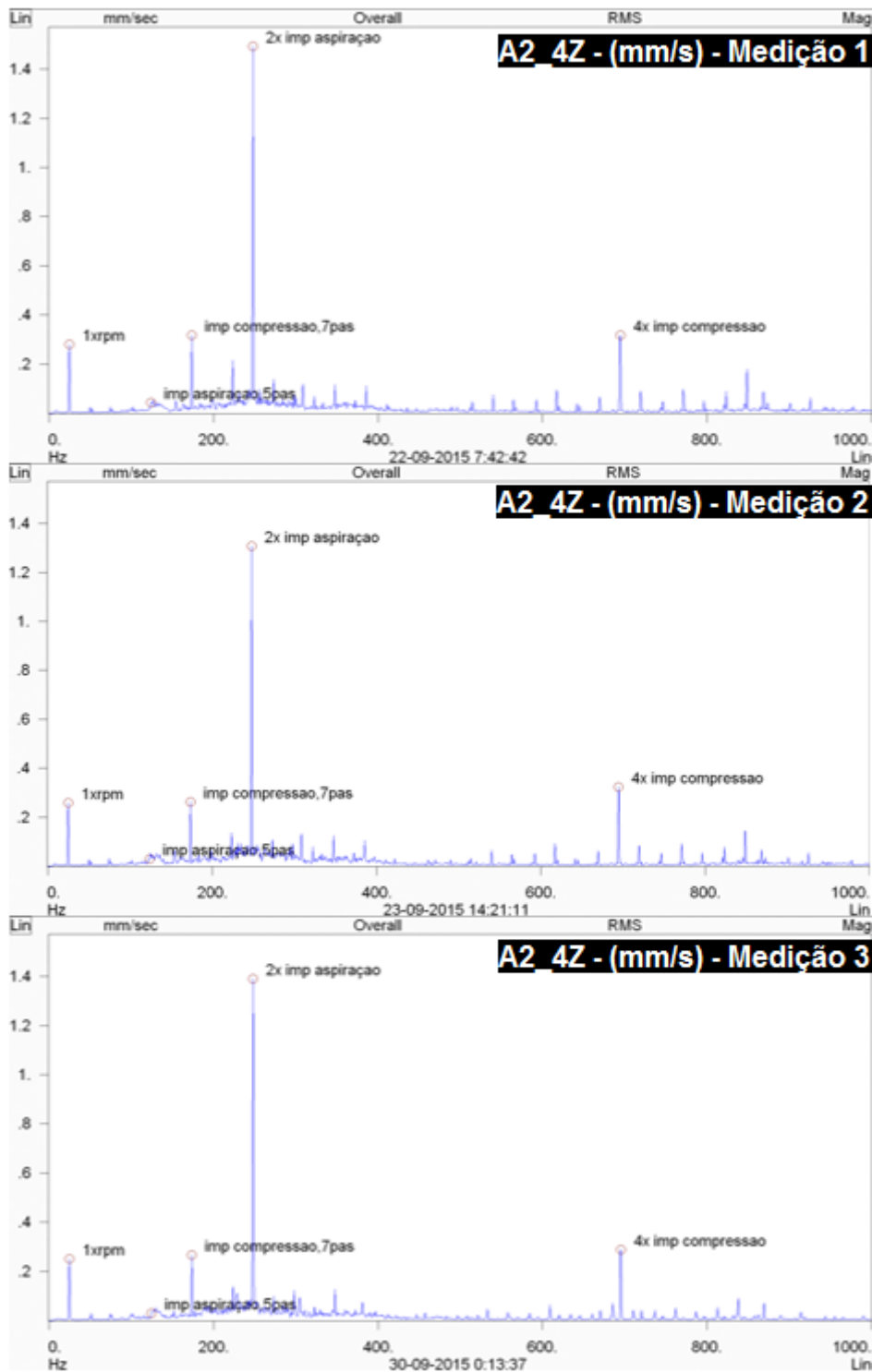


Figura 71 – Espectros de velocidade das três medições do ponto A2_4Z

Na figura 72 observam-se os espectros de aceleração gSE do ponto A2_4Z para as três medições. É possível verificar a influência da manutenção efetuada às bombas. A medição 1 e 2 são bastante semelhantes em picos e amplitudes. O maior pico surge a 77Hz, a medir 0,045 g's na primeira medição, e 0,038 g's na medição 2. A medição 3, não apresenta qualquer pico a realçar.

No entanto, os picos que aparecem nas duas primeiras medições, a 77Hz e conseqüente segunda harmónica a 154Hz, aproximam-se do valor correspondente à frequência de defeito da passagem de uma esfera na pista externa do rolamento, BPFO, sendo que:

$$BPFO_{calculado} = 76,415 \text{ Hz}$$

$$BPFO_{medido_medição1} = 77,145 \text{ Hz} \quad erro = 0,95\%$$

$$BPFO_{medido_medição2} = 77,129 \text{ Hz} \quad erro = 0,93\%$$

Apesar da operação de manutenção, a injeção de massa nos bocais dos rolamentos, tenha aparentemente resolvido os problemas com o rolamento da extremidade da bomba, pode existir na mesma o defeito e estar apenas ocultado temporariamente pela massa nova, não descartando a sua substituição se o problema se acentuar.

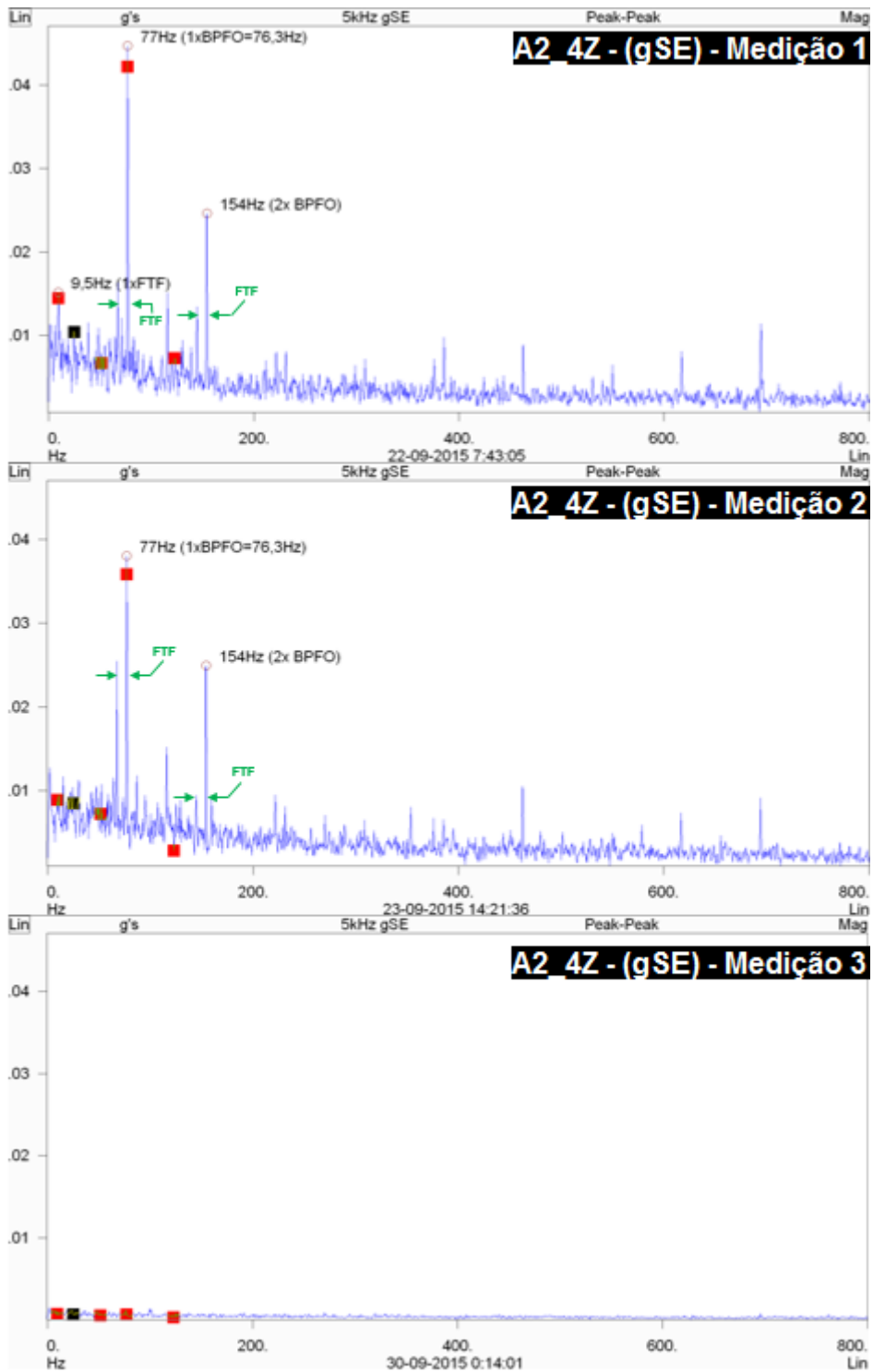


Figura 72 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A2_4Z

Na figura 73, ilustra-se o gráfico dos valores globais de aceleração gSE para os rolamentos na bomba A2, com as linhas dos limites referenciados na carta de severidade da figura 59.

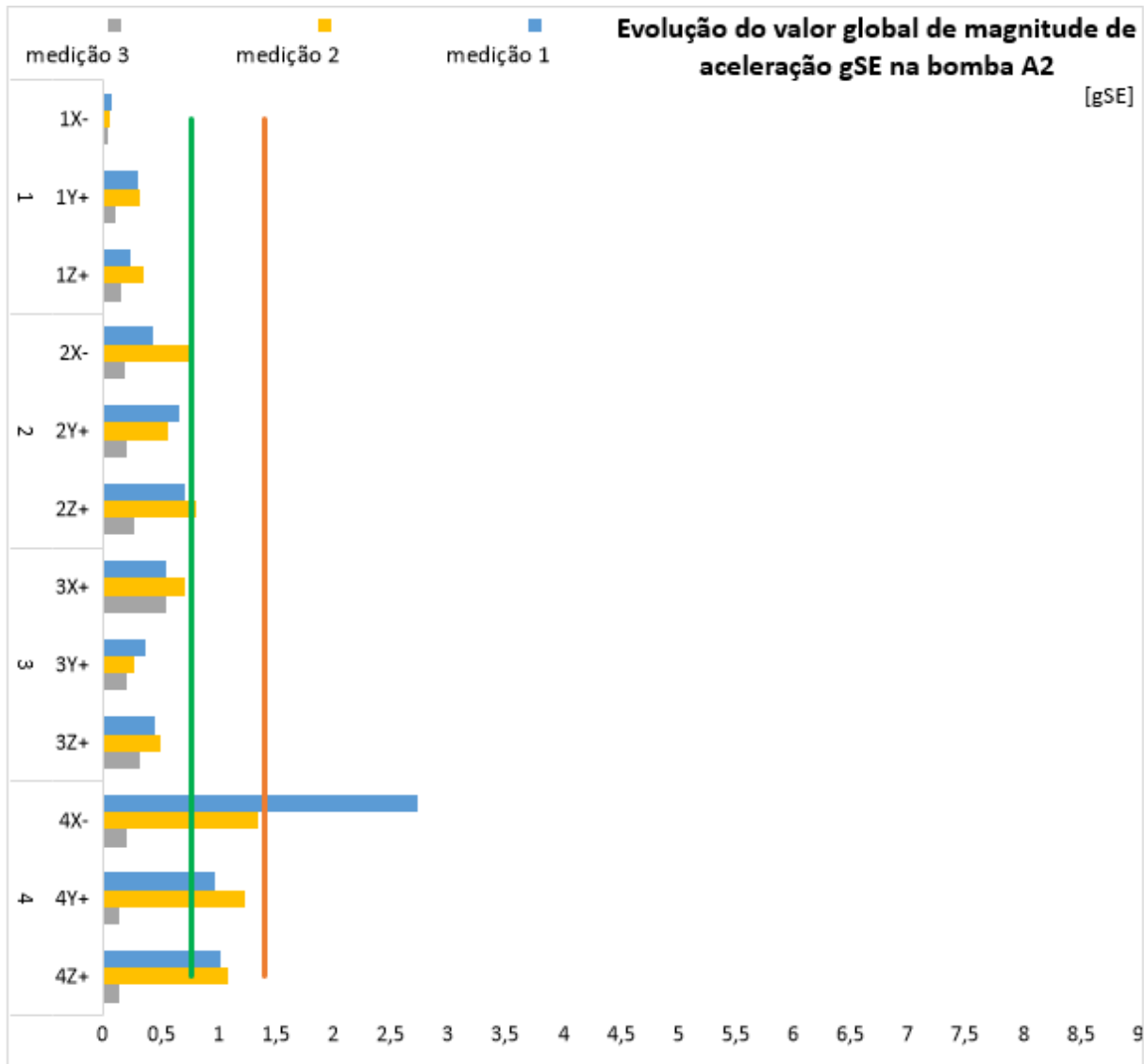


Figura 73 – Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba A2

Fica explícito o resultado que a injeção de massa teve nos rolamentos e no seu funcionamento, pois o valor global da medição 3 é inferior em todos os pontos que foram medidos. Os pontos de medição no geral mantêm-se abaixo do limite inferior da zona não aceitável, exceto a medição 1 do ponto A2_4X, referente à extremidade da bomba, na direção axial ao veio do motor.

Pela figura 74, que diz respeito aos espectros de aceleração gSE das três medições no ponto A2_4X, observa-se um pico na primeira medição a 77 Hz, de 0,21 g's. A frequência corresponde à frequência de defeito do rolamento na pista externa, BPFO, e é visível também as segundas e terceiras harmônicas. A mesma situação acontece na medição 2, mas desta vez a amplitude 1x BPFO diminuiu para 0,073 g's, bem como as respectivas harmônicas tiveram uma redução de amplitude gSE.

Já na terceira medição, efetuada após a manutenção, o espectro não mostra qualquer pico, indicando que a bomba estaria a necessitar de massa aquando das duas primeiras medições, não descartando a hipótese de um possível defeito na pista externa do rolamento caso os picos voltem a surgir.

O elevado valor global na figura 73 pode ser explicado pela amplitude verificada na medição 1 da figura 74, bem como pela carga na altura da medição 1, resultado da influência das outras bombas em funcionamento.

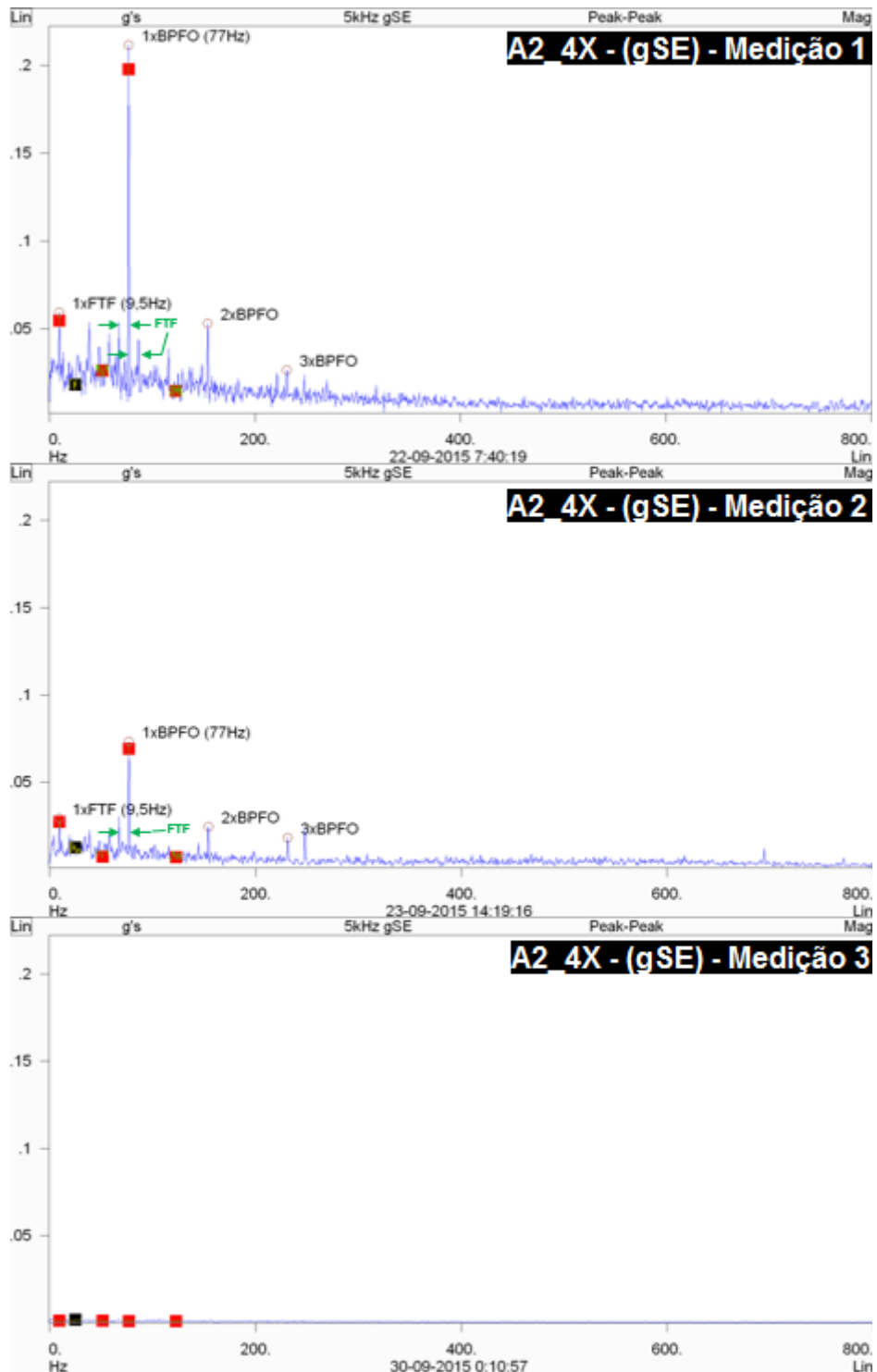


Figura 74 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto A2_4X

3.4.4 – Bomba B1

A primeira grande diferença que se nota das eletrobombas do grupo A para o grupo B é a capacidade das bombas, e a potência dos motores. No grupo A os valores globais mantinham-se praticamente todos abaixo do limite a verde, e portanto na zona A. Já no grupo B, os valores globais rondam a zona B, e como tal, não serão feitas referências a todos os casos que se situem nessa, tal como aconteceu nos dois subcapítulos anteriores para o grupo A.

Na figura 75, mostra-se o gráfico dos valores globais de magnitude de velocidade das três medições efetuadas na bomba B1, com a indicação dos limites das zonas de funcionamento segundo a norma aplicada.

Observando os esquemas de funcionamento das medições, das figuras 54 a 56, verifica-se que nas três medições feitas à bomba B1, a bomba A1 estava também em funcionamento, e na medição 1 eram as duas únicas bombas em operação, e portanto onde se espera valores globais mais baixos. Já na medição 2, acrescentou-se a bomba B2, e na medição 3 estava em funcionamento a bomba B3 no lugar da bomba B2. Isto faz com que se espere um valor global de magnitude mais elevado na medição 2, por existir uma maior proximidade entre bombas, comparando com a medição 3.

Examinando o gráfico da figura 75, pode-se reparar que, a nível geral, o valor global de magnitude na medição 2 é superior comparativamente com as outras duas medições, e a medição 1 também surge como sendo a que tem menor amplitude, confirmando a lógica da influência do esquema de funcionamento das bombas.

Por observação do gráfico dos valores globais de magnitude de aceleração da figura 76, fica explícita a influência das mangas flexíveis existentes no grupo B. Existe uma manga à entrada da bomba, localizada entre o ponto 6 e 7, e uma outra à saída da bomba, localizada entre o ponto 9 e 10.

Estando a bomba em funcionamento, a resposta diminui significativamente nos pontos 5 e 6, no caso da entrada, e no ponto 10, na saída, em qualquer uma das três direções, e verifica-se o mesmo comportamento nas três medições efetuadas, demonstrando assim a utilidade das mangas de expansão na função de isolar as vibrações geradas do interior para o exterior, isto é, do motor e bomba para as restantes estruturas da sala de máquinas.

Aborda-se adiante apenas o ponto B1_9Z, por ser o único ponto em que o valor global de velocidade das três medições se situa na zona C, com linha limite a cor vermelha, indicando que poderá causar problemas em situações de longos períodos de tempo em funcionamento.

De referir que, não foi possível identificar por completo as bombas do grupo B, por ausência das chapas de identificação, faltando assim informações sobre os impulsores, nomeadamente quantas pás têm e quantas passagens de difusores têm, se aplicável.

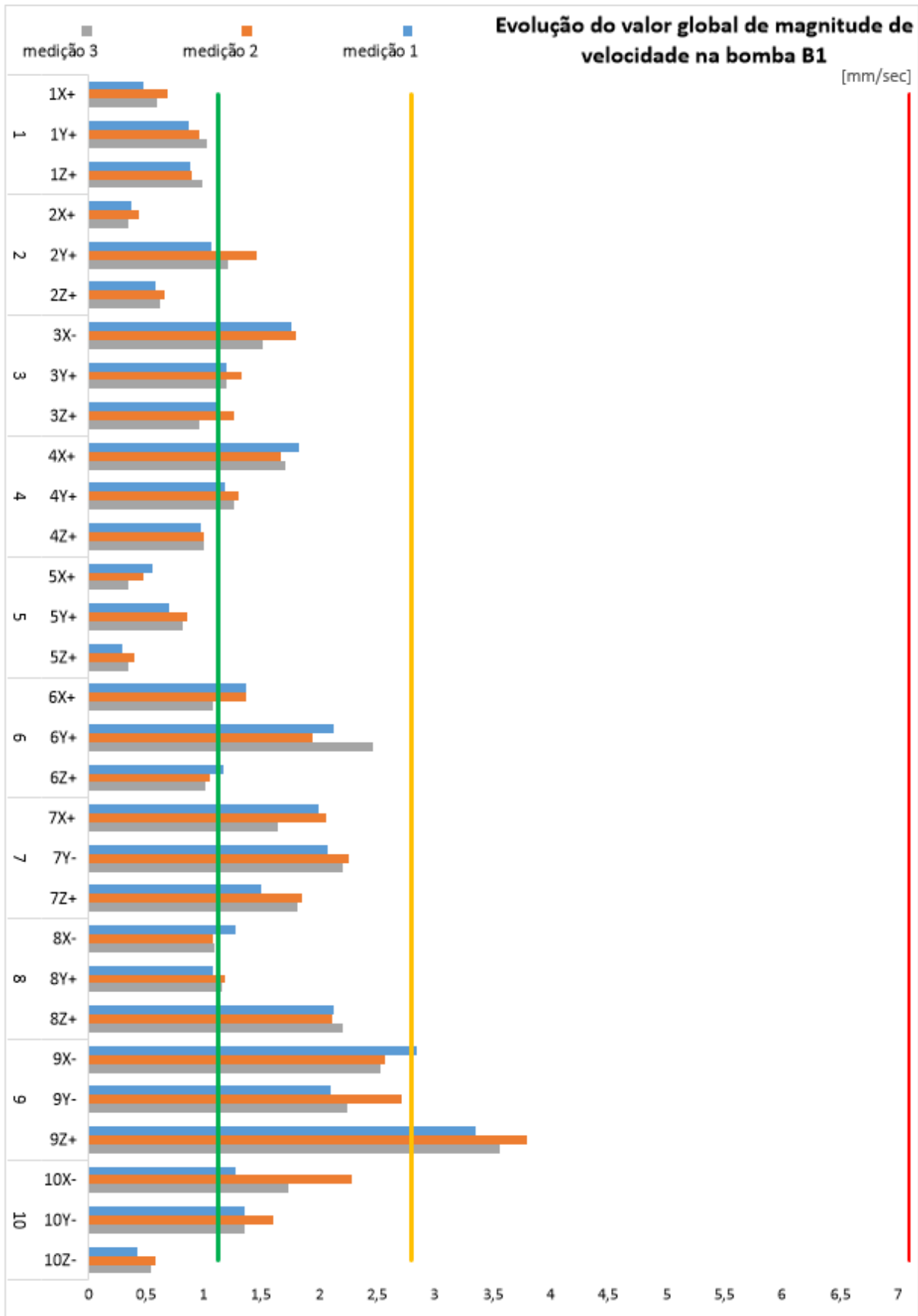


Figura 75 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B1

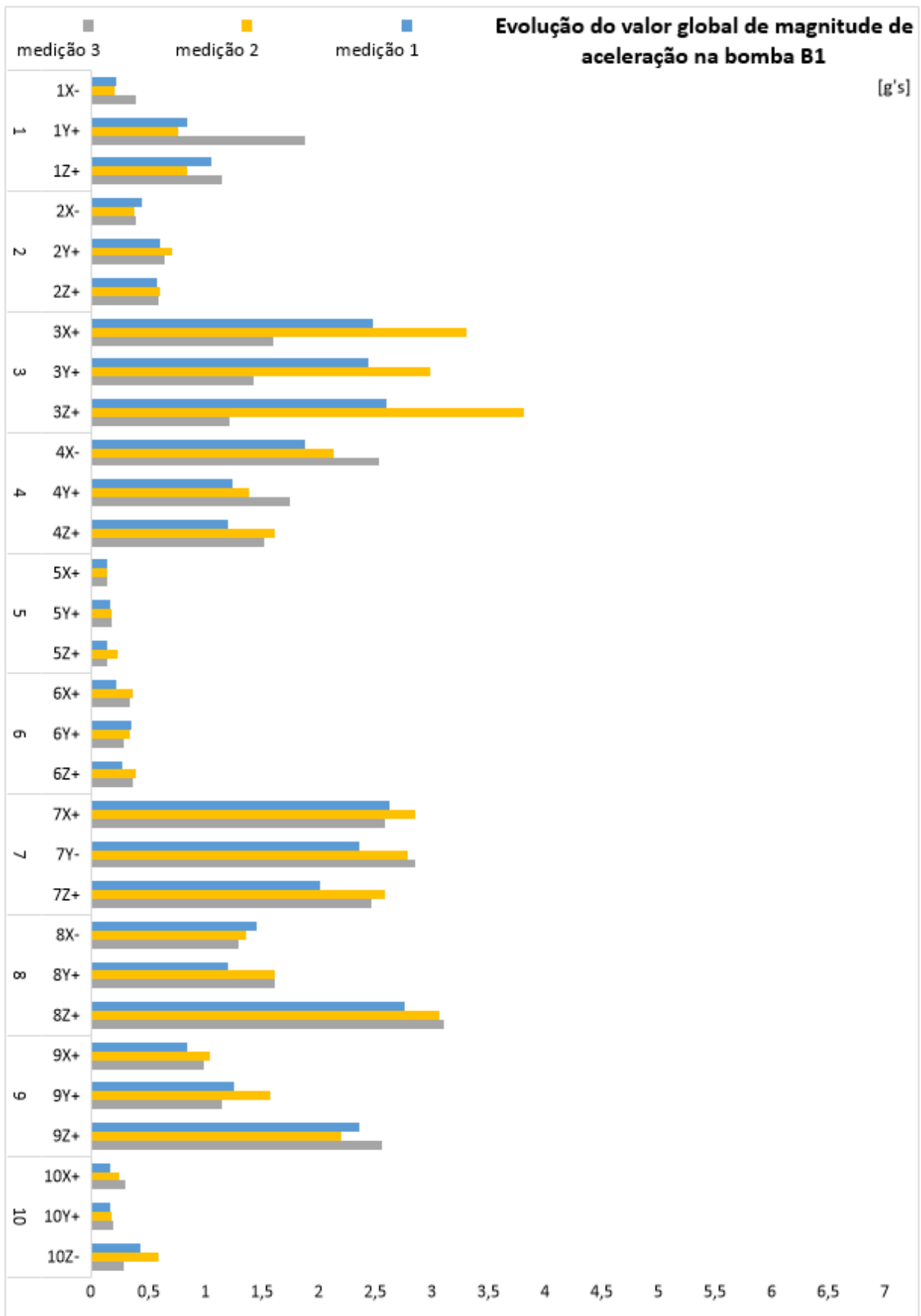


Figura 76 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B1

Na figura 77 observa-se os espectros de velocidade e aceleração para o B1_9Z, referentes à medição 3, uma vez que em termos de curvas, as restantes medições são semelhantes, não sendo necessário ilustrar, mas as amplitudes dos picos mais relevantes estão descritas na tabela 16.

O espectro de velocidade não apresenta informação suficiente que explique diretamente os elevados valores globais de velocidade, uma vez que pela ilustração têm uma gama de 0 a 900 Hz. No entanto, observando o espectro de aceleração, verifica-se um pico um uma amplitude relativamente elevada a 1045 Hz (2,12 g's), e que portanto é informação que ser perdeu na primeira janela, indicando que possivelmente no espectro da velocidade existiria um pico de amplitude elevada na frequência de 1045 Hz.

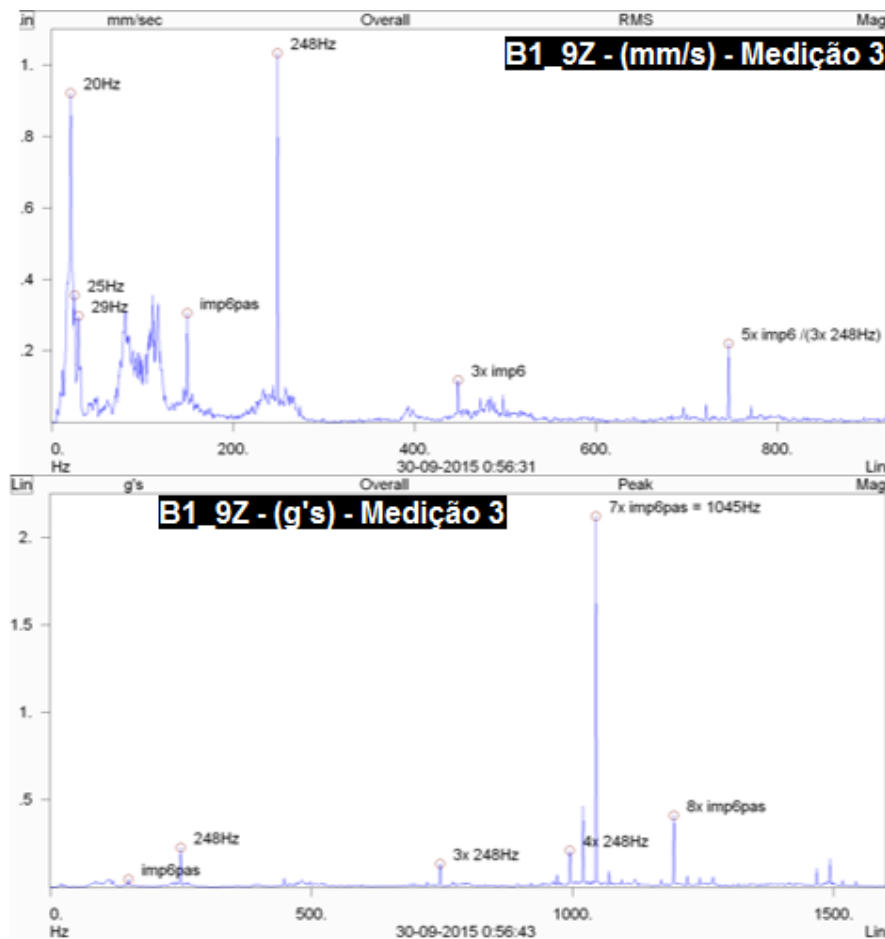


Figura 77 - Espectros de velocidade e aceleração para o ponto 9Z da bomba B1, medição 3

Tabela 16 - Amplitudes de velocidade e aceleração para picos no ponto B1_9Z

B1_9Z [Hz]	Velocidade [mm/s]					Aceleração [g's]	
	20	25	30	149	248	248	1045
Medição 1	0,89	0,27	0,7	0,24	0,81	0,2	1,92
Medição 2	1,01	0,59	0,22	0,36	0,36	0,21	1,51
Medição 3	0,92	0,36	0,3	0,31	1,03	0,23	2,12

A par da limitação do espectro de velocidade, existem outros 3 picos relevantes. Dois surgem a baixas frequências, a 20 Hz e a 30 Hz, que pode ser resultado da proximidade de frequências naturais e provocar o fenómeno de ressonância, como se verifica na figura 78, a aproximadamente 21 Hz e 30 Hz, respetivamente.

A resposta livre do gráfico FRF é referente à bomba B2, mas que por semelhança de bombas, considera-se que as frequências naturais serão aproximadamente idênticas.

Um outro pico ocorre a 248 Hz, visível em ambos os espectros, com elevadas amplitudes, que por não ter total conhecimento das especificações dos impulsores das bombas do grupo B, a identificação dos picos fica pendente, sendo no entanto provável que pelo menos um dos impulsores tenha 6 pás, pelo aparecimento de uma resposta a 1045 Hz, que coincide com uma harmónica do impulsor.

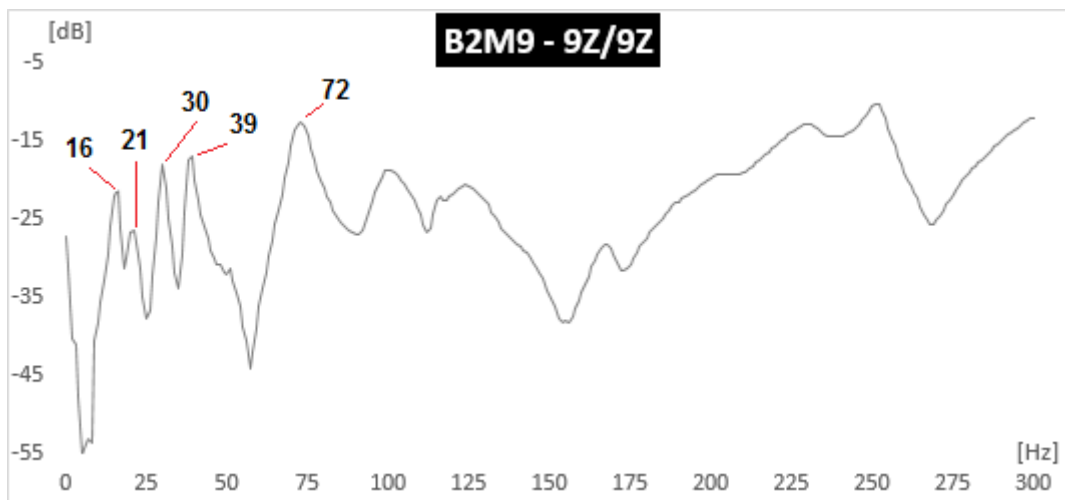


Figura 78 - Gráfico da FRF B2M9 - 9Z/9Z efetuada com o martelo de ensaio de impacto

Na figura 79, ilustra-se o gráfico dos valores globais de aceleração gSE para os rolamentos na bomba B1, com as linhas dos limites referenciados na carta de severidade da figura 59.

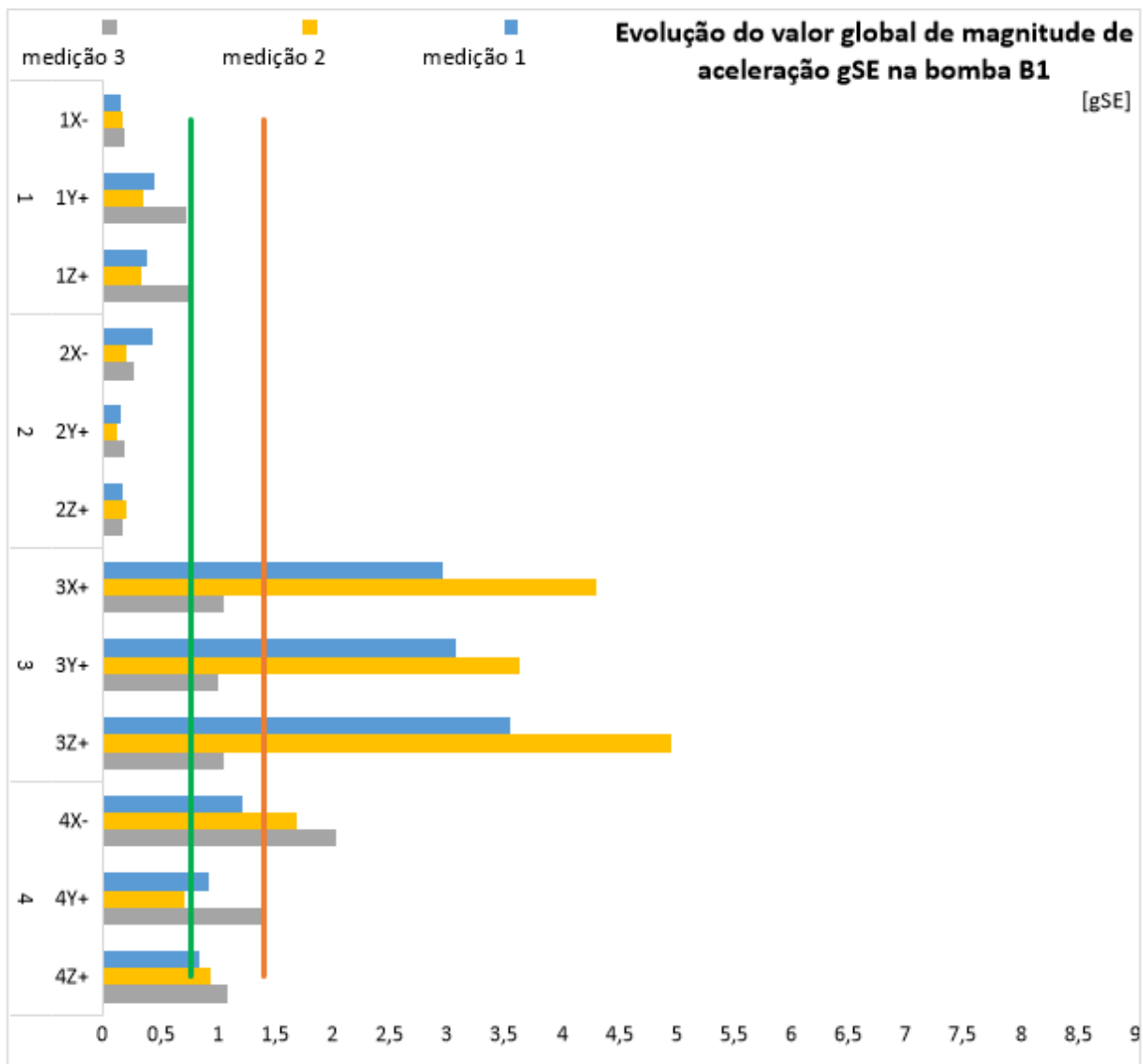


Figura 79 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B1

Neste caso da bomba B1 não é notável a influência da operação de manutenção efetuada, em termos de valores globais, no entanto nos pontos da localização 3 verifica-se esse facto, que faz parte também dos pontos que excedem em amplitude o limite inferior da zona não aceitável.

Na figura 80, ilustra-se os espectros de aceleração gSE das três medições do ponto B1_3X. Na medição 1, o espectro aparece com algum ruído, mas com um pico coincidente com o defeito BPFO, de amplitude relativamente baixa e com consequentes bandas laterais.

Na medição 2 observa-se um pico de amplitude 0,15 g's a 358 Hz e um outro pico a 538 Hz com amplitude 0,096 g's, que correspondem à segunda e terceira harmónica, respetivamente, do defeito de rolamento de pista externa, BPFO (179 Hz).

Relativamente à medição 3, o espectro aparece limpo, sem qualquer pico, indicando que a injeção de massa surtiu efeito nos rolamentos, visível nos espectros, resultando assim num valor global abaixo do limite de aceitação e inferior à medição 1 e 2.

A explicação para os elevados valores globais na medição 1 deve-se ao ruído, que resulta de uma possível má colocação do acelerómetro, o que resulta a não ser explícito nenhum pico relevante no espectro. Na medição 2, deve-se também essencialmente ao ruído, uma vez que a influência das bombas adjacentes não tem tanto significado a altas frequências, apesar de existir uma maior carga na medição 2.

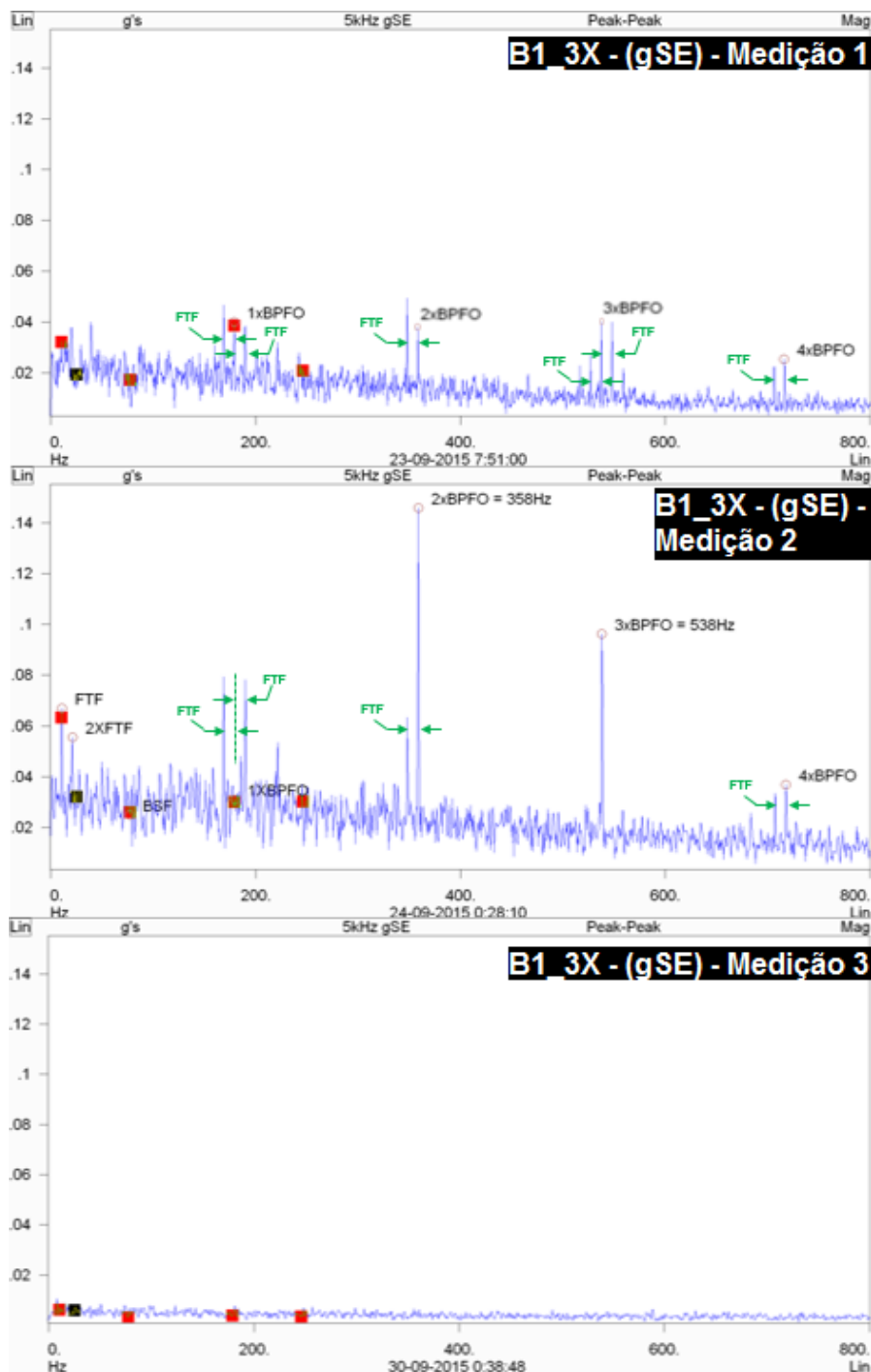


Figura 80 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3X

A figura 81 ilustra as três medições do espectro de aceleração gSE do ponto B1_3Y. Na medição 1 observa-se um possível defeito na pista externa, BPFO, sendo que o valor calculado deste defeito ocorre a 179 Hz. Apesar de não existir um pico nessa frequência, observam-se as três primeiras harmônicas, ou seja, até à quarta ordem da frequência do BPFO.

Abaixo da velocidade de rotação da bomba, há um pico correspondente ao defeito FTF em conjunto com segunda e terceira ordem de frequência. As frequências FTF geralmente não ocorrem isoladas, neste caso é compreensível devido às frequências de BPFO.

Observa-se ainda a 168 Hz um pico de amplitude 0,08 g's. Este pico é resultado do BPFO, uma vez que a frequência que separa a frequência do defeito BPFO (179 Hz) dos 168 Hz corresponde à FTF (aproximadamente 10,5 Hz).

Na medição 2, a frequência de defeito da pista externa contínua visível e desta vez com uma amplitude ligeiramente superior, derivado da maior carga imposta na medição 2, por observação do esquema de funcionamento das figuras 54 a 56. Neste caso aparece um pico visível correspondente à primeira ordem da frequência do defeito BPFO, juntamente com a segunda e terceira harmônica.

Já na medição 3, o espectro dos gSE não mostra qualquer pico, sendo praticamente linear.

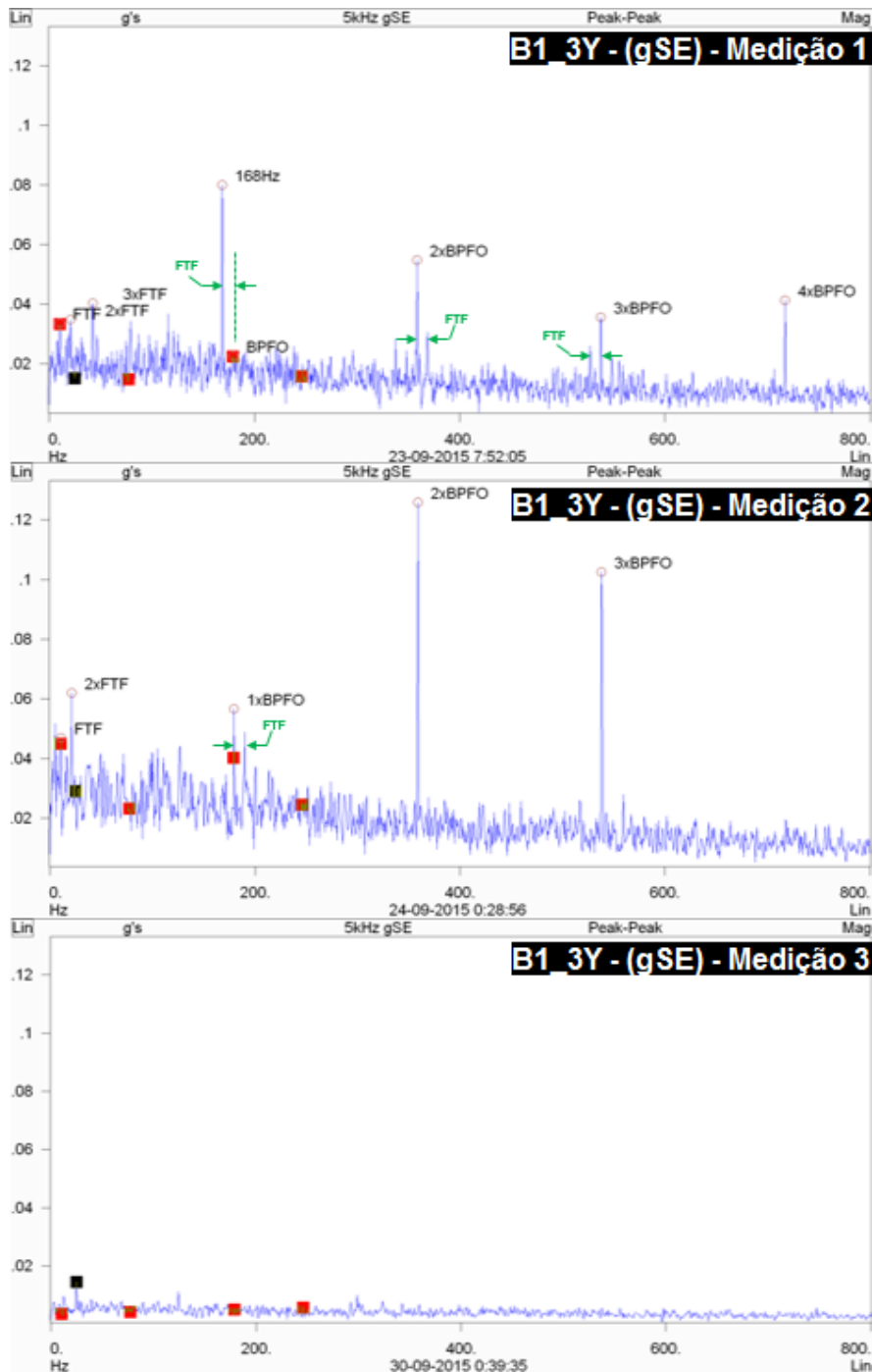


Figura 81 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3Y

A figura 82 refere-se ao espectro de aceleração gSE das três medições no ponto B1_3Z. É visível nas medições 1 e 2, a frequência de defeito BPFO e até à quarta harmónica, indicando que existe problemas na pista externa do rolamento da bomba junto ao acoplamento. O espectro da medição 1 tem contudo amplitudes mais baixas, devido a uma maior carga na medição 2.

Por observação da medição 3, pode sugerir que o rolamento está em perfeitas condições, no entanto, o problema pode estar presente e apenas estar ocultado pela aplicação recente da massa, não demonstrando assim o verdadeiro estado de conservação do rolamento, que pode não ser um problema

físico (fissura na pista externa), mas pode ser apenas excessiva fricção entre os elementos rolantes e a pista externa, para a carga normalmente aplicada.

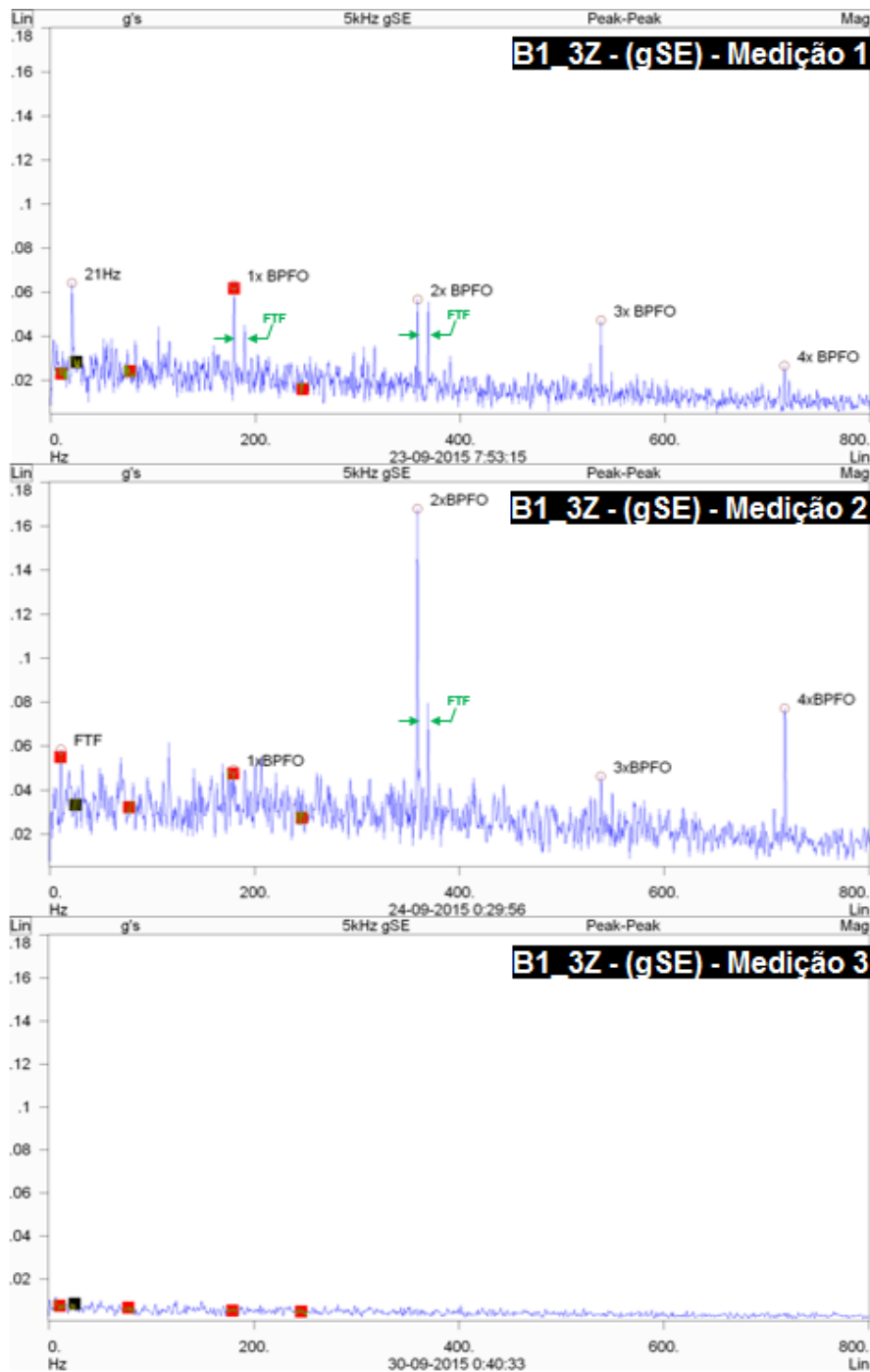


Figura 82 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B1_3Z

Relativamente ao último ponto que apresenta valores globais acima do limite aceitável, ponto 4X, e após análise dos espectros de aceleração em gSE, constatou-se que trata-se apenas de ruído, um pouco mais elevado no caso da medição 3, resultado de um possível erro de medição com uma incorreta colocação do acelerômetro, ou pela localização ser na face da tampa da bomba, fazendo com que o ruído aumente e encubra a resposta do sistema.

3.4.5 – Bomba B2

A figura 83 representa o gráfico dos valores globais de magnitude de velocidade para as três medições na bomba B2. Mantém-se a tendência para valores mais elevados comparativamente com o grupo A. Antes de analisar a bomba B2, terá de se referir que não foi feita a operação de manutenção à bomba, injeção de óleo novo nos rolamentos, pois esta utiliza um outro tipo de óleo com uma composição diferente, portanto a manutenção não será fator influente no valor global da magnitude.

Observando os esquemas de funcionamento das bombas, das figuras 54 a 56, verifica-se que na medição 1, apenas a bomba A1 estava em funcionamento, e portanto com um espaçamento suficientemente largo para não ter grande influência nos valores globais.

Já na medição 2, estava em funcionamento a bomba A1 mas também a bomba B1, esta última adjacente à bomba em medições.

A medição 3 foi um caso único em que se mediu a bomba B2 individualmente, ou seja, sem mais nenhuma outra bomba em operação. Seria então de esperar que a medição 3 tivesse um nível global de magnitudes inferior, contrariamente à medição 2 que se esperava um acréscimo em relação às medições 1 e 3.

No entanto, analisando o gráfico da figura 83, chega-se à observação que a medição 1 é a que no geral tem valores superiores, e é também menos esperado que a medição 3 tenha certas localizações onde chega a ser claramente maior no valor global de magnitude, não havendo neste caso da bomba B2 uma lógica direta com o esquema de funcionamento.

No gráfico dos valores globais de magnitude de aceleração para as três medições na bomba B2 (figura 84), constata-se o mesmo efeito das mangas de expansão, que se verificou na bomba B1, sendo que as amplitudes globais de aceleração são menores nos pontos 5 e 6, junto à entrada na bomba, e no ponto 10, à saída da bomba, embora que neste último ponto essa diferença só é notável na medição 3.

O ponto 3X, localização na bomba junto ao acoplamento, na direção axial ao veio do motor, é um ponto relevante pois situa-se na zona de funcionamento C, uma vez que os valores globais das três medições excedem o limite de 2,8 mm/s da zona B. Também interessa o ponto 8Z, à saída na bomba na direção vertical, pelas mesmas razões.

Relativamente à medição 2 do ponto 9Z, apenas tem interesse anotar que de facto quando existem bombas adjacentes em funcionamento, os valores globais junto às saídas das condutas podem se exceder ligeiramente.

De referir novamente que não foi possível identificar na totalidade as bombas do grupo B, por ausência das chapas de identificação, faltando assim a informação do número de pás de cada impulsor e do número de passagens de difusores, se aplicável.

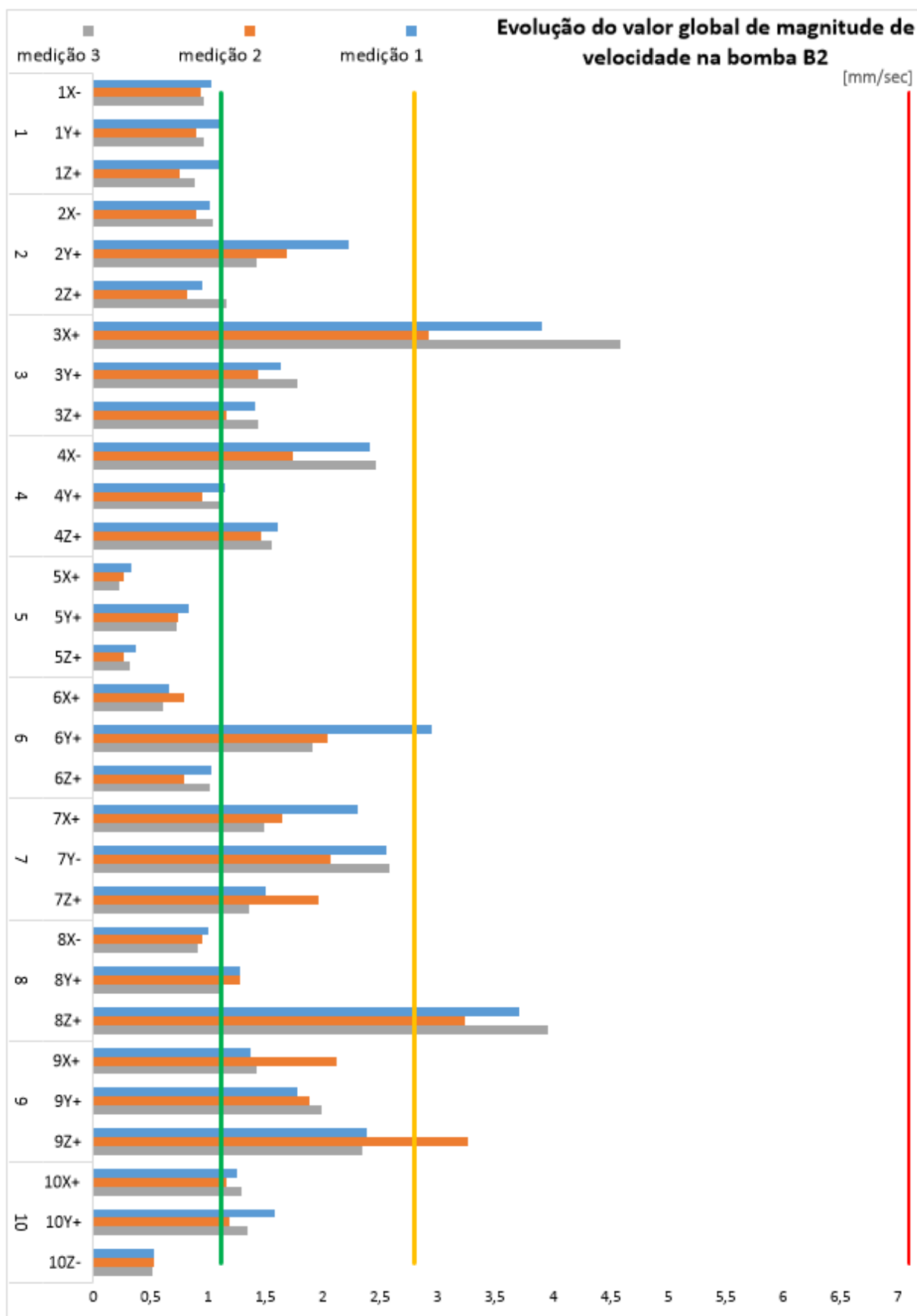


Figura 83 -Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B2

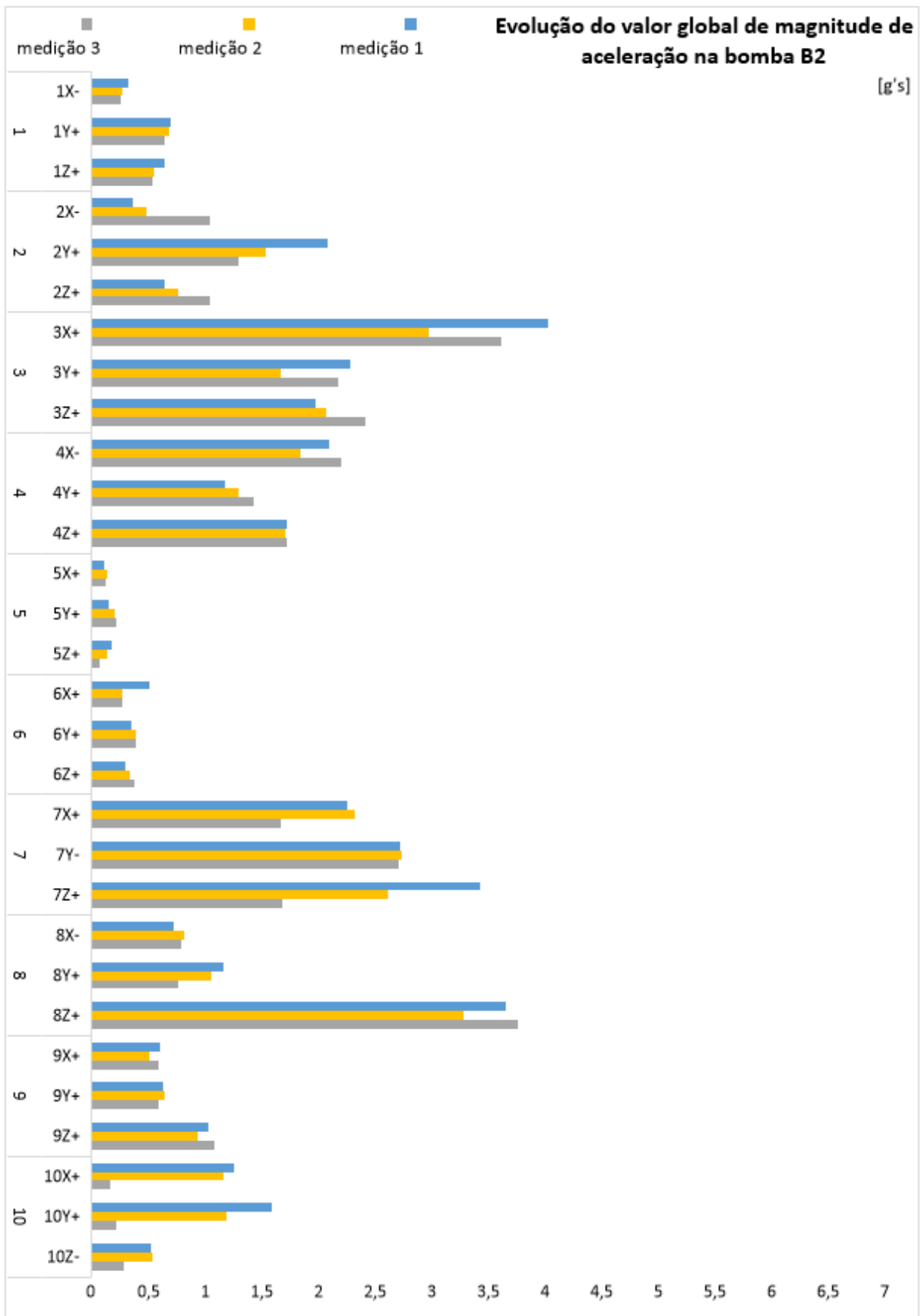


Figura 84 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B2

Na figura 85 observam-se os espectros de velocidade e aceleração da medição 3, referentes ao ponto B2_3X. Em termos de espectros, as medições 1 e 2, apresentam picos semelhantes, apenas com amplitudes diferentes, descritas na tabela 17 para dois picos relevantes, 746 Hz e 970 Hz.

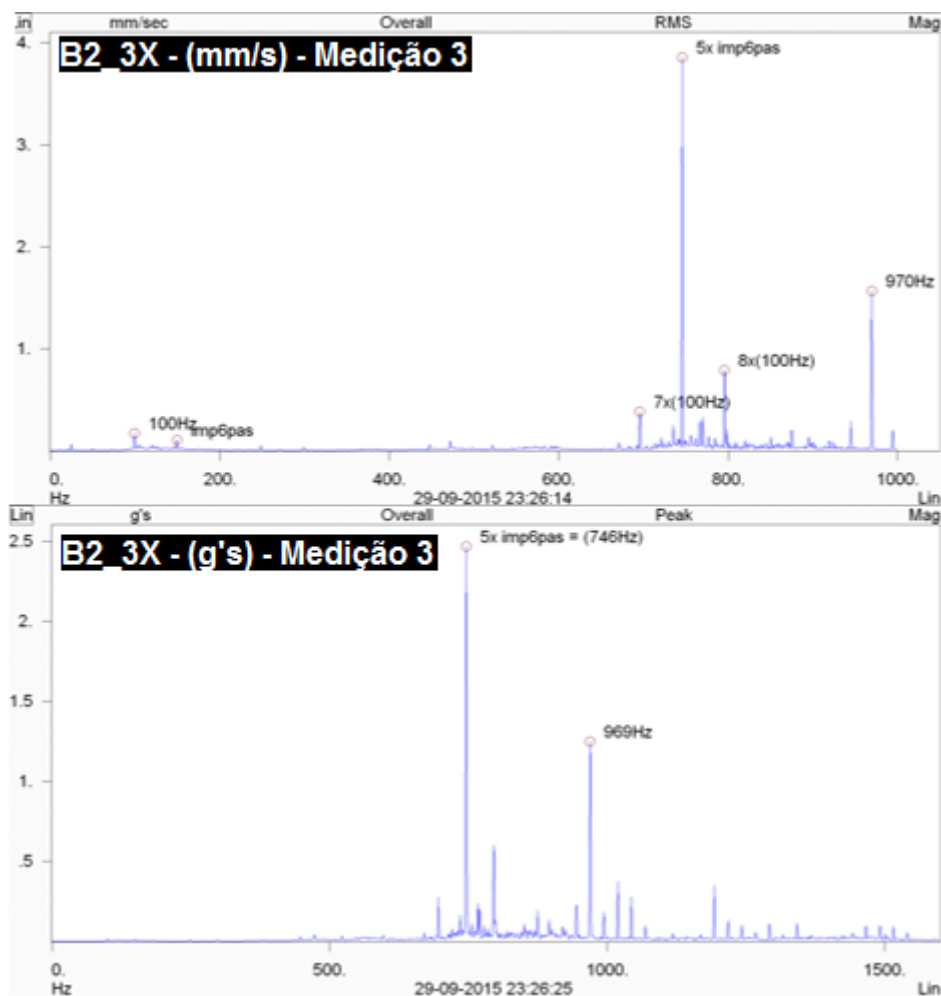


Figura 85 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B2_3X

Tabela 17 - Amplitudes dos picos de velocidade e aceleração do ponto B2_3X para as três medições

	Velocidade [mm/s]		Aceleração [g's]	
	746 Hz	970 Hz	746 Hz	970 Hz
Medição 1	2,8	1,59	2,02	1,32
Medição 2	2,07	1,15	1,47	0,97
Medição 3	3,86	1,56	2,47	1,25

Na medição 3 houve um acréscimo na amplitude a 746 Hz, que não têm influência do funcionamento das outras bombas, uma vez que na medição 3, a bomba B2 está a funcionar isoladamente. Não sabendo por completo a informação sobre as bombas, pouco se pode concluir acerca dos picos, podendo coincidir com uma harmónica dos impulsores (neste caso a quinta harmónica caso o impulsora tenha 6 pás), e indicando um problema com o mesmo.

Na figura 86 demonstra-se os espectros de velocidade e aceleração do ponto B2_8Z, referentes à medição 3. As restantes medições não apresentavam picos adicionais que merecessem destaque, não sendo necessário apresentar os respetivos espectros, mas ficam registados as amplitudes na tabela 18. No espectro da velocidade verifica-se que as amplitudes não são suficientemente elevadas para causar os valores globais de velocidade que se demonstram na figura 83.

Por outro lado, no espectro da aceleração, o maior pico surge a 1045 Hz, frequência que já não é visível na gama de frequências do espectro de velocidade, mas que caso a gama das medições fosse mais larga, iria ser possível observar um pico de elevada amplitude em mm/s nessa mesma frequência.

Mais uma vez, por falta de informações relativamente aos impulsores do grupo B, não se consegue identificar os picos, no entanto, poderá coincidir com a quinta harmónica de um dos impulsores, caso este tenha 6 pás.

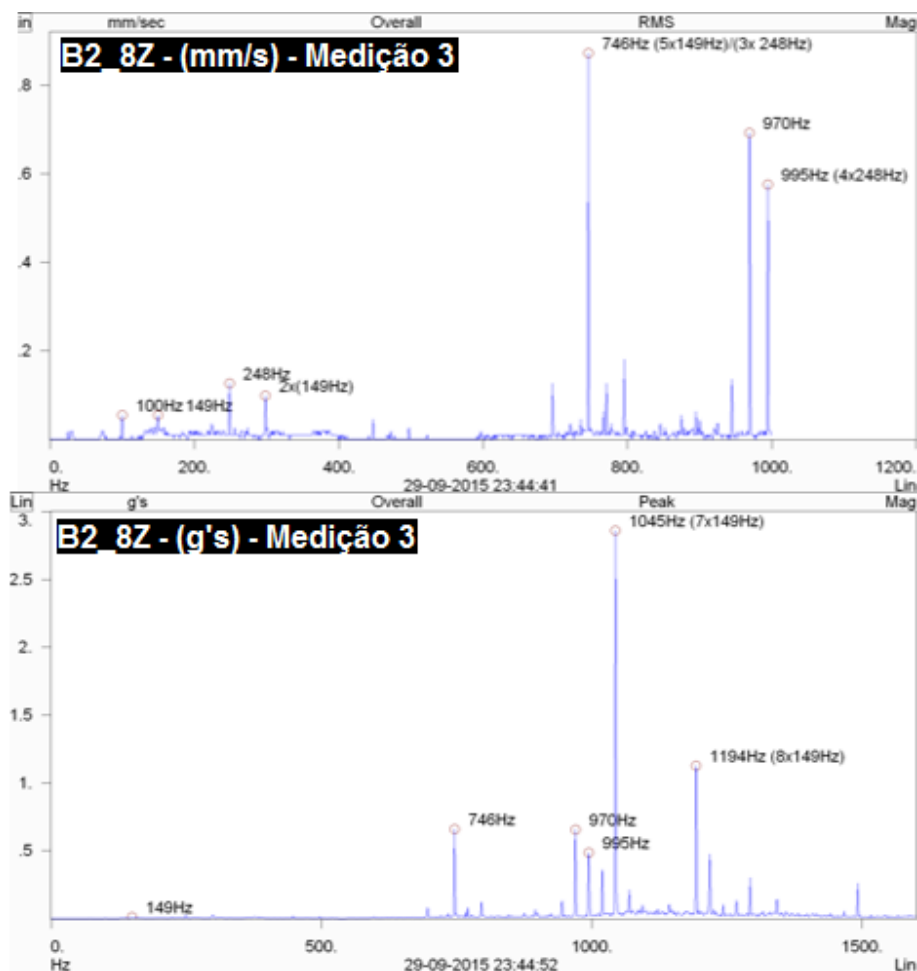


Figura 86 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B2_8Z

Tabela 18 - Amplitudes dos picos de velocidade e aceleração do ponto B2_8Z para as três medições

B2_8Z [Hz]	Velocidade [mm/s]			Aceleração [g's]				
	746	970	995	746	970	995	1045	1194
Medição 1	0,917	0,638	0,477	0,603	0,567	0,436	2,484	1,837
Medição 2	0,602	0,558	0,252	0,401	0,444	0,204	2,018	1,553
Medição 3	0,872	0,692	0,575	0,661	0,658	0,488	2,86	1,127

Observa-se na figura 87 o gráfico dos valores globais de aceleração gSE para os rolamentos na bomba B2, com as linhas dos limites referenciados na carta de severidade da figura 59.

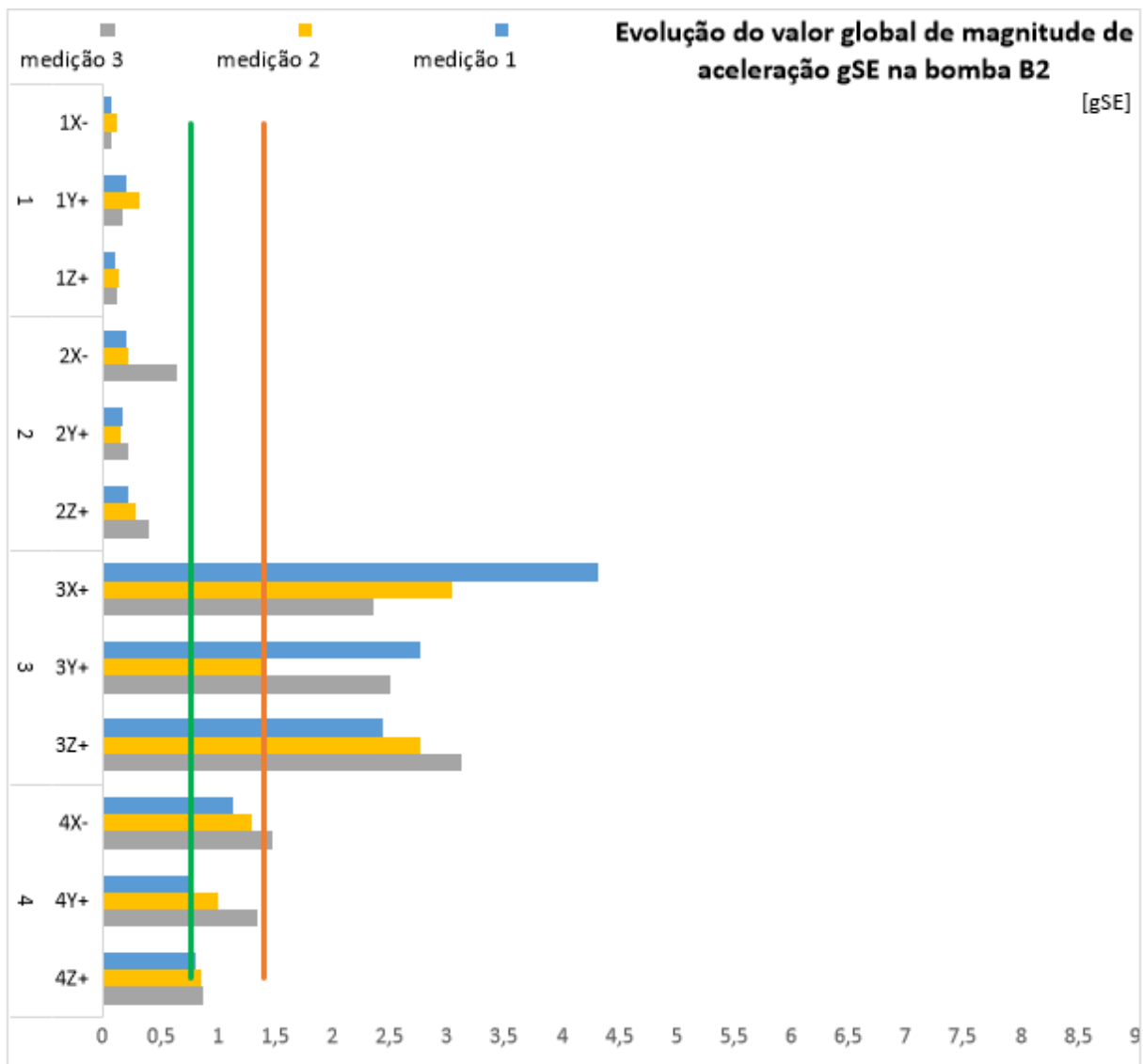


Figura 87 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B2

Os rolamentos da bomba junto ao acoplamento continuam, à semelhança das bombas anteriores, a ser aqueles que se mostram ser mais solicitados, pois os valores globais excedem os limites das zonas aceitáveis de amplitudes gSE.

A figura 88 demonstra os espectros de aceleração gSE das três medições no ponto B2_3X. A medição 1 apresenta um valor global mais elevado, resultado do maior ruído visível. Ainda assim, observa-se um pico correspondente ao defeito FTF, a 10,5 Hz, e a segunda harmónica, bem como uma segunda harmónica do defeito BSF, indicando algum defeito na superfície da esfera.

Na medição 2, é visível a frequência fundamental de defeito BSF e consequentes harmónicas, ainda que com baixas amplitudes.

Na medição 3, obtém-se uma melhor visualização do espectro, devido à medição 3 ter sido realizada com a bomba B2 a funcionar isoladamente, não existindo assim influência de carga de outras bombas. Como tal, observa-se além das frequências referentes ao defeito BSF, indícios de frequências do defeito da pista externa, BPFO, embora seja possível existir algum relacionamento entre os dois defeitos.

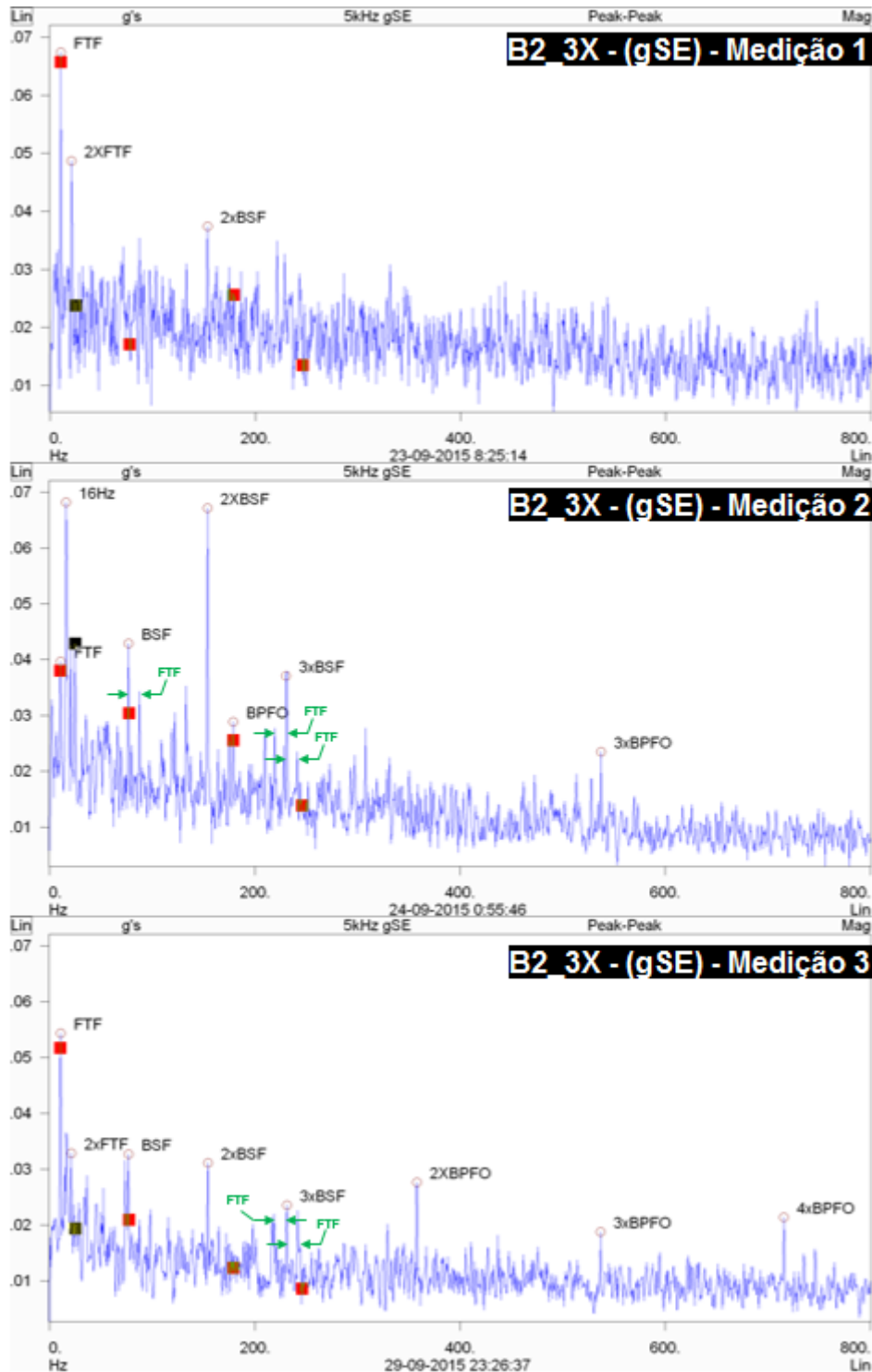


Figura 88 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3X

A figura 89 ilustra os espectros de aceleração gSE das três medições do ponto B2_3Y. Surgem na medição 1, picos de frequências de defeito BSF, a 77 Hz, e harmônicas, embora que com algum ruído visível pela oscilação da curva.

Na medição 2, o valor global mantém-se junto ao limite da zona aceitável, no entanto a frequência de defeito da superfície da esfera volta a surgir, até à quarta harmónica e com várias bandas laterais.

Relativamente à medição 3, é bastante semelhante em comportamentos à segunda medição, com o acréscimo do ruído, visível no espectro até aproximadamente 100 Hz.

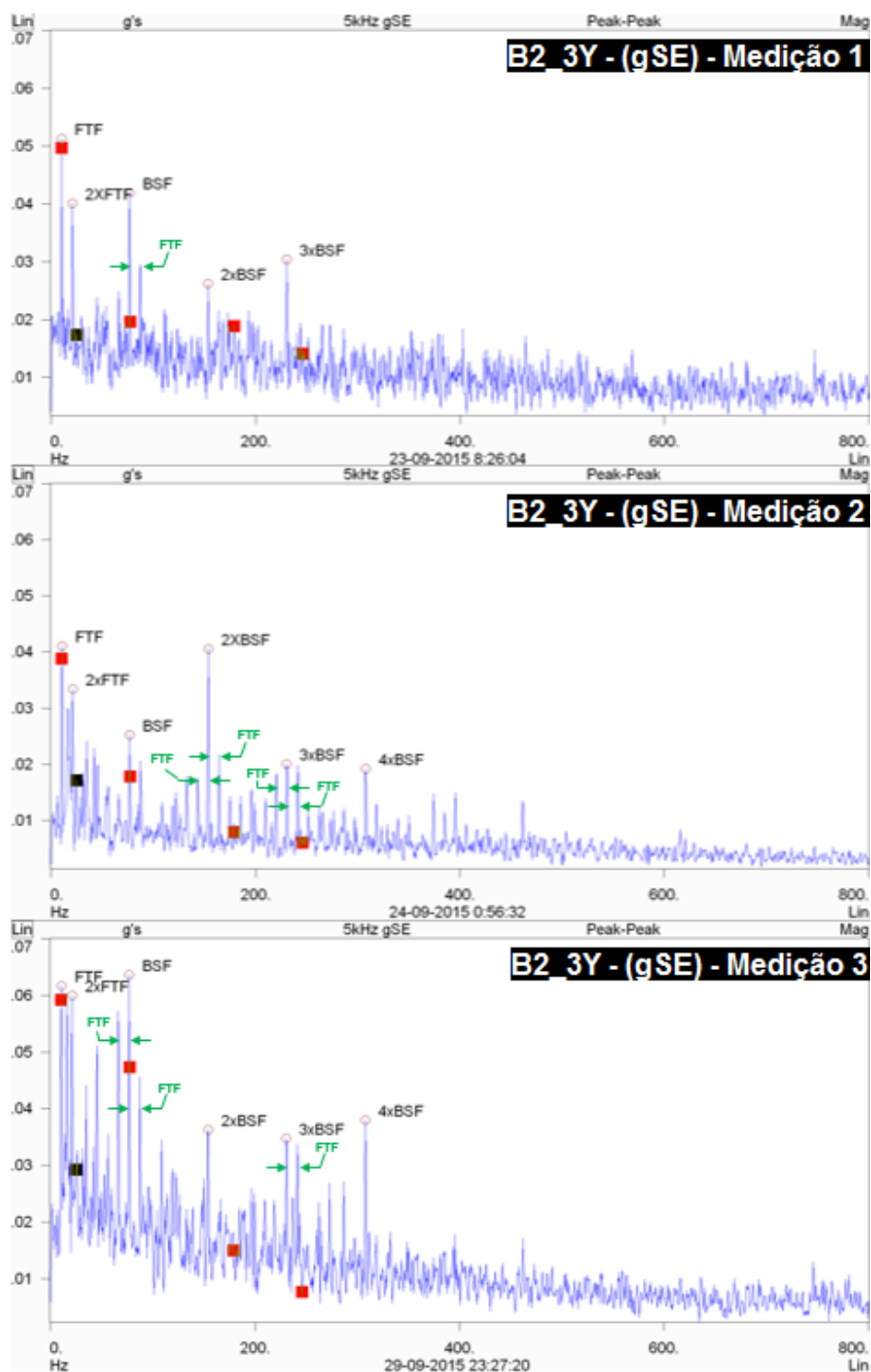


Figura 89 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3Y

Na figura 90 observam-se os espectros de aceleração gSE das três medições do ponto B3_3Z. Na medição 1, as amplitudes são relativamente baixas, mas surge a frequência fundamental de defeito BSF e consequentes harmônicas. Na medição 2, as amplitudes tendem a aumentar, resultado do aumento de carga, surgindo como maior pico a frequência de defeito emitido na gaiola, e surge também a de defeito BPFO, a 179 Hz, sem harmônicas nítidas. Por fim, a medição 3 mostra a frequência FTF, a 10,5 Hz, com uma amplitude de 0,12 g's, e é visível também um pico à frequência de 16 Hz, indicando uma meia harmônica do defeito FTF. A frequência do defeito BPFO não é visível, mas o defeito pode estar presente.

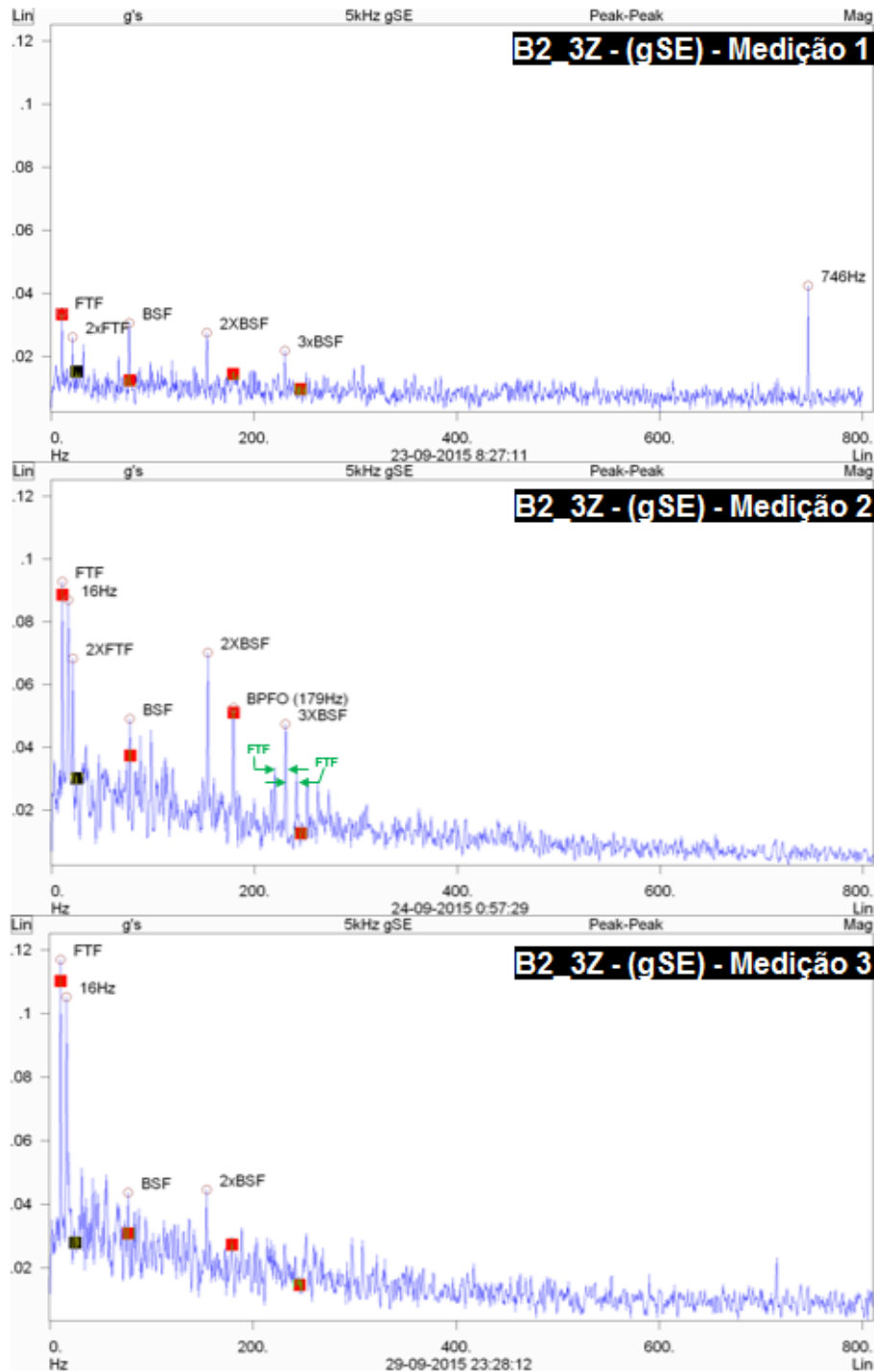


Figura 90 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B2_3Z

3.4.6 – Bomba B3

A figura 91 representa o gráfico dos valores globais de magnitude de velocidade para as três medições completas efetuadas na bomba B3. Mais uma vez, a bomba B3 apresenta um comportamento semelhante às restantes bombas do grupo B relativamente à gama dos valores.

Observando os esquemas de funcionamento, das figuras 54 a 56, nota-se que existem duas medições que foram efetuadas com as mesmas condições de funcionamento, as medições 1 e 2, que tinham apenas a bomba A2 a funcionar em simultâneo com a bomba B3 a ser medida. Já na medição 3, após a manutenção, estava em operações a bomba A1 e a B1.

Portanto, espera-se que os valores globais de magnitude de velocidade sejam superiores na medição 3 comparando com as medições 1 e 2, apesar de ter um espaçamento considerável entre cada eletrobomba.

Contudo, a medição 3 não apresenta grande superioridade nas amplitudes globais de velocidade, sendo no geral repartido pelas três medições, não se verificando também no caso da bomba B3, uma lógica direta com o esquema de funcionamento, apesar de se ter duas medições na mesma condição e uma outra com espaçamento suficiente.

No gráfico da figura 92, referente aos valores globais de magnitude de aceleração na bomba B3, verifica-se que as amplitudes são praticamente insignificantes nos pontos 5, 6 e 10, comparativamente com as restantes localizações, mostrando a importância das mangas de expansão ao evitar a propagação das vibrações para a estrutura, funcionando também no caminho inverso, ao evitar que vibrações externas excessivas se propaguem para o interior da bomba.

Considerando o gráfico da figura 91, o ponto B3_6Y é um ponto de interesse para uma análise mais profunda, pois apresenta valores globais que se aproximam da zona de funcionamento D, considerada já prejudicial para a estrutura. Também o ponto 9Z é examinado apesar de exceder por pouco a zona B.

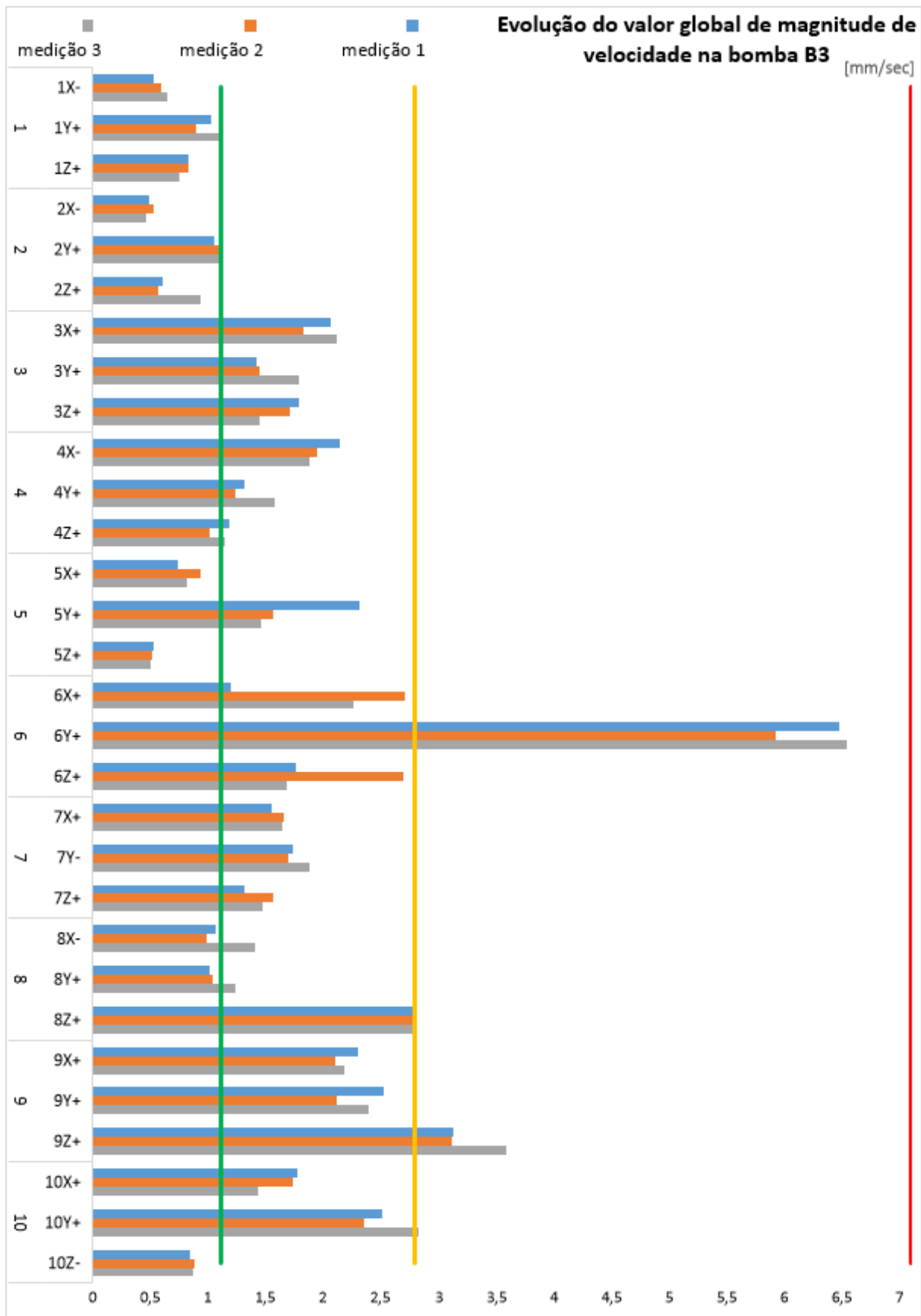


Figura 91 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de velocidade das três medições da bomba B3

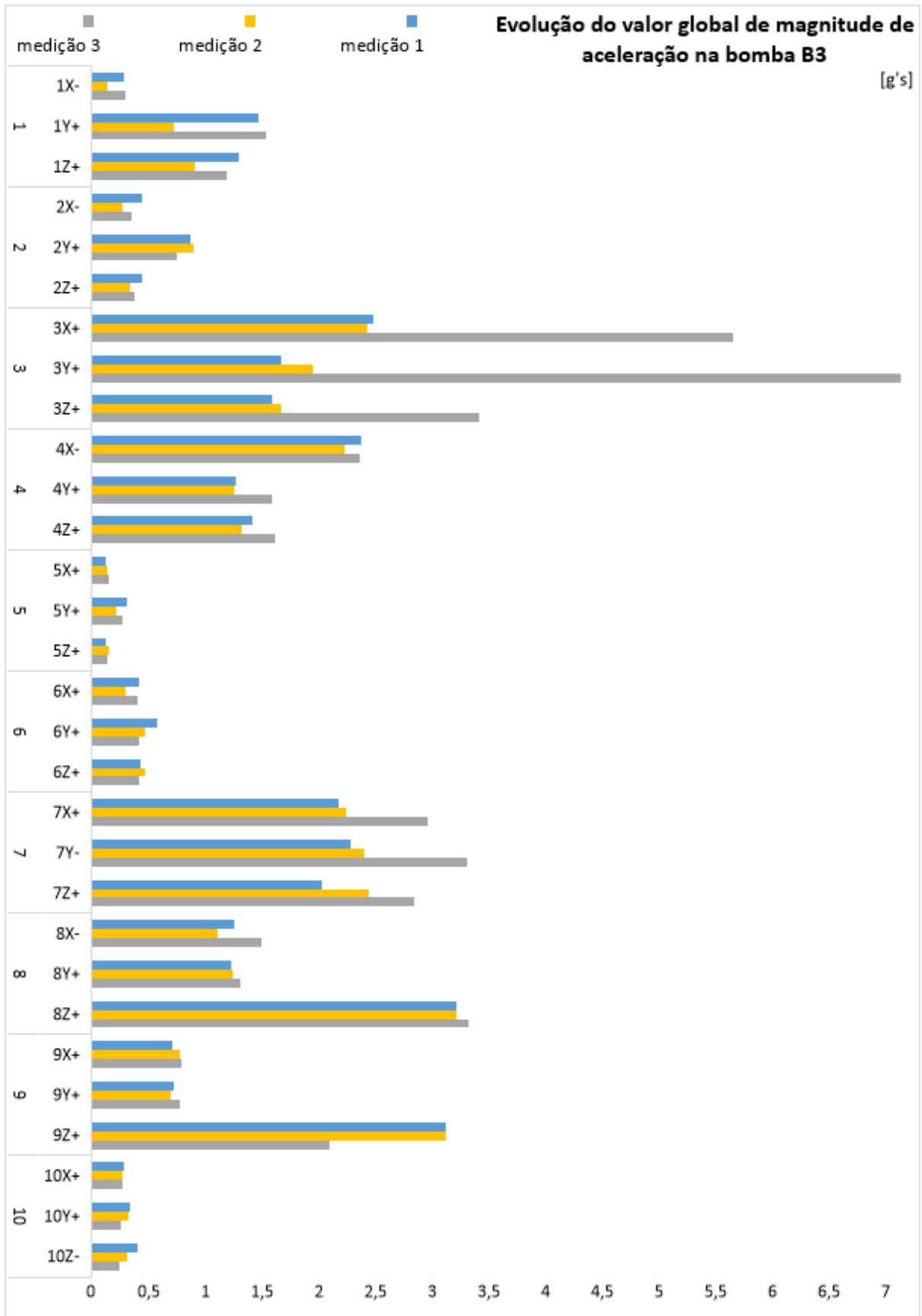


Figura 92 - Gráfico da evolução do valor global de magnitude de aceleração das três medições da bomba B3

Na figura 93 observam-se os espectros de velocidade e aceleração referentes ao ponto B3_6Y. Em termos de espectros, as três medições apresentam curvas semelhantes, apenas com amplitudes diferentes, descritas na tabela 19, para o único pico relevante a aproximadamente 74 Hz.

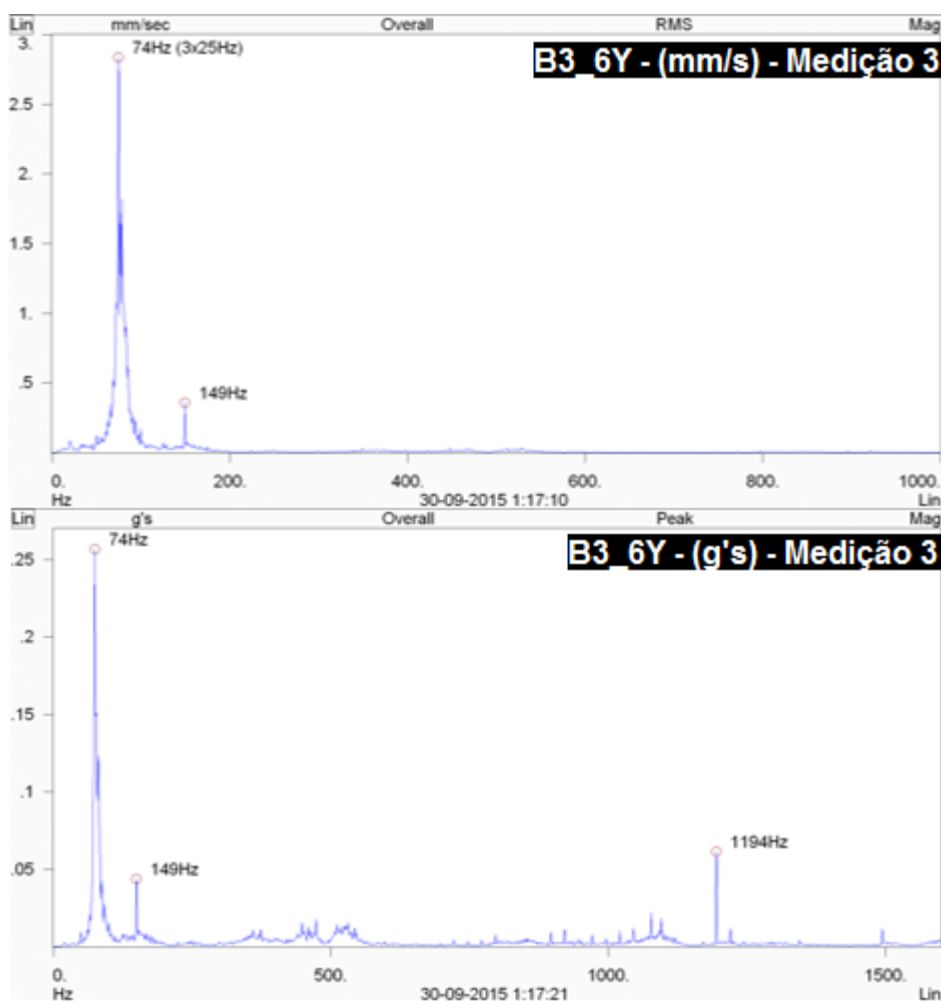


Figura 93 -Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B3_6Y

Tabela 19 - Amplitudes do pico de velocidade e aceleração do ponto B3_6Y para as três medições

B3_6Y [Hz]	Velocidade [mm/s]	Aceleração [g's]
	74 Hz	74 Hz
Medição 1	3,42	0,21
Medição 2	2,92	0,24
Medição 3	2,84	0,26

Observando a tabela 19 acima, a medição 1 apresenta uma maior amplitude em velocidade, tal como acontece com o valor global da figura 91, podendo não ser explicação suficiente para os elevados valores globais, pois no espectro de aceleração, com uma largura de banda superior, também não se observa nenhuma zona de maior interesse. No entanto, pela figura 94, do ensaio B2M4, que mostra a resposta livre e resposta em funcionamento no ponto B2_6Y, verifica-se uma situação semelhante, mas a uma frequência diferente (100 Hz no caso do estudo do ensaio B2M4), e sendo bombas do mesmo grupo consideram-se que as frequências naturais serão aproximadas.

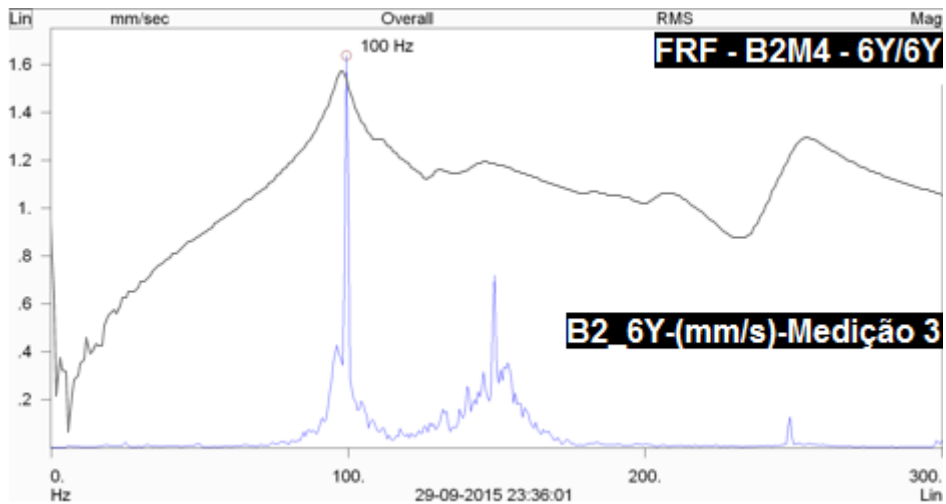


Figura 94 - Gráfico da FRF B2M4- 6Y/6Y e espectro de velocidade da medição 3 do ponto B2_6Y

Não é possível realizar a mesma aproximação com a bomba B3 pois esses ensaios foram realizados a apenas uma bomba de cada grupo, mas um segundo ensaio, realizado a todas as bombas, com o acelerômetro no ponto 9Y e com vários pontos de excitação, mostra as curvas FRF da figura 95. É possível observar, assinalado com um círculo a vermelho, que todas as cinco FRF têm em comum um pico que surge em torno de 75 Hz, indicando uma frequência natural do sistema da bomba B3, e que, coincidindo com o mesmo pico dos espectros da figura 93, provoca um fenómeno de ressonância.

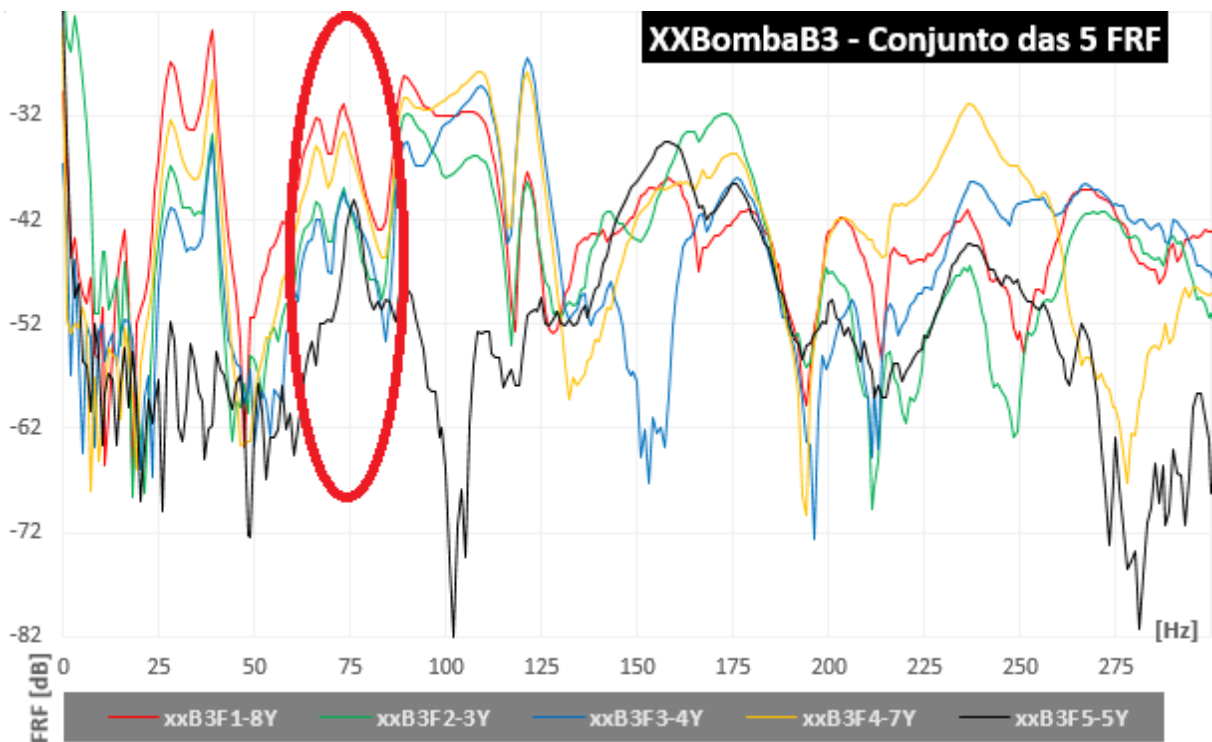


Figura 95 - xxBombaB3 - Conjunto das 5 FRF da bomba B3, medidas no ponto 9Y

A figura 96 representa os espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B3_9Z. Em relação a este ponto, os valores globais não ultrapassam em muito o limite da zona B, e a explicação recai sobre um possível pico de elevada amplitude, a 1194 Hz, que devido à gama de frequências imposta à configuração utilizada, não surge no espectro da velocidade.

Ainda assim, interessa mencionar a amplitude de 1,60 mm/s a 20 Hz, que é um valor relativamente elevado comparando com as medições 1 e 2, resultado da carga imposta pelo funcionamento de outras bombas.

A identificação dos picos não foi possível ao longo deste trabalho devido à carência de informação relativamente aos impulsores das bombas do grupo B.

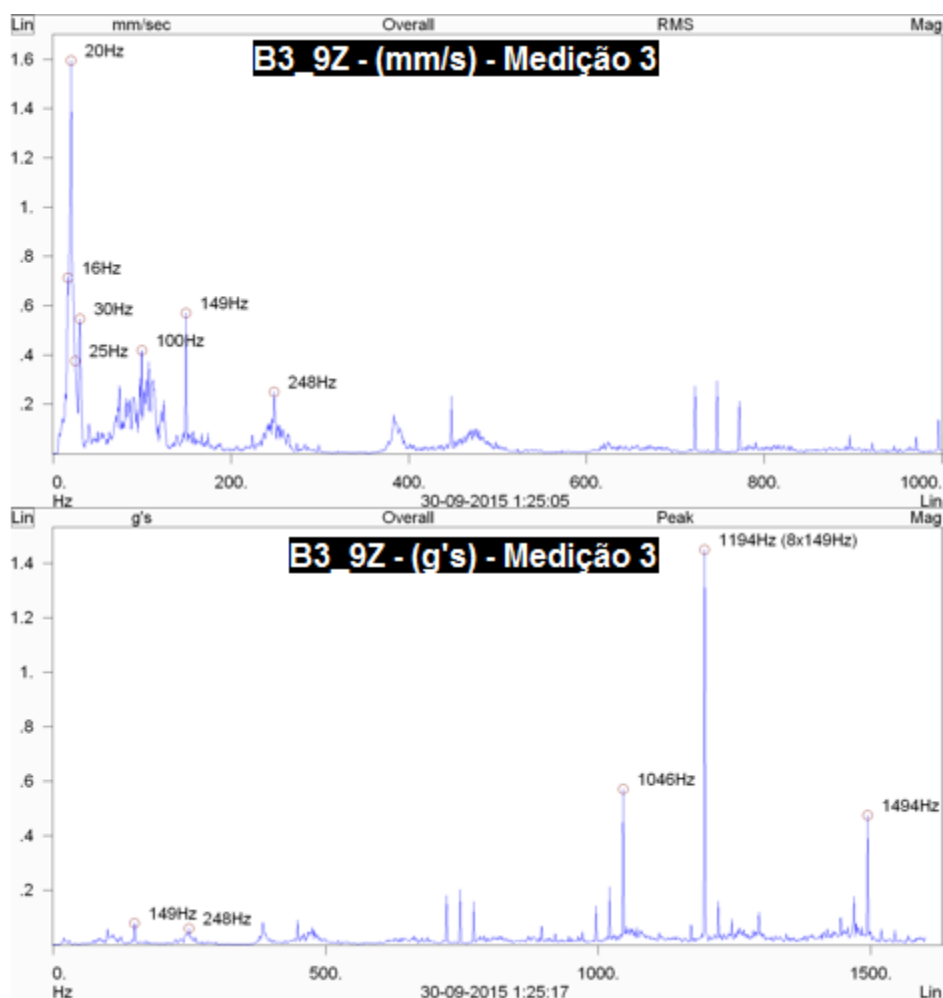


Figura 96 - Espectros de velocidade e aceleração da medição 3 do ponto B3_9Z

Tabela 20 - Amplitudes do pico de velocidade e aceleração do ponto B3_9Z para as três medições

B3_9Z [Hz]	Velocidade [mm/s]							Aceleração [g's]				
	16	20	25	30	100	149	248	149	248	1045	1194	1493
Medição 1	0,538	0,855	0,861	0,164	0,401	0,359	0,568	0,05	0,133	0,597	1,516	0,472
Medição 2	0,352	0,566	0,926	0,3	0,501	0,35	0,662	0,054	0,109	0,431	1,387	0,406
Medição 3	0,713	1,596	0,375	0,546	0,418	0,571	0,249	0,078	0,06	0,571	1,45	0,475

Observa-se na figura 97 o gráfico dos valores globais de aceleração gSE para os rolamentos na bomba B3, com as linhas dos limites referenciados na carta de severidade da figura 59.

Os rolamentos junto ao acoplamento da bomba com o motor continuam, à semelhança das bombas anteriores, a ser os mais solicitados, resultando em valores globais que excedem os limites das zonas aceitáveis de amplitudes gSE.

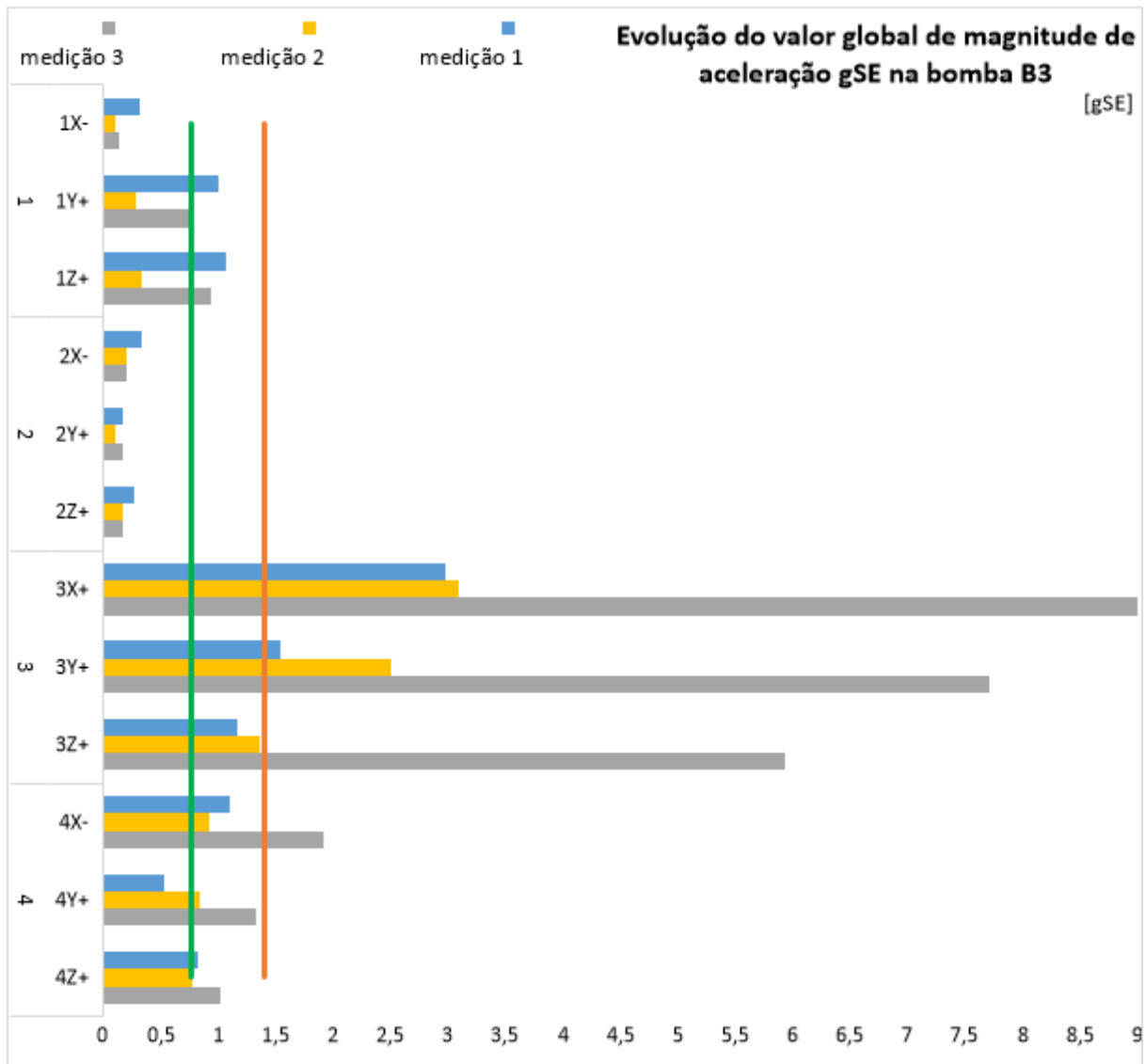


Figura 97 - Gráfico da evolução do valor global de aceleração em gSE das três medições da bomba B3

Observam-se na figura 98, os espectros de aceleração gSE das três medições para o ponto B3_3X. Na medição 1 surge o pico de frequência de defeito emitido na gaiola, FTF, juntamente com harmónicas, e também a frequência coincidente com a do defeito BPFO, a 179 Hz e consequentes harmónicas, com picos adjacentes em cada harmónica, incluindo na fundamental. A frequência que distancia o BPFO desses picos corresponde à frequência FTF.

O espectro da medição 2 é semelhante ao da medição 1, havendo no entanto um pico que corresponde à frequência de defeito BSF, podendo estar relacionado com o defeito na pista externa.

Na medição 3, não se retira qualquer informação clara devido a uma amostra com demasiadas oscilações e irregularidades.

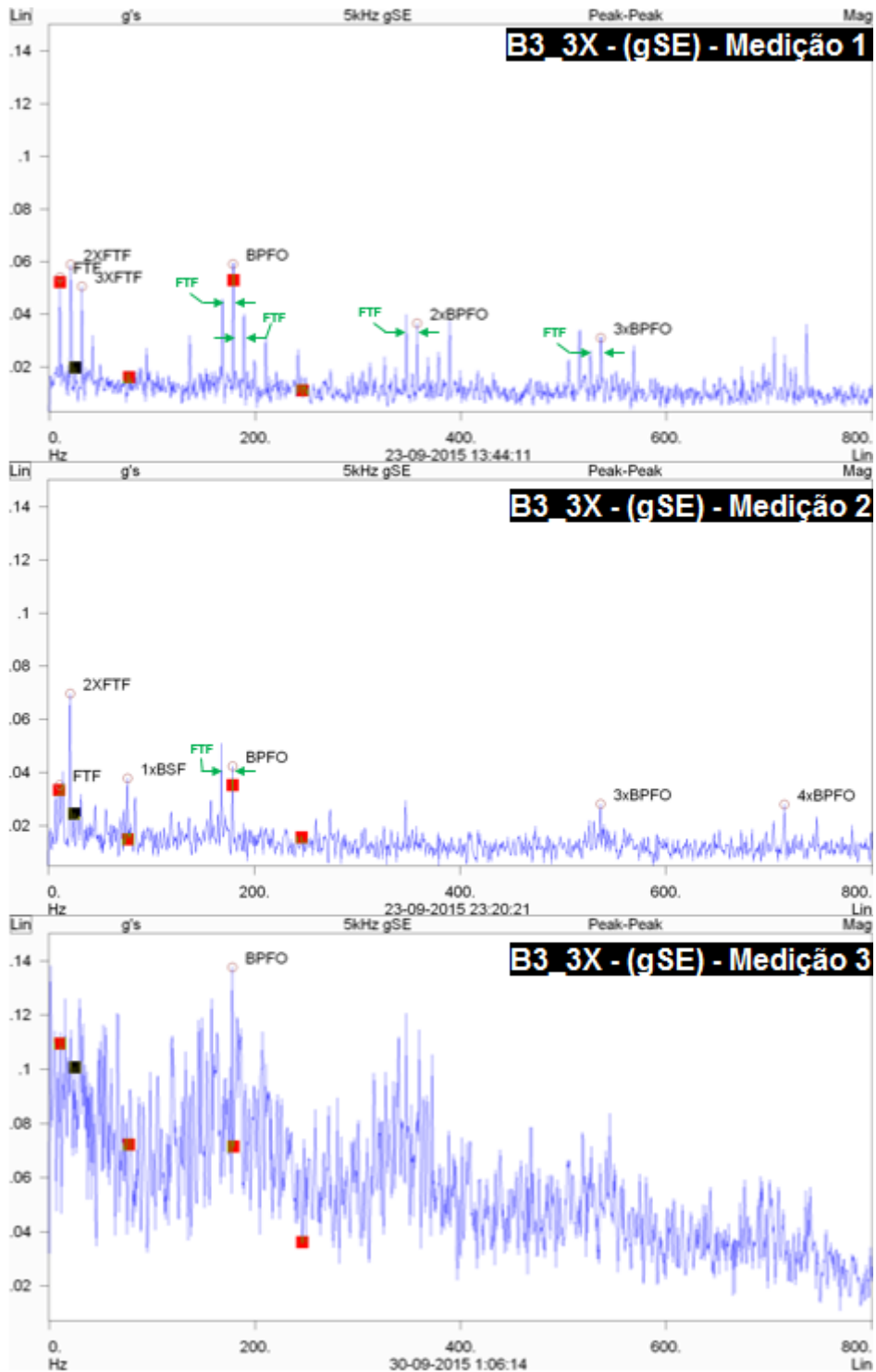


Figura 98 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3X

A figura 99 mostra os espectros de aceleração gSE do ponto B3_3Y para as três medições. Na medição 1 observa-se o pico da frequência de defeito FTF até à terceira harmónica, e também a de defeito BPFO a 179Hz, mas com amplitudes relativamente baixas.

A medição 2 é semelhante à medição 1, mas com as amplitudes mais elevadas, ainda que insignificantes.

Na medição 3, tal como aconteceu com o ponto B3_3X, não é praticável a identificação das frequências devido ao ruído no espectro.

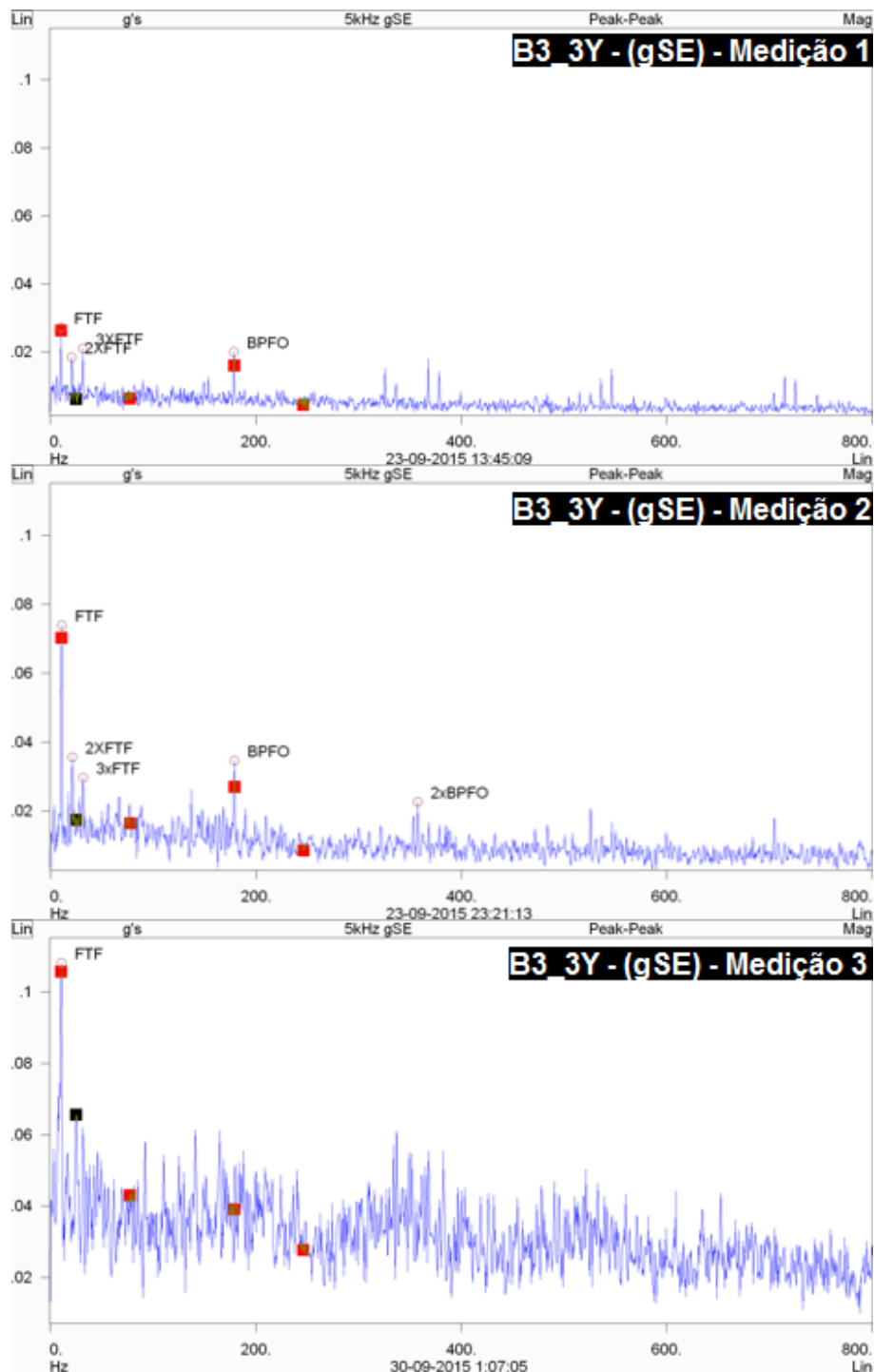


Figura 99 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3Y

Na figura 100 observam-se os espectros de aceleração gSE das três medições do ponto B3_3Z. Na medição 1, não é perceptível nenhuma frequência de interesse a não ser a FTF com duas harmônicas.

Já na medição 2, é visível a frequência de defeito BPFO e uma segunda harmônica, indicando algum problema com a pista externa do rolamento, ainda que nada de significativo devido às baixas amplitudes.

A medição 3 continua sensível ao ruído, possivelmente devido a um erro na medição com o aparelho.

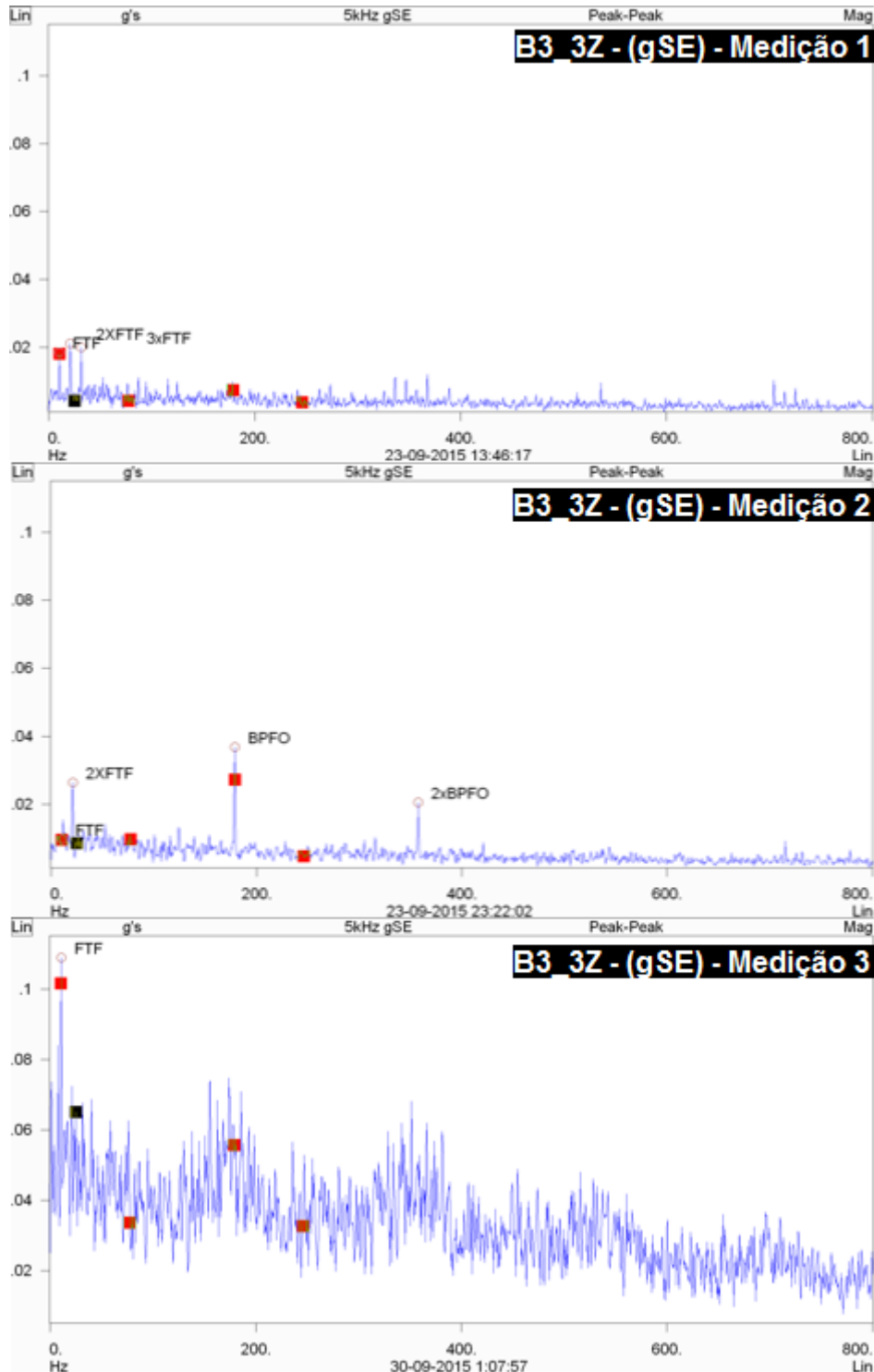


Figura 100 - Espectros de aceleração em gSE das três medições do ponto B3_3Z

3.5 – Resposta livre versus resposta em funcionamento

Ao longo deste subcapítulo aborda-se a bomba A1 e a bomba B2, relativas aos ensaios realizados com o martelo de ensaio de impactos para detetar as frequências naturais através das FRF, medindo em 10 pontos distintos para cada uma das bombas, e comparando com a resposta do sistema em funcionamento no mesmo ponto de medição (medido com o Enpac).

3.5.1 – Medição na bomba A1

3.5.1.1 – Medição A1M1 – 3Y/3Y

Na figura 101, representa-se a FRF A1M1, medida na bomba junto ao acoplamento com o motor, na direção radial ao eixo do veio. Na FRF são visíveis vários picos que indicam a existência de frequências naturais do sistema, mas interessa para o caso a comparação com a medição da resposta em funcionamento, a azul na figura.

Surge uma zona de perturbação a 200 Hz, sem um pico explícito, que coincide com uma frequência natural, podendo ser explicação para surgir no espectro.

Já em torno de 275 Hz e 475 Hz surgem dois picos que podem estar amplificados por coincidir com frequências naturais, apesar das amplitudes de velocidade não serem significantes.

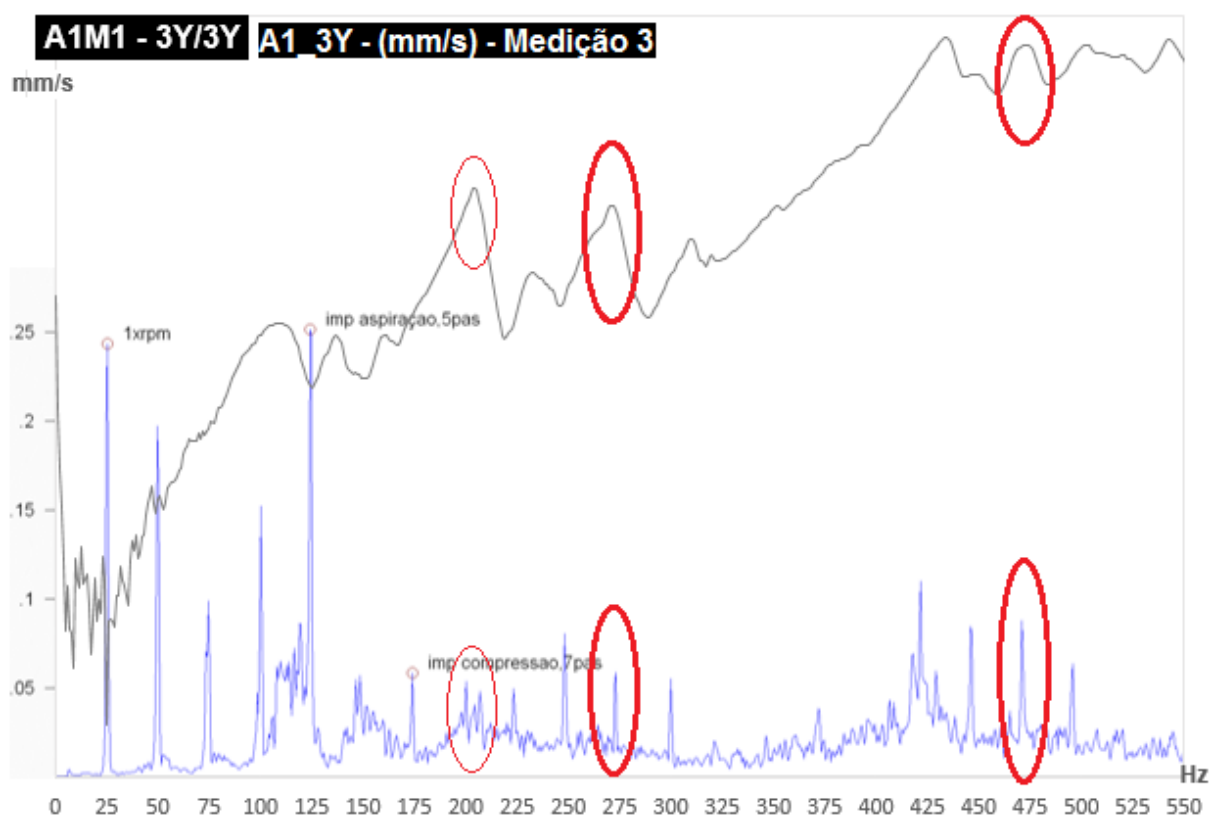


Figura 101 - A1M1 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 3Y

3.5.1.2 – Medição A1M4 – 7X/7X

A figura 102 representa o gráfico da resposta livre do sistema e da resposta em funcionamento A1M4, à entrada da bomba, na localização 7, na direção axial ao veio.

É visível (assinalado com círculos vermelhos) um ponto que é próximo entre os dois gráficos, 121 Hz na resposta livre, no gráfico da FRF com a curva a cinzento, e 124Hz na resposta em funcionamento, a azul, que corresponde a cinco ordens de rotação do veio (24,8 Hz). As amplitudes são baixas, mas sendo o pico com maior amplitude, é o que contribui mais a baixas frequências para o valor global de magnitude, podendo induzir em erro caso este ultrapasse os limites do bom funcionamento, quando na verdade indica apenas uma ampliação do valor devido a um fenómeno de ressonância.

Tal como sucedeu no caso anterior, do ensaio A1M1, surge um pico coincidente a 275 Hz.

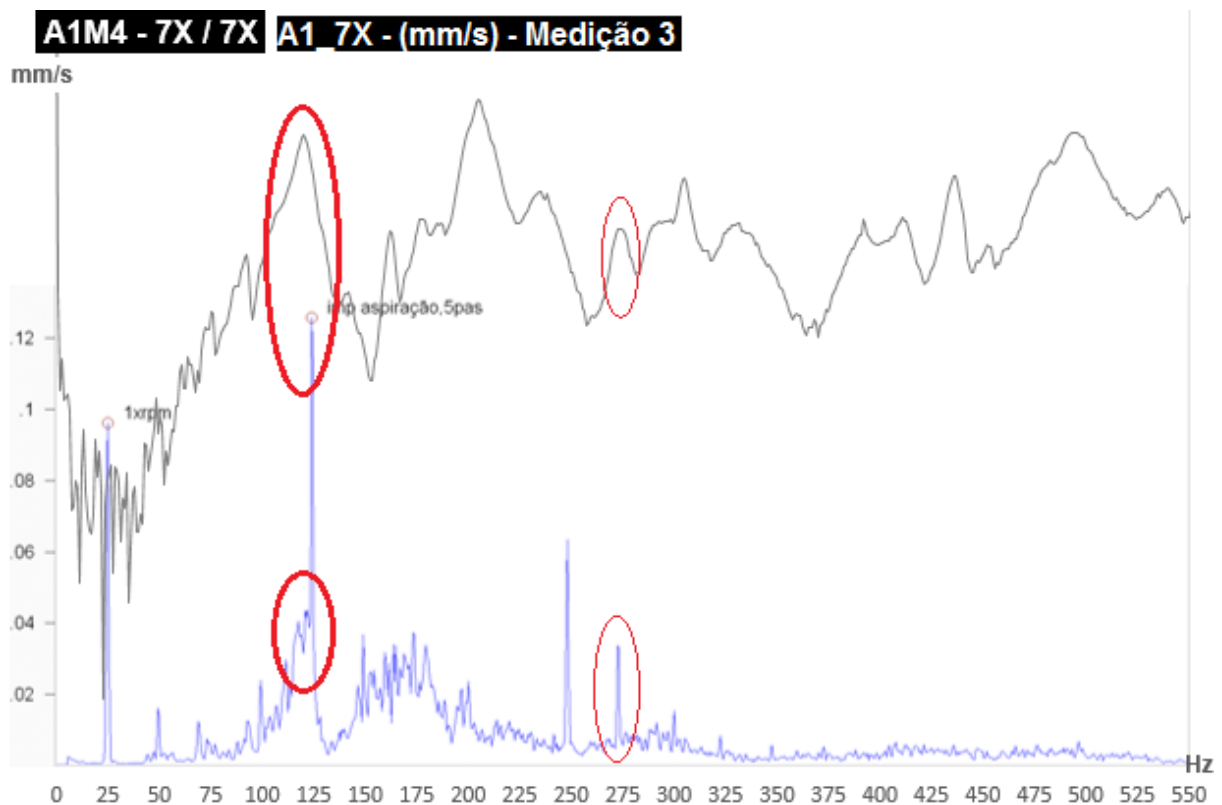


Figura 102 - A1M4 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 7X

3.5.1.3 – Medição A1M5 – 7Z/7Z

Na figura 103 observam-se as duas curvas de resposta para a localização 7, à entrada da bomba, tal como na figura anterior, mas desta vez na direção vertical.

Nesta figura surge assinalada a vermelho, uma frequência na primeira ordem de rotação, aproximadamente 25 Hz, com amplitude não muito significativa de 0,08 mm/s, que coincide com uma frequência natural, ainda que não seja muito nítida e limpa por ser a baixas frequências e onde a concentração é maior.

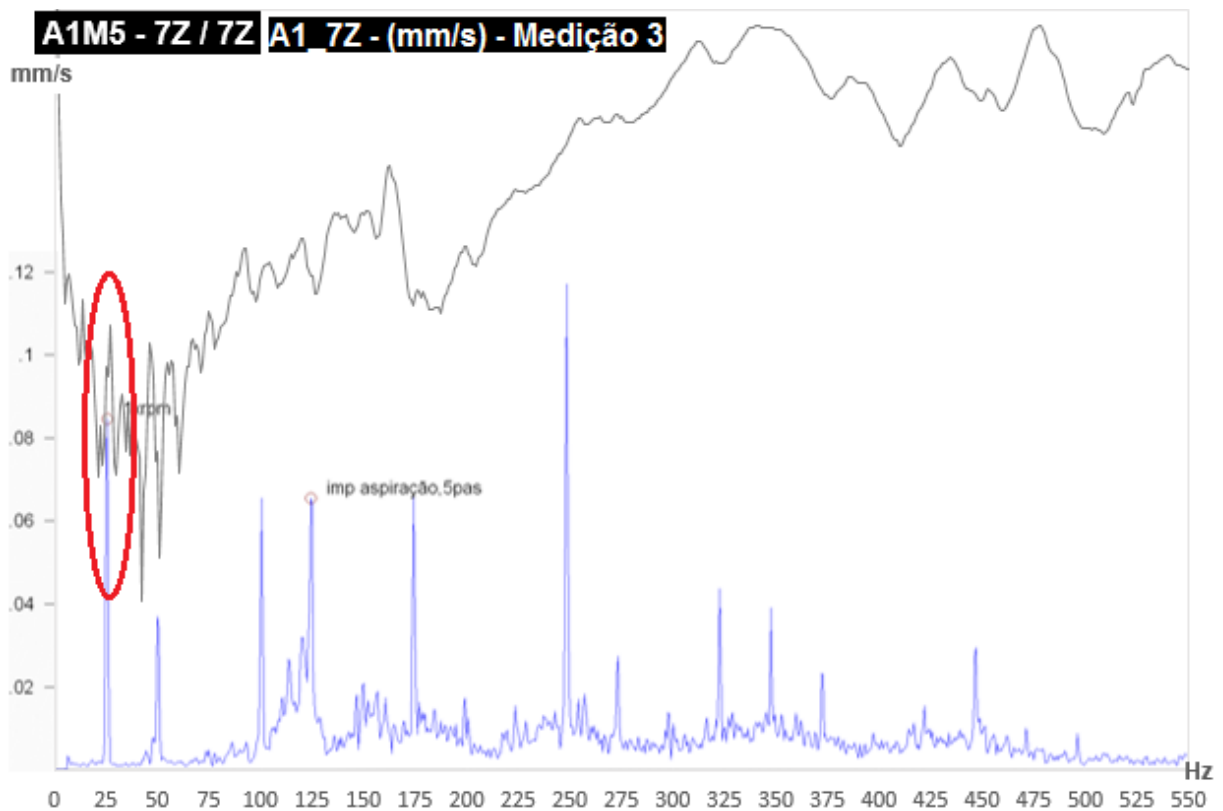


Figura 103 - A1M5 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 7Z

3.5.1.4 – Medição A1M6 – 8X/8X

As curvas dos gráficos da figura 104 representam a resposta livre, a cinzento, e a resposta em funcionamento, a azul, medidas no ponto A1_8X.

Em torno de 75 Hz existe um pico que coincide com uma frequência natural, apesar de ter um valor amplitude de velocidade relativamente baixo.

Também a 300 Hz é visível um acréscimo no espectro de velocidade em torno dessa frequência, podendo indicar ressonância.

A 496 Hz, existe um pico coincidente com uma frequência natural, ainda que um pouco amortecida.

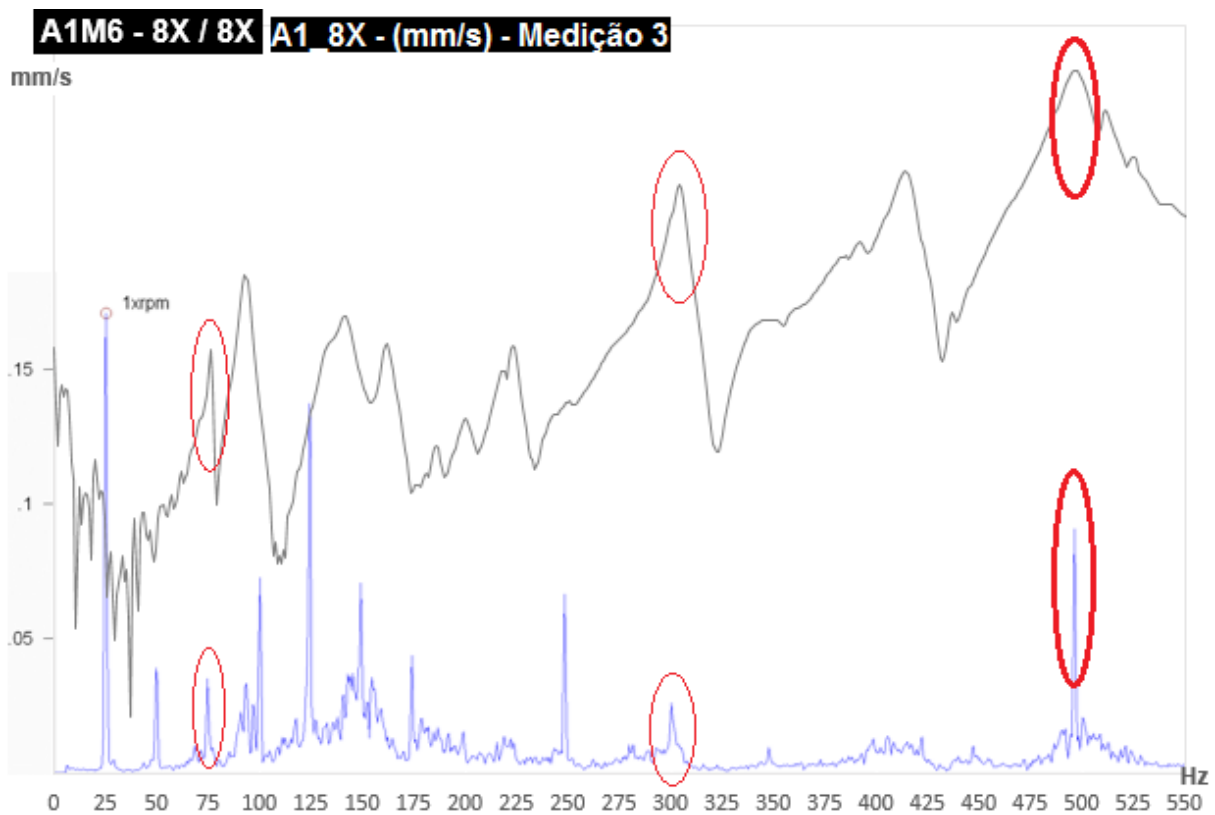


Figura 104 - A1M6 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 8X

3.5.1.5 – Medição A1M7 – 8Z/8Z

A figura 105 representa o ensaio A1M7, realizado no ponto 8Z, referente à saída da bomba na direção vertical.

Na figura observa-se duas zonas de interesse. Um pico coincidente a baixa frequência, que ocorre na resposta em funcionamento a 48 Hz (assinalado a vermelho), com uma amplitude em velocidade de 0,027 mm/s, que apesar de não ser um valor preocupante, poderia causar dano se a bomba trabalhasse sob essa frequência de rotação.

Existe uma segunda zona, assinalada com círculos vermelhos, em que se observa um pico de frequência natural a ocorrer a 280 Hz, na FRF, a cinzento. Já na resposta em funcionamento, não é um único pico visível, mas uma zona que tem duas amplitudes juntas, a 278,75 Hz e uma outra a 281,25 Hz.

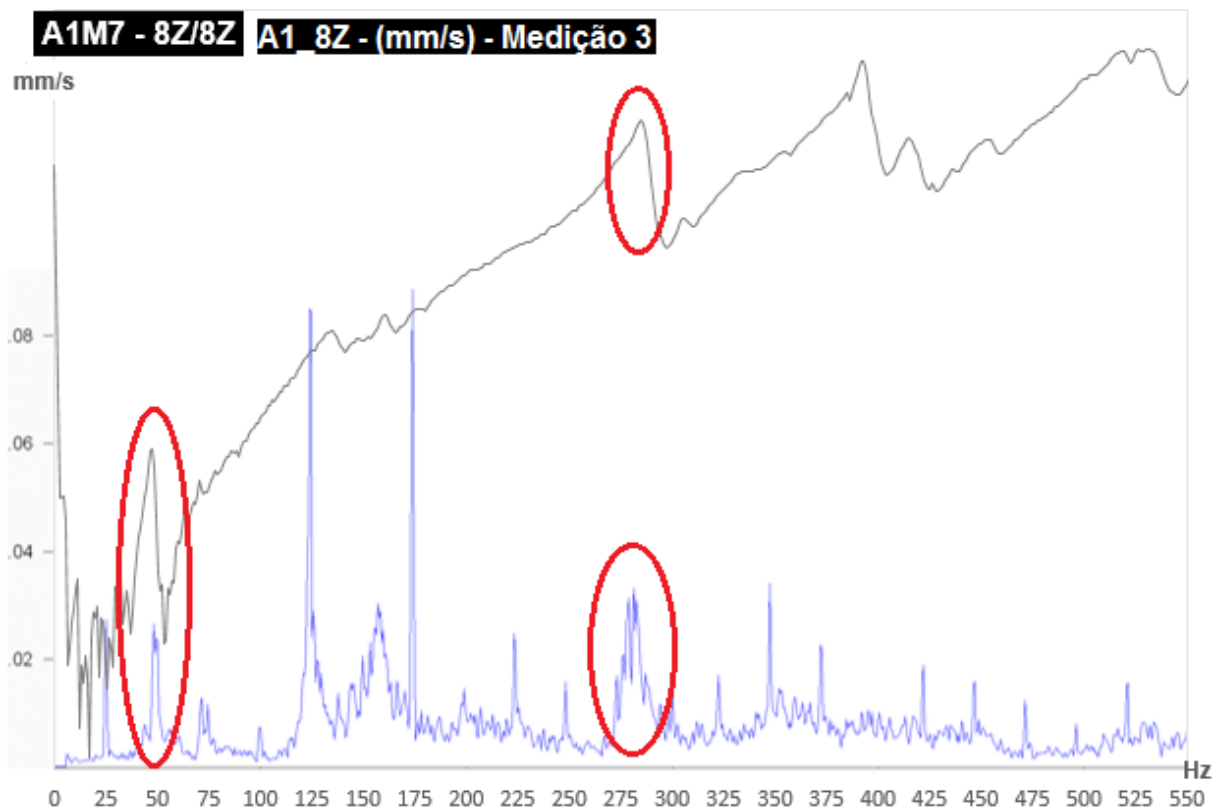


Figura 105 - A1M7 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 8Z

3.5.1.6 – Medição A1M8 – 9X/9X

Na figura 106 observa-se a medição A1M8, localizada no ponto 9X, na zona da saída da bomba, no final do primeiro cotovelo da conduta, na direção horizontal e axial em relação ao veio do motor.

Por se tratar de uma secção de tubagem, resulta uma FRF mais limpa e com menos ruído, onde os picos são facilmente identificados. Ao efetuar a medição em funcionamento, observa-se que o maior pico é o referente à primeira ordem de frequência de rotação da bomba, 25 Hz.

A 29 Hz, surge um outro pico de amplitude baixa, relativamente a 25 Hz, mas que coincide com a frequência natural demonstrada na FRF, que surge nítida a 29 Hz. Esta pouca diferença entre a frequência natural e a velocidade de rotação da bomba pode causar problemas de ressonância, amplificando a resposta do sistema em torno desse valor.

A 94 Hz, surge uma frequência natural na FRF, que ao comparar com a resposta em funcionamento, há uma zona de perturbação, entre 91 Hz e 100 Hz, com o pico de maior amplitude a surgir a 100 Hz. No entanto, a zona de perturbação não é significativa em termos de amplitude.

Na FRF a 305 Hz observa-se uma frequência natural, que é verificável também no espectro de velocidade, a 300 Hz. Existe uma aproximação, mas as amplitudes não são relevantes.

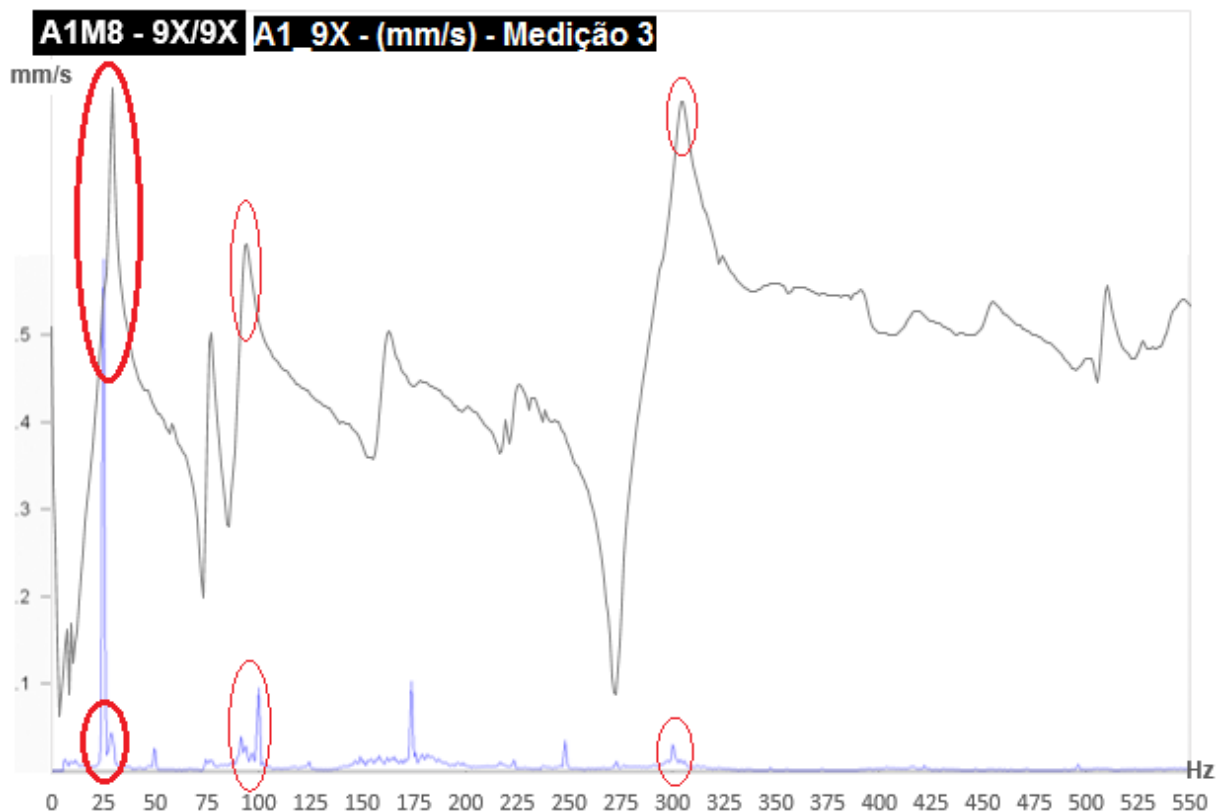


Figura 106 - A1M8 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9X

3.5.1.7 – Medição A1M9 – 9Y/9Y

Na figura 107 observa-se a medição efetuada à resposta livre e à resposta em funcionamento no final do cotovelo de tubagem na saída da bomba, ponto 9Y, direção radial ao eixo do veio do motor.

Existe na medição em funcionamento dois picos próximos, a 47,5 Hz com uma amplitude de 0,13 mm/s e a 50 Hz com 0,22 mm/s. Comparando com a FRF A1M9, coincide com a frequência natural a 47 Hz, e portanto certamente que é uma zona de ressonância, neste caso referente à segunda ordem de velocidade de rotação.

Na frequência 71 Hz existe uma coincidência entre picos das duas curvas. Na resposta em funcionamento não é um pico claro, mas uma zona de perturbação, resultado da proximidade de uma frequência de ressonância.

A 518 Hz na FRF, apesar de não ser um pico muito acentuado, coincide com um pico na resposta em funcionamento, 521 Hz. Como já é uma zona de funcionamento considerada alta, comparativamente com os problemas que ocorrem a baixas frequências, tais como desalinhamentos, fica explicado o fenómeno de ressonância em torno desses valores.

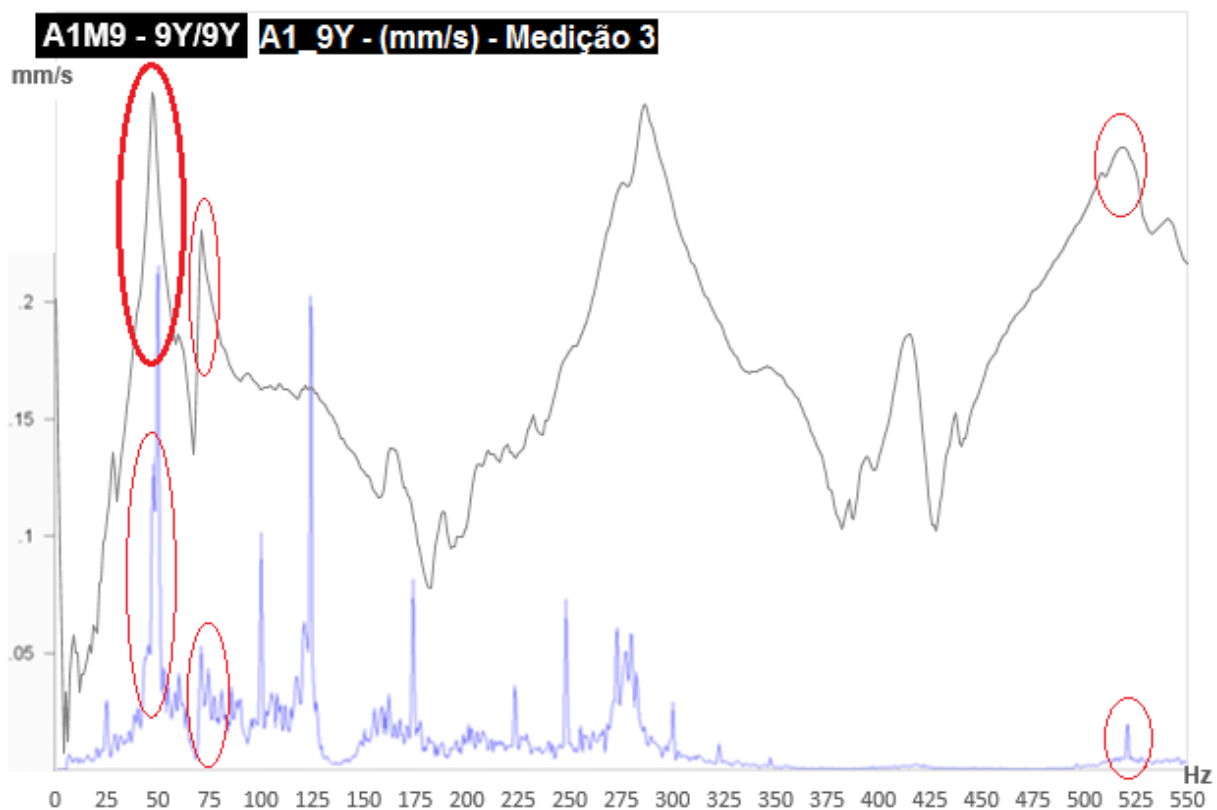


Figura 107 - A1M9 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9Y

3.5.2 – Medição na bomba B2

3.5.2.1 – Medição B2M2 – 6Y/4Y

Na figura 108 ilustra-se o ensaio B2M2, com a resposta localizada no ponto 6Y, e o ponto de excitação no ponto 4Y, com a resposta em funcionamento no ponto 6Y.

Surge uma frequência natural a 98 Hz na FRF. Já na resposta em funcionamento, referente à medição 3, são visíveis dois picos próximos, um a 96 Hz, e um com maior amplitude, 1,64 mm/s, a 99 Hz. O primeiro pico surge a 97 Hz na medição 2, enquanto na medição 1 já não é tão nítido. Sendo assim possível que a frequência de ressonância esteja a influenciar a amplitude de ambos os picos.

Na resposta em funcionamento, observa-se um pico de baixa amplitude, a 249 Hz, que ao comparar com a FRF, surge um primeiro pico a 251 Hz, pertencente a uma zona de perturbação. Essa perturbação pode ser devida ao ponto de impacto não ser idêntico ao ponto de resposta, e portanto, parte da informação é amortecida.

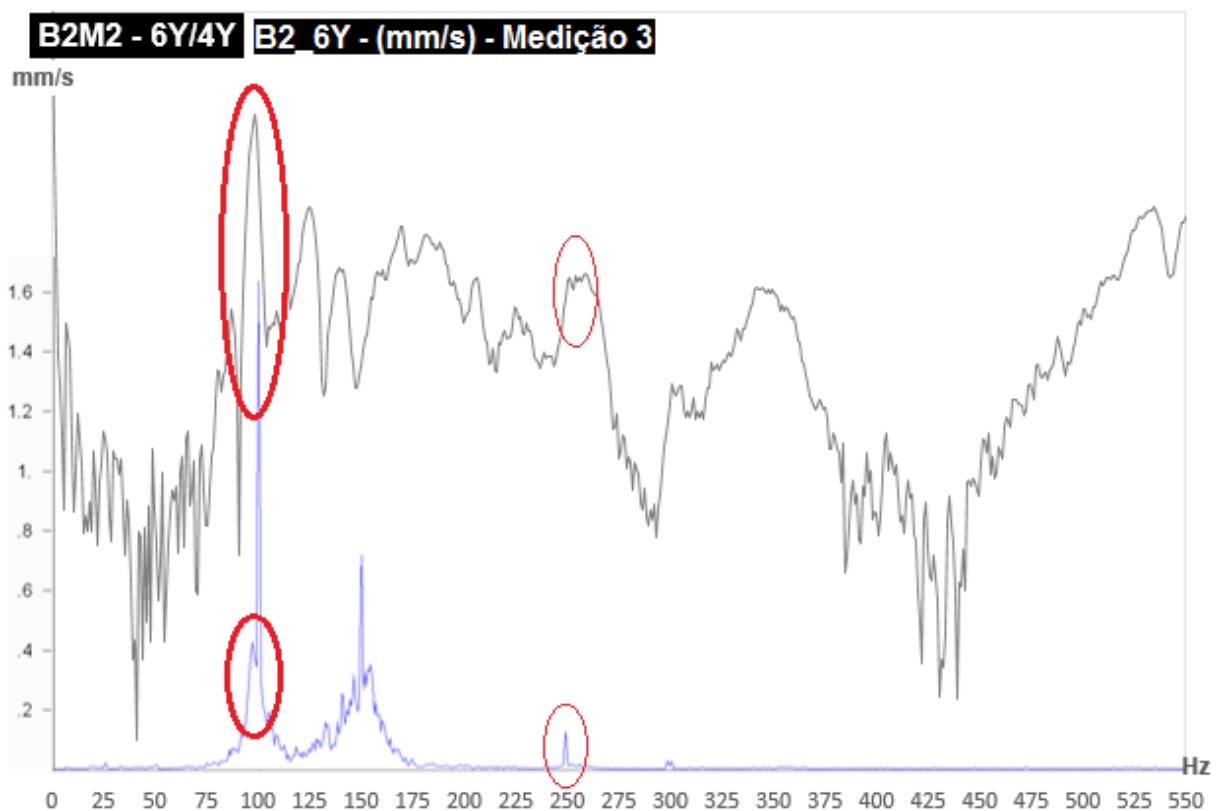


Figura 108 – B2M2 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6Y, com 4Y como ponto de excitação

3.5.2.2 – Medição B2M4 – 6Y/6Y

Na figura 109 está o ensaio da FRF B2M4 – 6Y/6Y com a medição da resposta em funcionamento no ponto 6Y. Na resposta livre, o ponto 6Y é utilizado como ponto de resposta e de excitação. Comparando com o caso 3.5.8, mudou-se apenas o ponto de impacto.

No caso anterior 3.5.8, pouca informação se retira relativamente a frequências naturais, muito pelo efeito causado pela manga de expansão existente entre o ponto 6 e o ponto 7, e que portanto, ao gerar um impacto na localização 4Y, para ser detetada no ponto 6Y, terá que passar também pela manga de expansão, fazendo com que a FRF B2M4 seja mais nítida que a FRF B2M2

Volta a surgir a frequência natural a 98 Hz, enquanto na resposta em funcionamento, existem dois picos próximos entre 96 Hz e 99 Hz.

Também em torno de 250 Hz volta a aparecer uma frequência natural, um pouco mais amortecida, entre 251 Hz e 254 Hz, que é próximo do pico a 249 Hz na resposta em funcionamento.

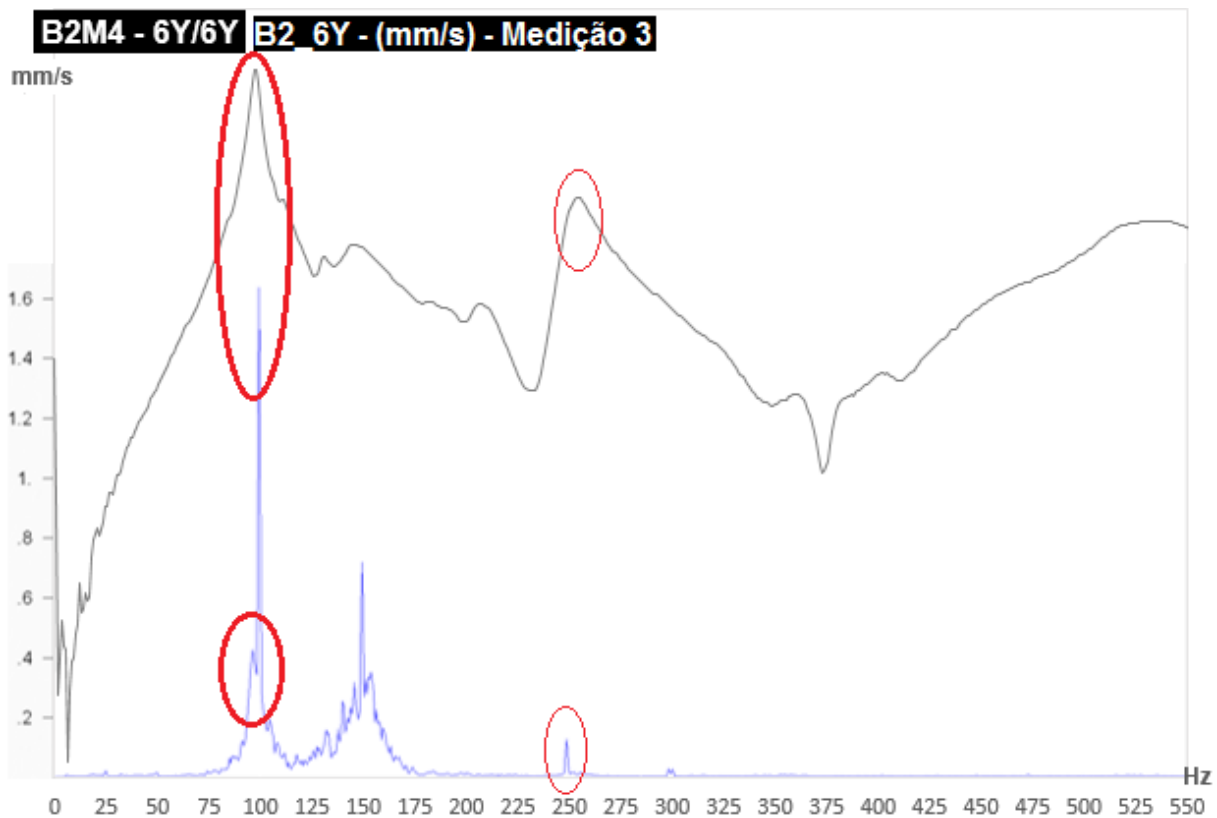


Figura 109 - B2M4 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6Y, com 6Y como ponto de excitação

3.5.2.3 – Medição B2M6 – 6X/6X

Na figura 110 observa-se o ensaio B2M6 - 6X/6X realizado no ponto 6X, axial ao veio do motor, tanto a colocação do acelerómetro como o ponto de impacto do martelo.

Na FRF, a primeira frequência natural surge a 92 Hz. Na resposta em funcionamento, referente à medição 3, existe um primeiro pico a valer 0,27 mm/s a 92,5 Hz, e um segundo pico de maior amplitude a 99 Hz, com 0,43 mm/s. A coincidência a 92 Hz provoca o fenómeno de ressonância em torno desse valor, sendo que é também a quarta ordem de velocidade de rotação.

A 158 Hz na FRF verifica-se uma zona um pouco amortecida mas que pode ser considerada uma frequência natural. Na resposta em funcionamento, não se observa um pico claro, mas observa-se uma zona de perturbação entre 142 a 154 Hz.

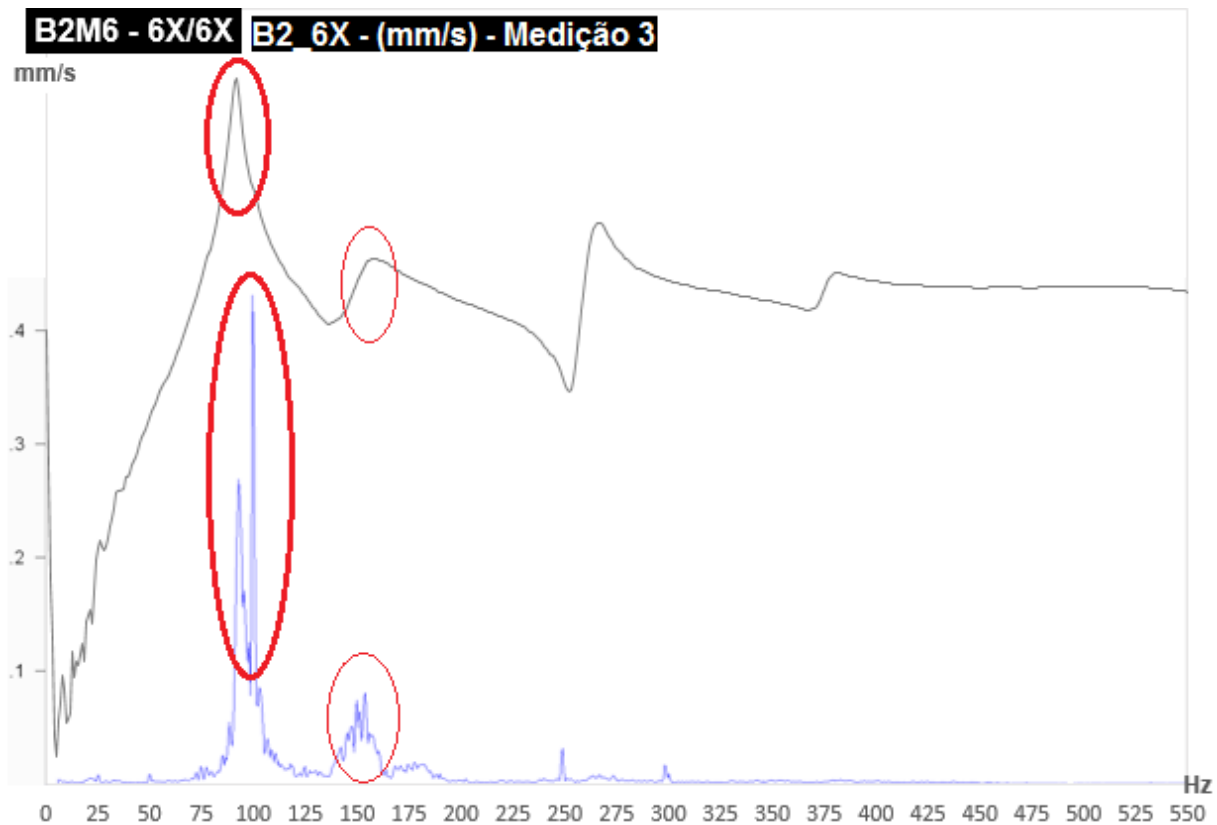


Figura 110 - B2M6 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 6X

3.5.2.4 – Medição B2M8 – 9X/9X

A figura 111 ilustra a resposta livre e a resposta em funcionamento do ensaio B2M8 – 9X/9X, referente ao final do cotovelo à saída da bomba, antes da manga de expansão.

Neste caso, existem 3 picos de frequências naturais abaixo de 50 Hz, nomeadamente a 16 Hz, 28 Hz e a 39 Hz. Ao observar a curva da resposta em funcionamento, existe a 16 Hz um pico de baixa amplitude, 0,17 mm/s, e também o maior pico verificado nesta curva a 29 Hz, com uma amplitude de 0,56 mm/s. Em relação a 39 Hz, não se observa nenhum pico, mas é uma zona com alguma elevação.

A coincidência que ocorre a 16 Hz não tem grande importância, até pela baixa amplitude. Por outro lado, a 28 Hz, é um caso nítido de ressonância, pois a bomba tem uma velocidade de rotação constante de 25 Hz, que também é visível na curva, e esta proximidade pode amplificar a resposta e causar danos à estrutura.

A 71 Hz existe uma coincidência, ao verificar a frequência natural em torno desse valor na FRF, que também é visível um pico na resposta em funcionamento, embora com amplitude relativamente baixa.

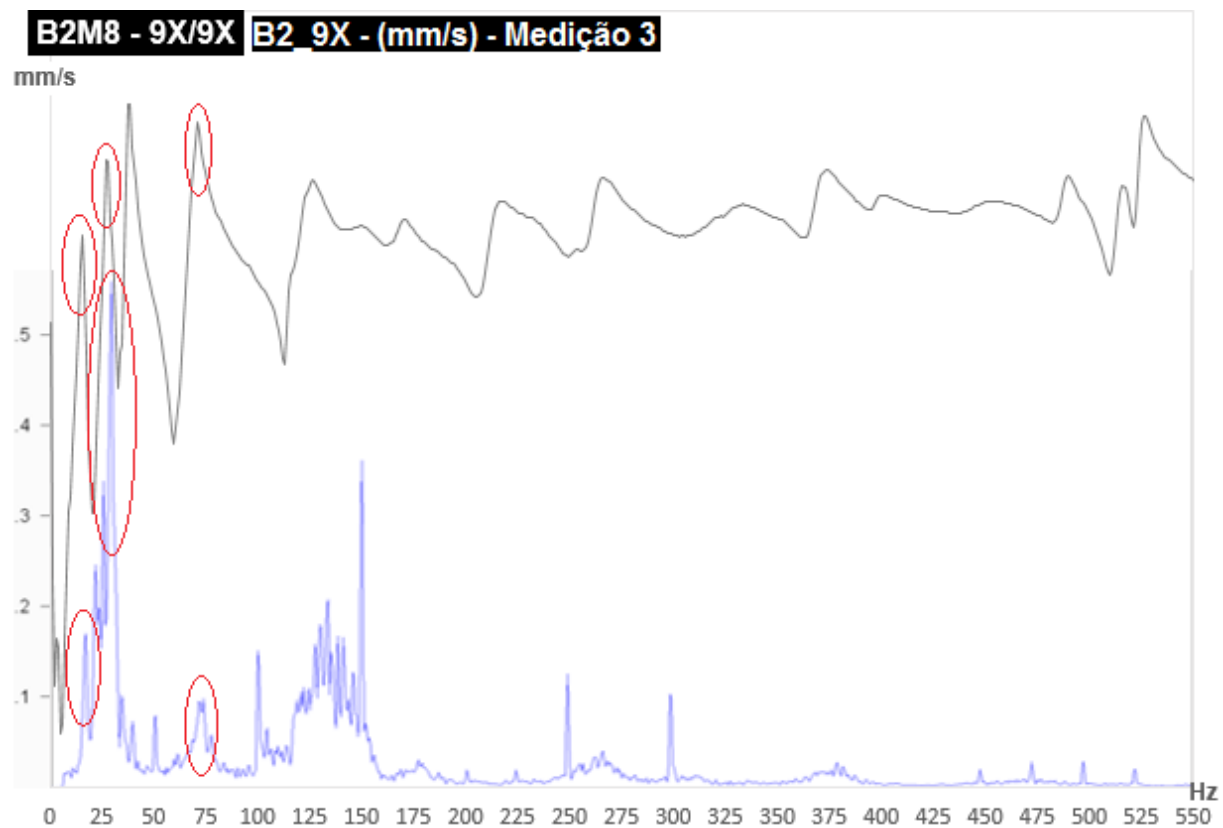


Figura 111 - B2M8 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9X

3.5.2.5 – Medição B2M9 – 9Z/9Z

Observam-se na figura 112, os gráficos da resposta livre e da resposta em funcionamento no ponto 9Z, no final do cotovelo à saída da bomba, na direção vertical, antes da manga de expansão.

Existe uma grande concentração em torno da frequência fundamental, 25 Hz. Havendo picos coincidentes entre a FRF e o espectro de velocidade, a 16, 21, e 30 Hz. Adicionalmente, surge na FRF um pico a 39 Hz, sem correspondência na resposta em funcionamento. Estes picos resultam num fenómeno de ressonância a ter cuidado, pois trata-se de valores em torno da velocidade de rotação da bomba.

Observam-se outros picos coincidentes a 100, 250, e 300 Hz. O pico de 300 Hz já é um pouco amortecido.

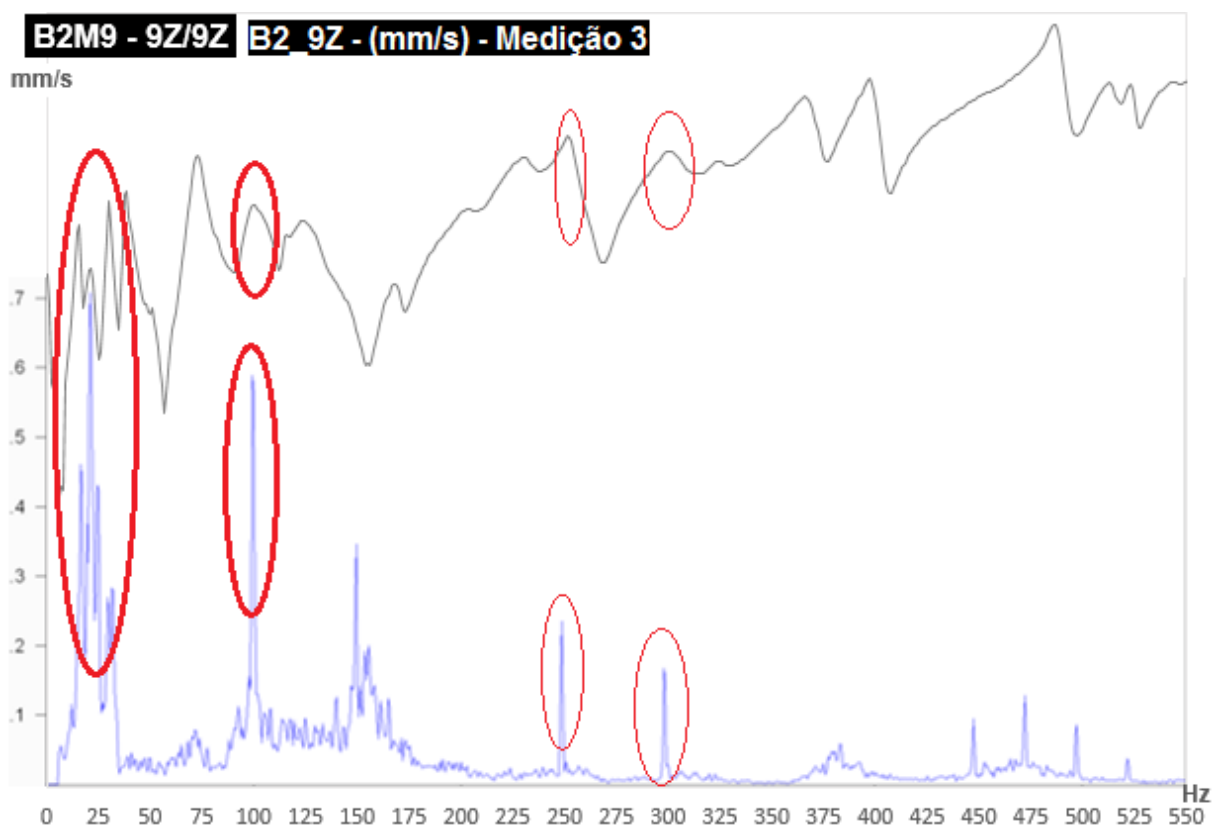


Figura 112 - B2M9 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 9Z

3.5.2.6 – Medição B2M10 – 10Z/10Z

Na figura 113 observam-se os gráficos de resposta livre e em funcionamento do ensaio B2M10 – 10Z/10Z, referente à tubagem, logo após a manga de expansão.

Surge um pico a 114 Hz na FRF que coincide com um pico na resposta em funcionamento, a 113. Devido à proximidade, considera-se ser uma zona de ressonância.

A 473 Hz na resposta em funcionamento, existe um pico que se situa numa possível zona de frequência natural, entre 470 Hz e 480 Hz, com maior valor a 481 Hz.

Nota-se as diferenças principalmente entre as FRF do caso anterior, 3.5.12, e a 3.5.13, que se referem a ensaios antes e depois da manga de expansão, respetivamente.

Verifica-se pela figura anterior, 112, que a FRF mostra muito mais picos e zonas de oscilação antes da manga de expansão, pois a resposta é dada tendo em conta todo o sistema complexo da bomba.

Após a manga, a resposta é isolada da bomba, e portanto deteta com maior foco, frequências naturais que ocorrem naquela secção de tubo, ou que sejam suficientemente relevantes para serem visíveis na FRF da figura 113.

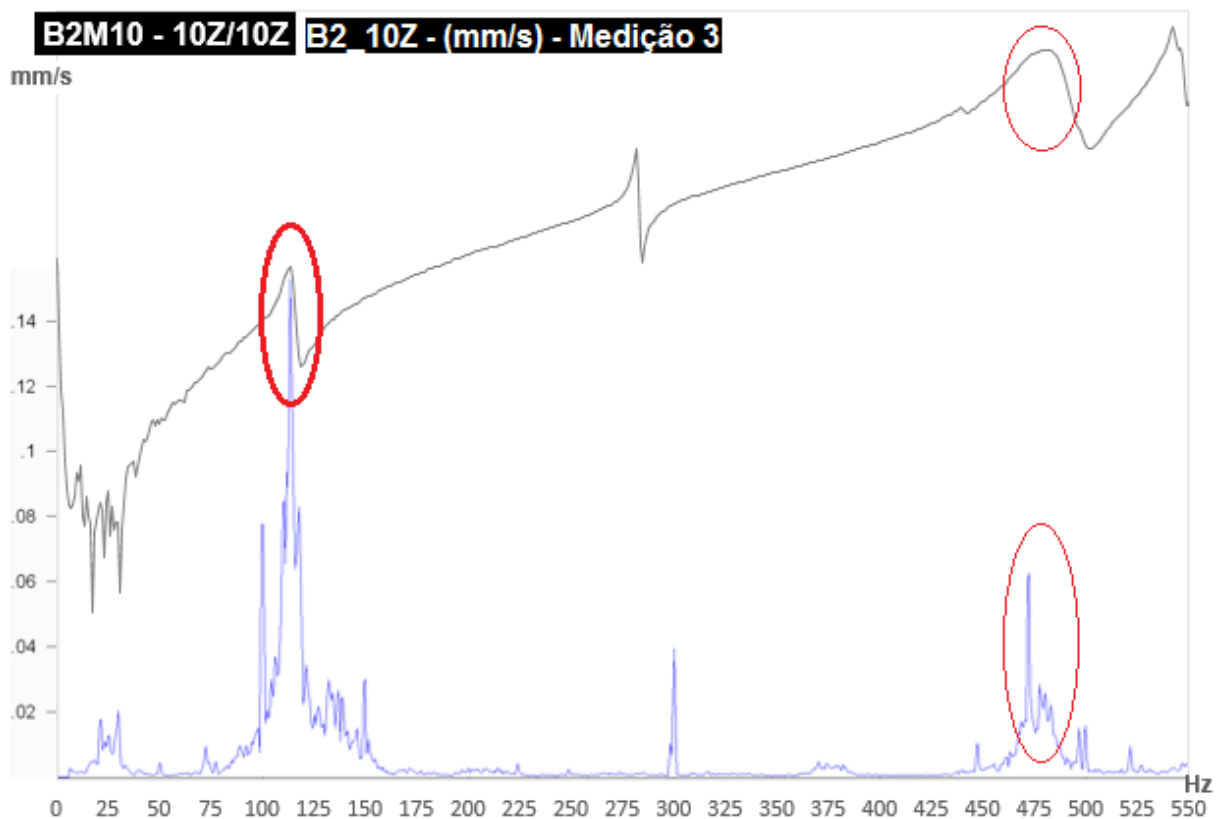


Figura 113 - B2M10 - Resposta livre e resposta em funcionamento do ponto 10Z

3.6 – Comparação entre bombas do mesmo grupo

No presente subcapítulo representa-se as curvas FRF resultantes do segundo ensaio realizado. Este segundo ensaio implicou a colocação do acelerómetro (ponto de resposta) num ponto fixo para as cinco medições, e alterando entre cinco pontos de excitação diferentes. Para diferenciar do primeiro ensaio, as iniciais das medições deste ensaio são “XX”, tal como XXGrupo A, ou XXGrupo B, e estão referenciadas na tabela 13 da página 63.

3.6.1 – Comparação do grupo A

Na figura 114 mostra-se as curvas da resposta em funcionamento no ponto 9Y, referentes à medição 3, para o grupo A. A curva a vermelho refere-se à bomba A1, e a curva a verde pertence à resposta da bomba A2. Verifica-se na figura, que existem dois picos de realçar, em torno de 45 Hz, que varia entre as bombas, e a 50 Hz. Na restante gama de frequências existe coincidência apesar das amplitudes serem ligeiramente diferentes.

Nos seguintes subcapítulos que se seguem com as FRF medidas ao grupo A, aplica-se a mesma regra de cores das curvas para facilitar a compreensão.

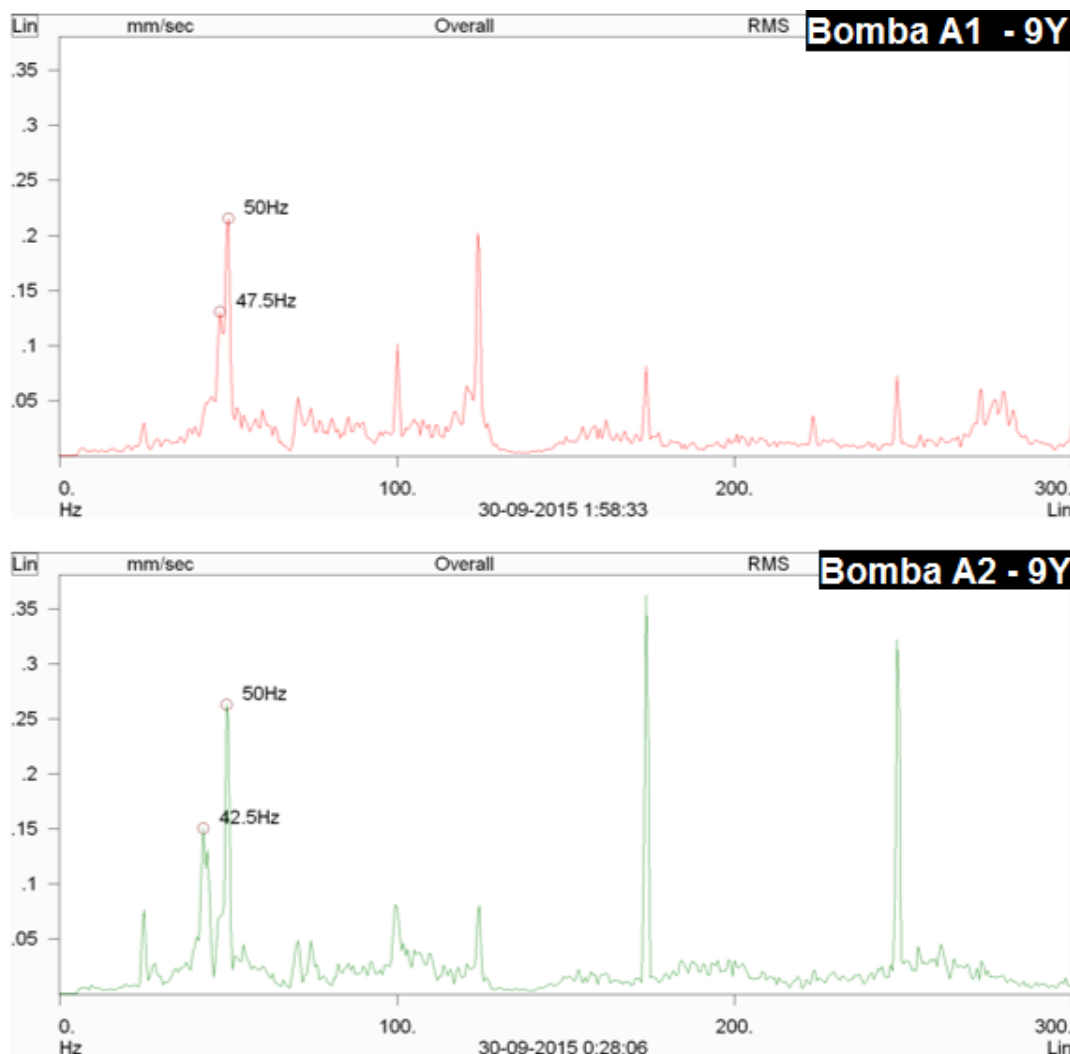


Figura 114 – XXGrupo A - Resposta em funcionamento do ponto 9Y para o grupo A

3.6.1.1 – Medição XXAF1 – 9Y/8Y

O gráfico da figura 115 refere-se à medição XXAF1 – 9Y/8Y, com a aplicação do impacto no ponto 8Y.

As curvas demonstram um comportamento na resposta livre algo semelhante, com algumas frequências importantes, a rondar os 50 Hz. A grande diferença na zona dos 50 Hz é a existência de apenas um pico na bomba A1 (47 Hz) e de serem visíveis dois picos na bomba A2 (a 44 Hz e 48 Hz).

De resto, entre 25 Hz e 50 Hz mostram um aumento idêntico, mantendo as amplitudes de decibéis igualmente idênticas.

Acima das primeiras ordens de velocidade de rotação das bombas, o comportamento já é mais aleatório, ainda assim não variando muito entre as duas curvas, devido à proximidade entre o ponto de resposta e o ponto de excitação, havendo portanto menos elementos variantes.

Comparando com os espectros da figura 114, verifica-se um comportamento interessante: O espectro da bomba A1 possui dois picos algo próximos, a 47,5 Hz e 50 Hz. Por outro lado, o espectro da bomba A2 mostrando na mesma dois picos, mas desta vez mais distanciados, 42,5 Hz e 50 Hz. Este distanciamento resulta nos dois picos mostrados na FRF na curva a verde referente à bomba A2. E devido à proximidade dos dois picos na bomba A1, a única frequência natural que surge na FRF da bomba A1 pode englobar estes dois valores, 47,5 Hz e 50 Hz, até pela largura da curva.

Existe portanto ao redor destas frequências a ocorrência do fenómeno de ressonância, que coincide também com a segunda harmónica da velocidade de rotação da bomba.

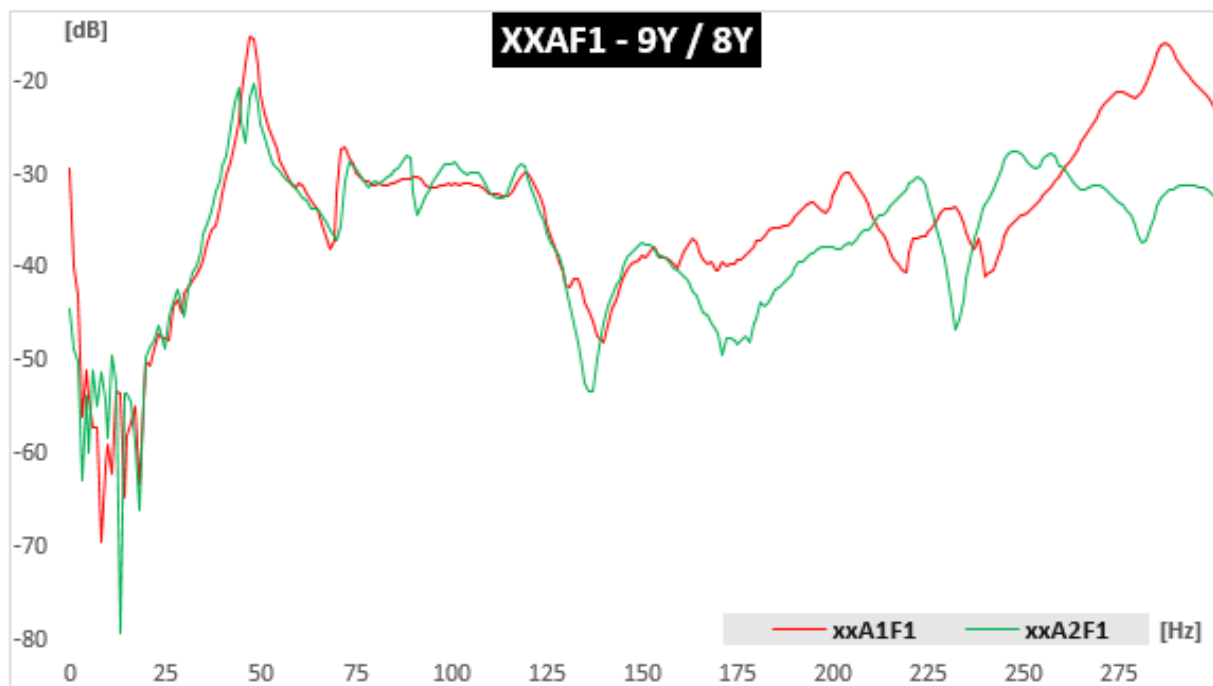


Figura 115 - XXAF1 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 8Y como ponto de excitação

3.6.1.2 – Medição XXAF2 – 9Y/3Y

A figura 116 ilustra o gráfico referente à medição XXAF2 – 9Y/3Y, com o ponto de excitação localizado na bomba junto ao acoplamento, no ponto 3Y.

As curvas mostram uma semelhança de comportamento entre 30 Hz e 125 Hz, ignorando neste caso o que acontece até à primeira ordem de velocidade de rotação da bomba, por ser pouco perceptível devido a uma maior concentração nesta gama de frequências.

Acima de 125 Hz a resposta livre do sistema já começa a ser pouco comparável, pois cada sistema é único apesar de ser projetado de igual forma, no entanto as tendências de subidas e descidas em decibéis seguem o mesmo comportamento. Mais uma vez surge um pico a 47 Hz na bomba A1 e dois picos a 44 Hz e 48 Hz na bomba A2, tal como acontecia na medição XXAF1.

Comparativamente com os espectros da figura 114, observa-se a mesma particularidade entre 40 Hz e os 50 Hz. Sendo a explicação a mesma que foi dada anteriormente em 3.6.1.1.



Figura 116 – XXAF2 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 3Y como ponto de excitação

3.6.1.3 – Medição XXAF3 – 9Y/2Y

A figura 117 mostra o gráfico da medição XXAF3 – 9Y/2Y, com o ponto de excitação localizado no motor junto ao acoplamento, no ponto 2Y.

Nesta medição é visível, pela curva mais irregular, o acréscimo do ruído, resultado da distância entre o ponto de resposta e o ponto de excitação. No entanto as curvas assemelham-se na gama de frequências entre 30 Hz e 80 Hz, seguindo depois uma variação da amplitude em decibéis comparável entre as duas bombas.

Verifica-se a mesma situação já mencionada, um pico na bomba A1 a 47 Hz, e dois picos a 44 Hz e 48 Hz na bomba A2, que comparando com a figura 113, chega-se à mesma conclusão anteriormente explicada.

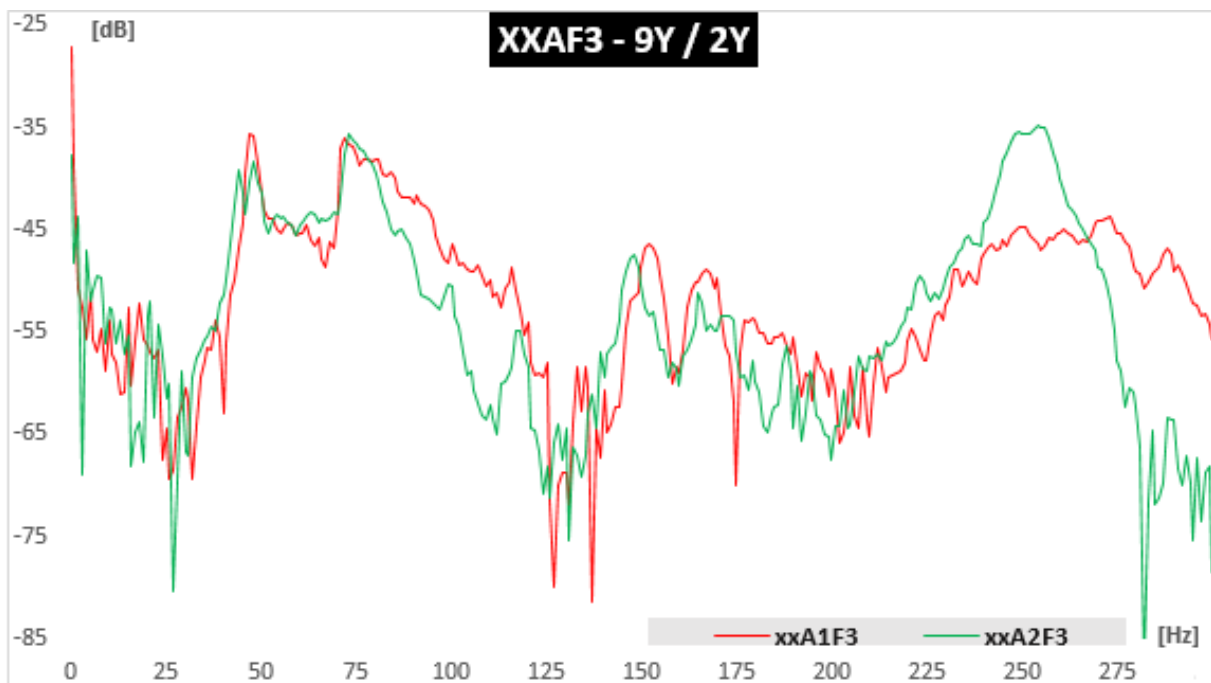


Figura 117 – XXAF3 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 2Y como ponto de excitação

3.6.1.4 – Medição XXAF4 – 9Y/7Y

A figura 118 ilustra o gráfico das FRF da medição XXAF4 – 9Y/7Y, com o impacto do martelo no ponto 7Y, à entrada da bomba.

Existe uma semelhança entre as FRF, nas primeiras quatro ordens de velocidade de rotação das bombas (100 Hz), excluindo as baixas frequências (até 30 Hz aproximadamente), onde a elevada concentração de picos não permite a diferenciação.

Na restante gama de frequências, cada bomba assume um comportamento único derivado ao ensaio praticado.

Surge um pico na bomba A1 a 47 Hz, e dois picos adjacentes na bomba A2, nas frequências 44 Hz e 48 Hz. Comparando com a figura 114, a explicação é mais uma vez análoga a aquela aplicada anteriormente.

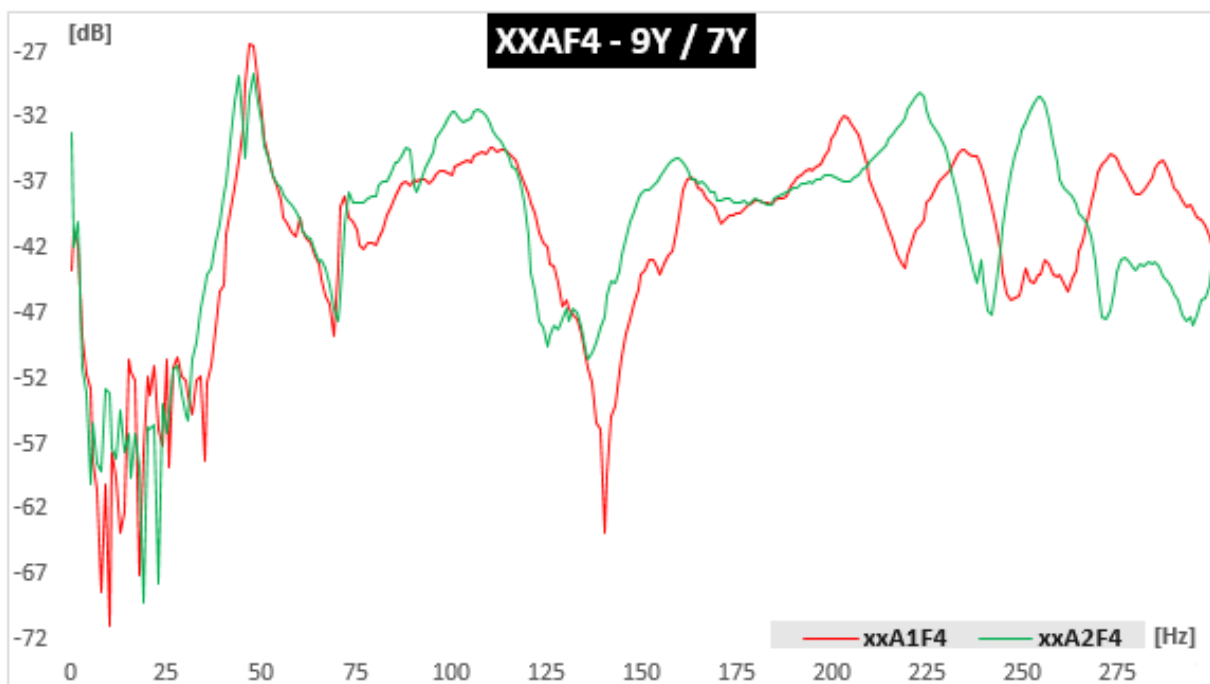


Figura 118 – XXAF4 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 7Y como ponto de excitação

3.6.1.5 – Medição XXAF5 – 9Y/5Y

A figura 119 demonstra o gráfico da medição XXAF5 – 9Y/5Y, com o ponto de excitação localizado à entrada da bomba, no início do cotovelo que faz ligação com a bomba, ponto 5Y.

Volta a existir uma semelhança entre os 30 Hz e os 100 Hz aproximadamente, no entanto já é visível a altas frequências algum ruído que deriva da distância entre o ponto de resposta e o ponto de excitação.

Observa-se na FRF da bomba A1 um pico a 47 Hz, e dois picos a 44 Hz e 48 Hz na bomba A2, que comparando com os espectros da figura 114, aplica-se a mesma explicação dada nos casos anteriores.

Ficando assim explícita a existência de uma frequência natural a rondar os 48 Hz que é identificada pelas cinco medições no mesmo ponto de resposta, 9Y.

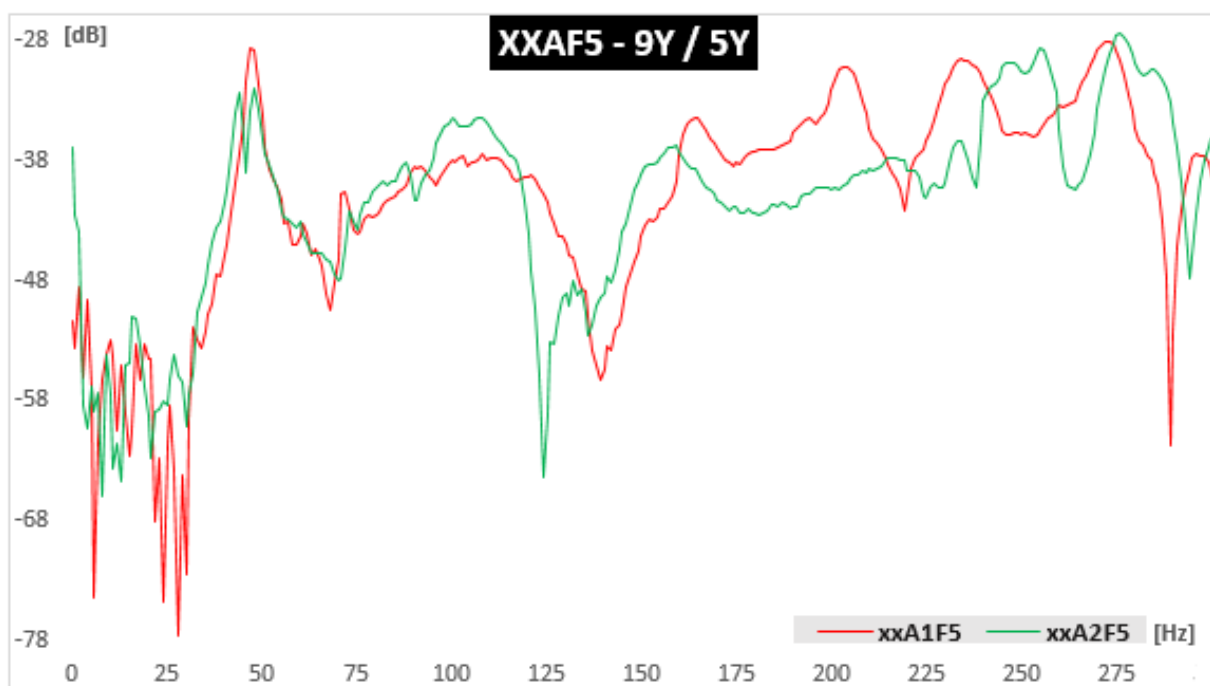


Figura 119 – XXAF5 - Resposta livre no grupo A do ponto 9Y, com 5Y como ponto de excitação

3.6.2 – Comparação do grupo B

Observam-se na figura 120, as curvas da resposta em funcionamento no ponto 9Y, referentes à medição 3, para o grupo B.

A curva a vermelho refere-se à bomba B1, a azul à bomba B2 e a verde à bomba B3. Nos subcapítulos que se seguem com as FRF medidas ao grupo B aplica-se a mesma regra de cores das curvas.

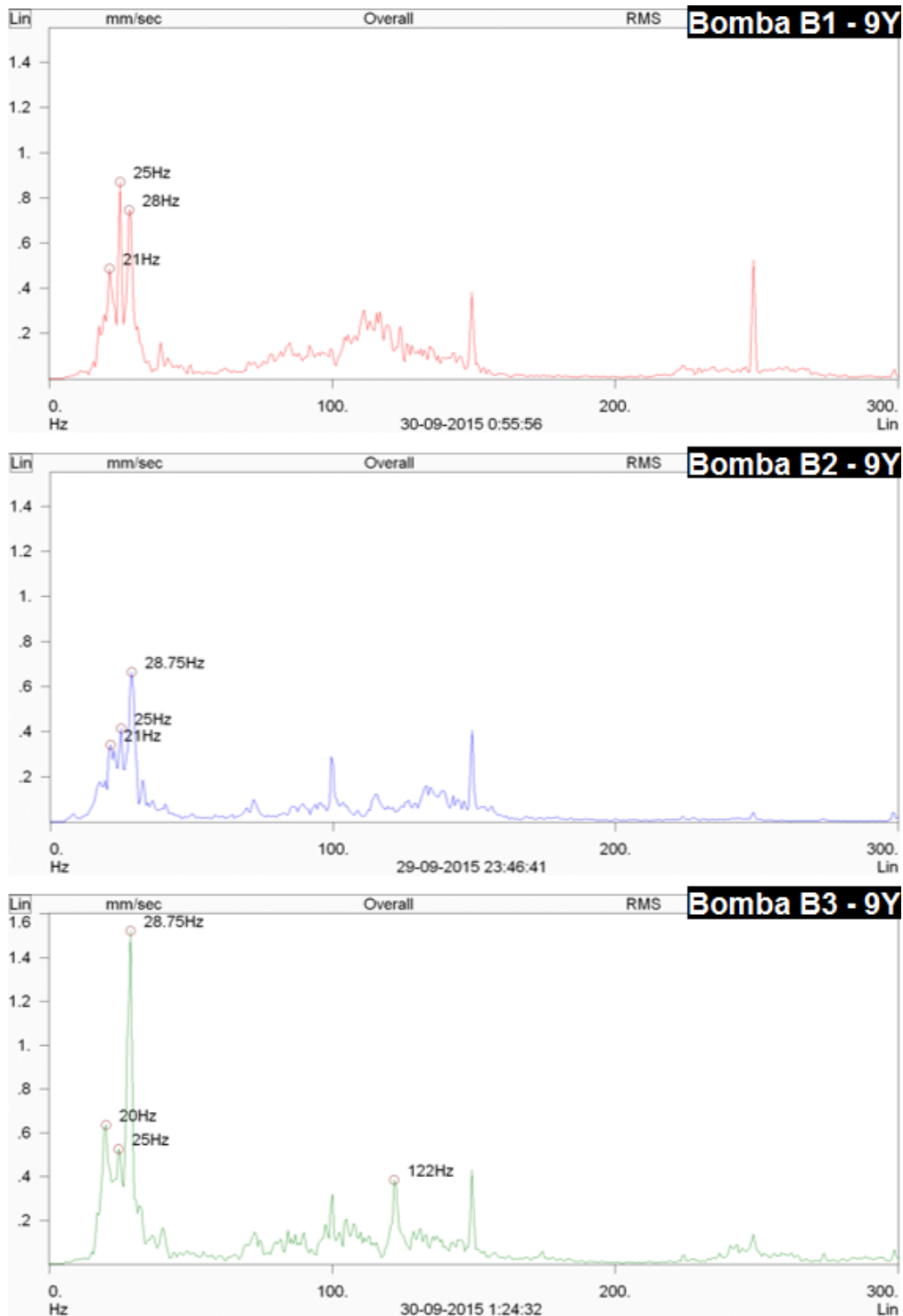


Figura 120 - XXGrupo B - Resposta em funcionamento do ponto 9Y para o grupo B

3.6.2.1 – Medição XXBF1 – 9Y/8Y

A figura 121 refere-se à medição XXBF1 – 9Y/8Y, com o ponto de excitação localizado à saída da bomba, ponto 8Y.

Realçam-se dois picos a baixas frequências, 28 Hz e a 39 Hz. Também a 72 Hz aparece um pico que surge nas três bombas, embora que com amplitudes mais diferenciadas.

O comportamento a médias e altas frequências torna-se irregular e difícil de fazer comparações entre as bombas.

De referir também a proximidade entre o ponto de resposta e o ponto de excitação e a não existência de mangas de expansão nessa distância.

Comparando com a figura 120, verifica-se que existe um pico coincidente com um dos picos do gráfico das FRF, em torno dos 28 Hz, indicando que existe ressonância nesta zona de funcionamento.

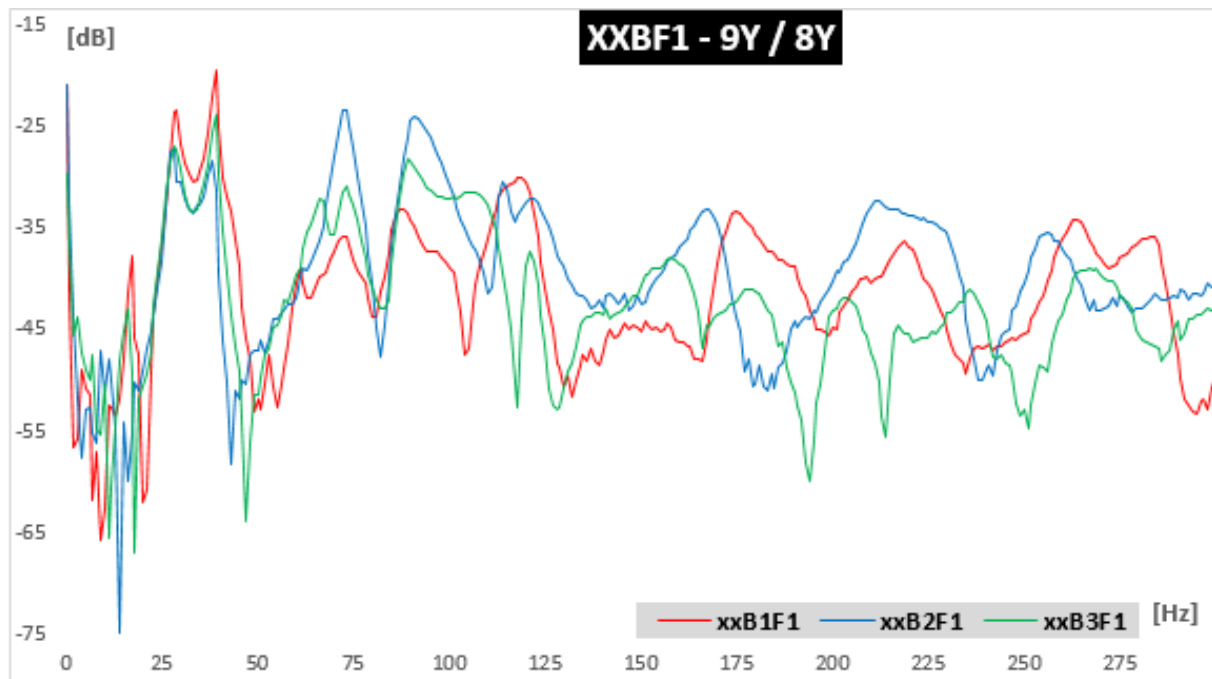


Figura 121 – XXBF1 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 8Y como ponto de excitação

3.6.2.2 – Medição XXBF2 – 9Y/3Y

A figura 122 refere-se à medição XXBF2 – 9Y/3Y, com o ponto de excitação localizado na bomba junto ao acoplamento.

Destacam-se dois picos a baixas frequências, 28 Hz e a 39 Hz, agora com uma maior variação nas amplitudes em decibéis nessas frequências.

O comportamento a altas frequências é mais irregular, e as oscilações nesta medição são mais visíveis devido à distância entre o ponto de excitação e de resposta ser maior do que no caso anterior 3.6.2.1.

Não existe manga de expansão a dividir os dois pontos do ensaio.

Comparando com a figura 120, verifica-se que existe um pico coincidente com um dos picos do gráfico das FRF, em torno dos 28 Hz, indicando ressonância nessa zona de funcionamento.

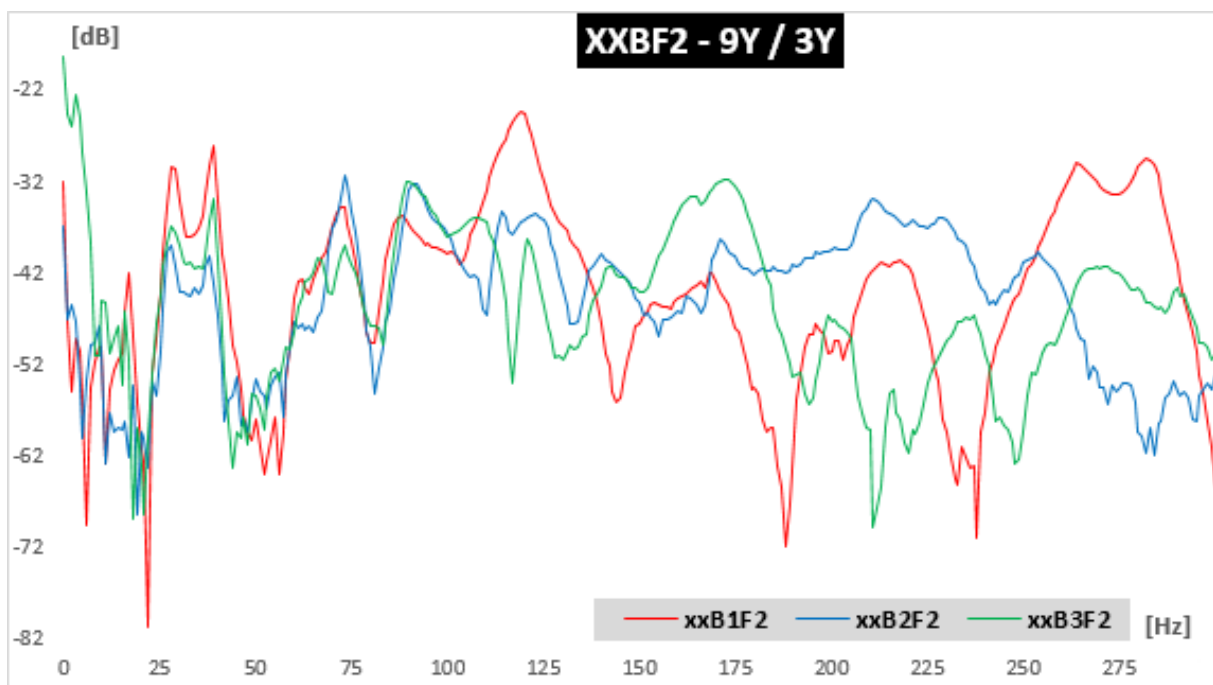


Figura 122 – XXBF2 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 3Y como ponto de excitação

3.6.2.3 – Medição XXBF3 – 9Y/4Y

A figura 123 ilustra a medição XXBF3 – 9Y/4Y, com o ponto de excitação localizado na bomba, na extremidade oposta à do acoplamento.

Destacam-se dois picos a baixas frequências, 28 Hz e a 39 Hz, com uma maior variação nas amplitudes nessas frequências ainda mais evidente do que na medição anterior.

O comportamento a altas frequências dificulta comparações entre bombas, e as oscilações nesta medição são mais visíveis devido à distância entre o ponto de excitação e de resposta, ser ligeiramente maior do que no caso da medição XXBF1.

Não existe manga de expansão a dividir os dois pontos do ensaio.

Comparativamente com a figura 120, averigua-se que existe um pico coincidente com um dos picos do gráfico das FRF, em torno dos 28 Hz, indicando ressonância.

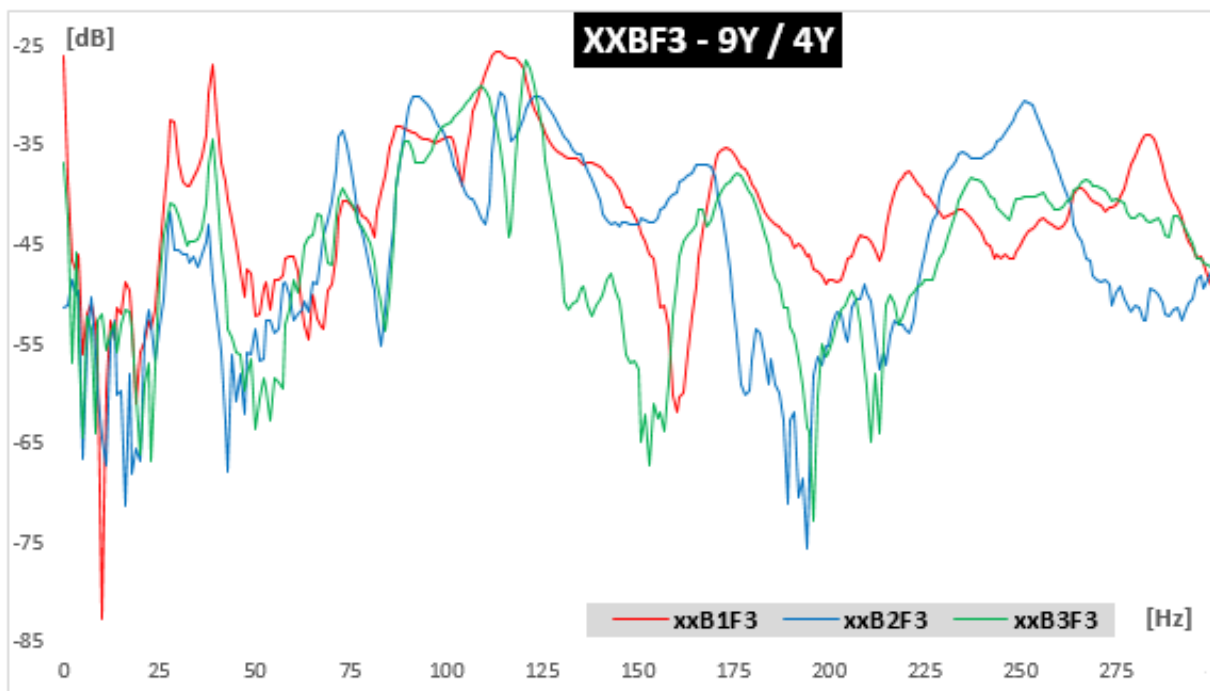


Figura 123 – XXBF3 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 4Y como ponto de excitação

3.6.2.4 – Medição XXBF4 – 9Y/7Y

A figura 124 ilustra a medição XXBF4 – 9Y/7Y, com o ponto de excitação localizado à entrada da bomba, depois da manga de expansão.

Destacam-se dois picos a baixas frequências, 28 Hz e a 39 Hz, com uma certa variação nas amplitudes.

O comportamento a altas frequências é bastante irregular, e as oscilações nesta medição são mais visíveis devido à distância entre o ponto de excitação e de resposta ser ligeiramente maior do que no caso da medição XXBF1.

Realça-se a semelhança entre as medições das figuras 123 e 124, uma vez que os pontos de excitação são próximos, sendo de esperar essa maior correspondência até aproximadamente 125 Hz.

Não existe manga de expansão a dividir os dois pontos do ensaio.

Comparando com a figura 120, observa-se que existe um pico coincidente com um dos picos do gráfico das FRF, em torno dos 28 Hz, indicando ressonância.

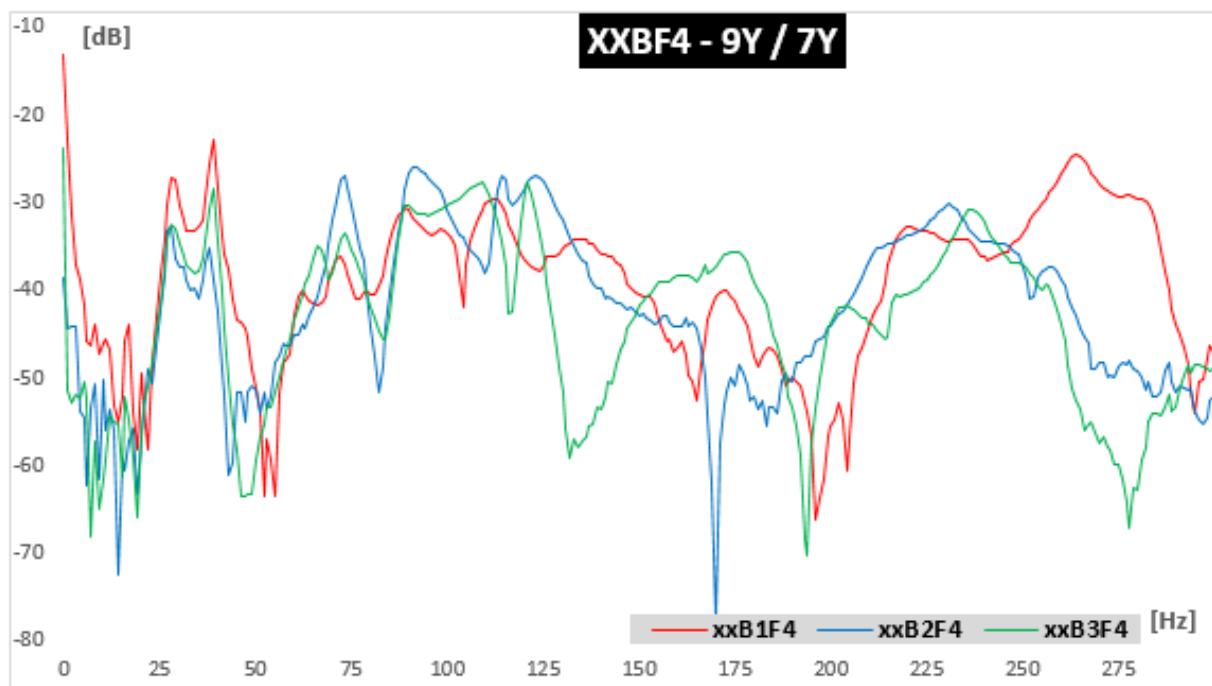


Figura 124 – XXBF4 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 7Y como ponto de excitação

3.6.2.5 – Medição XXBF5 – 9Y/5Y

A figura 125 mostra a medição XXBF5 – 9Y/5Y, com o ponto de excitação localizado à entrada da bomba.

Nesta medição fica clara a diferença na FRF proveniente da manga de expansão que está colocada à entrada da bomba entre o ponto 6 e o ponto 7.

Neste ensaio, a zona a baixas frequências mostra-se com demasiado ruído, não permitindo a identificação de frequências importantes. Esse ruído deve-se ao efeito provocado pela manga de expansão, que isola as vibrações e evita que estas se propaguem ao longo de todo o mecanismo, e também a distância é significativamente maior em relação às medições anteriores.

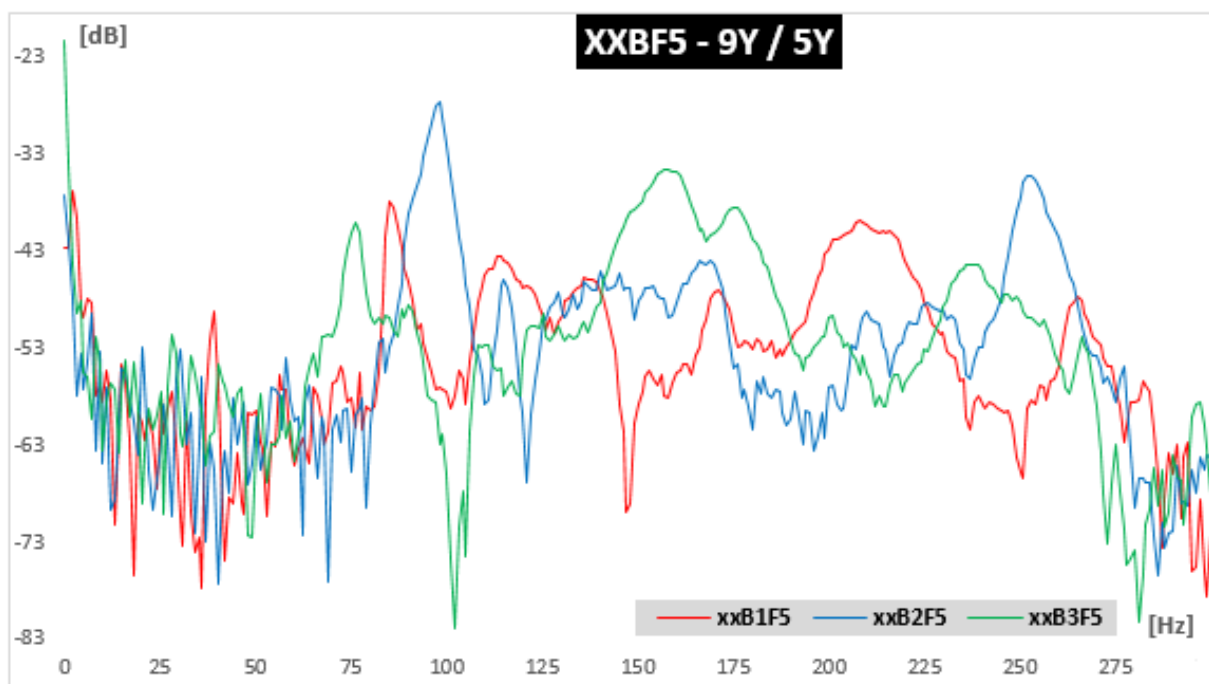


Figura 125 – XXBF5 - Resposta livre no grupo B do ponto 9Y, com 5Y como ponto de excitação

3.7 – Quadro resumo do diagnóstico de defeitos

No quadro da tabela 21 é feito um resumo do diagnóstico dos defeitos nas bombas, tendo em consideração apenas os pontos que excederam os valores limites das amplitudes globais de velocidade, e os que excederam os valores limites de amplitudes globais de aceleração gSE, considerados para os rolamentos.

Tabela 21 - Quadro resumo do diagnóstico de defeitos, com indicação dos pontos de possíveis ocorrências

		Bomba				
		Bomba A1	Bomba A2	Bomba B1	Bomba B2	Bomba B3
Tipo/local de defeito	Desequilíbrio	3Z				
	Desalinhamento					
	Deformação no veio					
	Folga estrutural	3Z				
	Cavitação	5, 6, 7	7X			
	Impulsor	5X	4Z			
	Ressonância na conduta	5, 6, 7		9		6
	Rolamentos	3	4	3	3	3

Assume-se a cor verde no quadro para situações onde não se tenham verificado o defeito correspondente, através dos resultados analisados. As possíveis ocorrências estão assinaladas com a cor amarela, com maior relevo para os rolamentos, uma vez que houve correspondência das frequências de defeito calculadas, ainda que com amplitudes relativamente baixas em alguns casos.

Os casos de ressonância foram obtidos através dos ensaios de impacto realizados à bomba A1 e B2, com maior profundidade. A análise das restantes bombas ficou ao critério de aproximações entre bombas do mesmo grupo, assumindo que as frequências naturais poderão ser semelhantes.

Para os impulsores, foi feita a análise apenas para o grupo A, uma vez que por falta de informação sobre as bombas do grupo B, não se pode garantir o número de pás de cada impulsor, aparecendo com a cor cinzenta no quadro da tabela 21.

A análise da cavitação foi feita, como exceção dos diferentes tipos de defeitos, através dos espectros de aceleração em g's para todos os pontos medidos nas bombas, no entanto, esses espectros não se encontram representados, uma vez que os valores globais de magnitude não excedem os limites assumidos e a identificação da possível cavitação não é clara.

4. Conclusões

4.1 – Conclusão

A manutenção de eletrobombas pode ser tão complexa quanto for o rigor pretendido na análise das suas respostas dinâmicas. O trabalho exaustivo de análise de vibrações conduz principalmente a benefícios a longo prazo, a nível de eficiência e vida útil dos equipamentos, e naturalmente na redução de custos, se assim se justificar a aplicação da manutenção condicionada. Neste trabalho foi possível abordar apenas as situações que estavam ligadas a respostas vibratórias, cujas amplitudes excediam os valores preconizados pelas normas.

O estudo dos gráficos de valores globais da velocidade permitiu constatar a importância dos trabalhos de manutenção, que tiveram uma repercussão efetiva no correto funcionamento das eletrobombas. Observou-se, regra geral, um menor valor global na terceira medição. Uma vez que a manutenção implicou a injeção de massa lubrificante nos bocais dos rolamentos, confirma-se, pelos espectros de aceleração gSE, uma tendência para menores valores em amplitude das frequências características de defeito, na medição após a manutenção, ou em alguns casos, na completa supressão desses mesmos picos. Esta diminuição de valores indica uma real necessidade em manter os rolamentos sempre com uma lubrificação adequada, a fim de evitar fricções desnecessárias entre os elementos rolantes, que provocam uma diminuição do tempo útil operacional de um rolamento.

As eletrobombas não apresentam, no geral, um funcionamento fora do normal. Mesmo em casos de valores globais que excedem os valores limites da norma aplicada, os horários de operação das eletrobombas não são muito longos, não havendo preocupações nesse sentido.

Relativamente aos ensaios de impacto realizados, estes permitiram obter a resposta de cada eletrobomba, por observação das FRFs, e assim ter a noção de quais eram as características dinâmicas de cada grupo, especificamente, no que respeita às suas frequências naturais. Conclui-se que, as bombas do mesmo grupo apresentam um comportamento semelhante a baixas frequências, o mesmo não acontecendo para a gama das frequências mais elevadas.

A medição das FRFs para a análise de vibrações é uma ferramenta importante, uma vez que, pela análise das frequências naturais da estrutura, é possível despistar a origem de certas amplitudes de resposta excessiva, quando em condições de funcionamento. Por exemplo, no caso de um certo pico da resposta operacional ocorrer a uma frequência natural, identificada na FRF, essa mesma resposta poderá estar a ser amplificada pelo fenómeno da ressonância, podendo dar a entender que existem notórios defeitos associados, por exemplo, ao desalinhamento ou ao desequilíbrio. Assim, ao verificar que a resposta continua elevada, mesmo após serem efetuadas operações de manutenção no sentido de corrigir os problemas comuns, será importante avaliar e reformular a estrutura, por forma a afastar a frequência operacional da zona de ressonância.

4.2 – Desenvolvimentos futuros

Futuramente, tendo como base o trabalho iniciado nesta dissertação, poderá ser feita uma análise mais profunda e sistemática, não só aos dois grupos de bombas estudados, mas também a outras estações elevatórias, para assim ter um controlo mais ativo e condicionado, sobre o funcionamento dos equipamentos.

As medições operacionais foram analisadas tendo em conta o estado de funcionamento de cada eletrobomba, por forma a tentar compreender a influência das eletrobombas adjacentes nos níveis de vibração, no entanto esses resultados não foram conclusivos através das técnicas utilizadas. Assim, para poder separar a influência das eletrobombas adjacentes, em operação, no ato da medição de apenas uma, recomenda-se a análise sincronizada no tempo.

Adicionalmente, para enriquecer o diagnóstico e análise dos equipamentos, recomenda-se a exploração de outras metodologias de diagnóstico, como seja a termografia, a análise acústica, ou a análise de corrente elétrica.

Em termos de contributos científicos, sendo o tema relacionado com aplicação direta de assuntos já estudados anteriormente sobre manutenção e métodos de diagnóstico de avarias, há a acrescentar a relação entre a resposta livre do sistema e a sua resposta operacional, relação esta que permite identificar possíveis respostas elevadas que se devem a uma ressonância e não a um possível defeito do sistema. Nesse sentido, uma sugestão seria a implementação de um sistema computadorizado que não faça o utilizador depender diretamente de aparelhos de análise, disponíveis no mercado, como é o caso do coletor de dados portátil, utilizado neste trabalho, sendo que estes significam um investimento avultado em termos de equipamentos e também de programas dedicados. Este sistema teria potencial, se realizado em programas versáteis e independentes, como por exemplo *LabView* da *National Instruments*, ou *Matlab*, sendo apenas necessário, além das licenças legais dos programas, um conjunto reduzido de equipamentos, como sendo o acelerómetro, cabos de ligação ou computadores portáteis, podendo neste sentido explorar as funcionalidades do “*Raspberry pi*”, como computador dedicado para este sistema.

5. Bibliografia

- [1] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [2] M. Brito and Eurisko, "Manutenção," *AEP - Associação Empresarial de Portugal - Manual Pedagógico PRONACI*, 2003.
- [3] J.-P. Souris, *Manutenção Industrial – Custo ou Benefício?* LIDEL - Edições Técnicas Limitada, 1992.
- [4] J. P. S. Cabral, *Organização e gestão da manutenção*. 2006.
- [5] J. Moubray, *Reliability-centred maintenance*, Second edi. Butterworth-Heinemann, 1997.
- [6] N. S. Arunraj and J. Maiti, "Risk-based maintenance—Techniques and applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, no. 3, pp. 653–661, 2007.
- [7] Norma EN 13306:2010-en, "Manutenção. Terminologia da manutenção." .
- [8] J. Cabral, *Gestão da Manutenção de equipamentos, instalações e Edifícios*, 3ª edição. LIDEL - Edições Técnicas Limitada, 2013.
- [9] P. Girdhar and C. Scheffer, *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. Elsevier, 2004.
- [10] P. Jayaswal, a. K. Wadhvani, and K. B. Mulchandani, "Machine Fault Signature Analysis," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2008, pp. 1–10, 2008.
- [11] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, Fifth Edit. Pearson, 2011.
- [12] Norma ISO 17539:2011, "Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines." .
- [13] D. H. Shreve, "Signal processing for effective vibration analysis," *IRD Mechanalysis, Inc, Columbus, Ohio*, no. November, 1995.
- [14] AD Elster, "What is a Fourier transform? -Questions and answers in MRI." [Online]. Available: <http://mri-q.com/fourier-transform-ft.html>.
- [15] National Instruments, "Software filtering : Windowing - General Analog Concepts," 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/5357/en/>.
- [16] A. A. Roque, T. A. N. Silva, J. M. F. Calado, and J. C. Q. Dias, "Detecção de defeitos em rolamentos – Uma aproximação didáctica," *Conferência de Engenharia "Engenharias'07 - Inovação e Desenvolvimento"*, 2007.
- [17] L. P. Ponci and P. M. Rodrigues da Cunha, "Previsão de falha em rolamentos por análise espectral e de envelope," pp. 1–10, 2011.

- [18] C. Sequeira, "Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerómetros," *Revista Manutenção*, vol. 116, pp. 4–6, 2013.
- [19] A. Urgueira and R. Almeida, "Instrumentos de Medida - Vibrações Mecânicas e Ruído," *Slides teóricos*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [20] LDS-Dactron, "Basics of Structural Vibration Testing and Analysis," *Application Note AN011*, vol. 1, pp. 1–16, 2003.
- [21] B. J. Schwarz and M. H. Richardson, "Experimental Modal Analysis," *CSI Reliability Week*, no. January, pp. 1–11, 1999.
- [22] P. Brown, M. A. D. Velocity, and S. D. The, "Fundamentals of Vibration Measurement and Analysis Explained," *Lifetime Reliability Solutions*, vol. 61, no. 0.
- [23] A. Bilosová, "Modal Testing," European Social Fund in the Czech Republic, 2011.
- [24] R. M. Dondelinger, "The fundamentals of Modal Testing," *Agilent Technologies*, no. October, pp. 388–392, 2009.
- [25] R. L. Sanks, *Pump Station Design*, Second Edi. Butterworth-Heinemann, 1998.
- [26] M. Prosoli, "Centrifugal Pump Overview," *Slides teóricos*. Pumps Plus Inc.
- [27] J. Evans, "A Brief Introduction To Centrifugal Pumps," *Pump ED 101* - <http://www.pumped101.com/>.
- [28] E. Edge, "Pump impeller types." [Online]. Available: http://www.engineersedge.com/pumps/impellar_classification.htm.
- [29] R. Birajdar, R. Patil, and K. Khanzode, "Vibration and noise in centrifugal pumps - Sources and diagnosis methods," *3rd International conference on Integrity, Reliability and Failure*, pp. 20–24, 2009.
- [30] SCHENCK Rotec GmbH, "Why balancing." [Online]. Available: <http://www.schenck-rotec.com/company/library/index.php>.
- [31] N. Corporation, "Understanding couplings's lube needs." [Online]. Available: <http://www.reliableplant.com/Read/12498/couplings-lube>.
- [32] VNC Bearing, "Common causes of bearing failure." [Online]. Available: <http://www.vncbearing.com/common-causes-bearing-failure/>.
- [33] Engineering360 (IEEE GlobalSpec), "Radial ball bearings information." [Online]. Available: http://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/bearings_bushings/radial_ball_bearings.
- [34] I. Y. Önel, K. B. Dalci, and İ. Senol, "Detection of bearing defects in three-phase induction motors using Park's transform and radial basis function neural networks," *Sadhana*, vol. 31, no. 3, pp. 235–244, Jun. 2006.
- [35] M. a. Abu-Zeid and S. M. Abdel-Rahman, "Bearing problems' effects on the dynamic

performance of pumping stations,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, no. 3, pp. 241–248, 2013.

- [36] Mobius Institute, “Absolute basics of analyzer settings.” [Online]. Available: [http://www.ilearn-online.com/promovies/Absolute basics of analyzer settings/Absolute basics of analyzer settings_controller.swf](http://www.ilearn-online.com/promovies/Absolute%20basics%20of%20analyzer%20settings/Absolute%20basics%20of%20analyzer%20settings_controller.swf). [Accessed: 28-Jan-2016].
- [37] SKF, “Bearing Frequencies Calculator.” [Online]. Available: <http://webtools3.skf.com/engcalc/calculator/freqcalc/bearing/index.jsp>. [Accessed: 17-Jan-2016].
- [38] Norma ISO 10816-1:1995, “Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines.” .