



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

José Pedro Peres Alves de Freitas Fresta

**MONITORIZAÇÃO E ANÁLISE MODAL DE
ESTRUTURAS METÁLICAS**

**Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Mecânica Estrutural orientada pelo Professor Doutor
Carlos Alberto da Silva Rebelo e pela Professora Doutora Aldina Maria da
Cruz Santiago, apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

janeiro de 2023

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

José Pedro Peres Alves de Freitas Fresta

Monitorização e Análise Modal de Estruturas Metálicas

Monitoring and Modal Analysis of Metallic Structures

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,
orientada pelo Professor Doutor Carlos Alberto da Silva Rebelo e pela Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Janeiro de 2023



AGRADECIMENTOS

Na conclusão da presente dissertação não posso deixar de expressar a minha consideração e sincero agradecimento a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o encerrar deste capítulo.

Ao Professor Carlos Rebelo pela orientação, sentido crítico e paciência ao longo de todo este processo. Pelo acompanhamento nas saídas de campo, ensinamentos e incentivos. À Professora Aldina Santiago por toda a disponibilidade.

A toda a equipa do Grupo VESAM inserida no projeto, em particular ao Eng.º Filipe Santos, que proporcionou a realização do tema. A abertura para a utilização das instalações, a partilha de conhecimento e experiências.

Ao grupo de amigos que esta etapa académica me proporcionou. Em todas as suas diferenças encontrei incentivo, apoio e companheirismo.

À família. Família que é suporte, perseverança, incentivo e comunhão. Mãe, irmã e avó um enorme obrigado, mas permitam que a maior gratidão se direcione ao nosso querido e eterno professor.

RESUMO

A presente dissertação incide na avaliação, validação e análise preditiva do comportamento estrutural de uma torre de transporte e separação de estilha de madeira, com vista a identificar eventuais problemas estruturais ao longo do tempo.

Numa primeira fase, o caminho passou pelo estudo mais aprofundado da temática monitorização estrutural, das suas valências e métodos, bem como, dos diversos componentes e aplicações práticas. Numa melhor compreensão da resposta estrutural a vibrações surge a necessidade de abordar a análise dinâmica, nomeadamente através do ponto seguinte, que enquadra a análise modal.

Posta a explanação do conhecimento teórico, as aplicações laboratoriais ensaiaram o trabalho de campo proposto, junto da torre. Assim, por fim, são descritos os procedimentos de monitorização a executar, o desenvolvimento e calibração do modelo computacional representativo da estrutura em questão. A monitorização do comportamento *in situ* é realizada com recurso a equipamento em desenvolvimento pelo grupo VESAM, baseada em comunicação digital entre sensores, taxas de amostragem até 1 kHz e envio de informação por modem 4G. A análise modal recorre ao software Artemis.

Destaque para a validação dos dados de monitorização do sistema instalado, através da comparação com o equipamento ISISE-UC, tais como, a resposta do extensómetro e da resposta triaxial do acelerómetro, com ensaios em laboratório e *in situ*, sendo a análise focada na amplitude e frequência dos sinais, avaliação da capacidade de configuração do sensor em termos de sensibilidade, taxa de amostragem e números de amostras, validação da geração de *trigger*, avaliação da capacidade do sistema de monitorização e funcionamento autónomo da recolha e envio de dados. A calibração de modelos numéricos por análise modal, com determinação de frequências próprias e avaliação do amortecimento na estrutura monitorizada, incluindo a avaliação da fiabilidade e representatividade de modelações de elementos finitos do sistema estrutural, considerando um comportamento elástico linear, e a avaliação da influência dos parâmetros com maior impacto na calibração do modelo de cálculo através da análise modal. A influência e comportamento dinâmico de elementos estruturais. A análise preditiva do comportamento estrutural, com a avaliação das cargas dinâmicas induzidas pela vibração de equipamentos industriais.

Palavras-chave: monitorização estrutural, análise modal, estrutura metálica, modelo numérico, elementos finitos, análise preditiva, comportamento estrutural.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the evaluation, validation and predictive analysis of the structural behaviour of a woodchip transport and separation tower, with a view to identifying possible structural problems over time.

In a first phase, the path passed through the more in-depth study of the theme of structural monitoring, its valences and methods, as well as the various components and practical applications. In a better understanding of the structural response to vibrations, the need arises to address the dynamic analysis, namely through the next point, which fits the modal analysis.

After the explanation of the theoretical knowledge, the laboratory applications tested the proposed field work, next to the tower. Thus, finally, the monitoring procedures to be carried out, the development and calibration of the representative computational model of the structure in question are described. In situ behaviour monitoring is carried out using equipment being developed by the VESAM group, based on digital communication between sensors, sampling rates of up to 1 kHz and sending information via 4G modem. The modal analysis uses the Artemis software.

Emphasis on the validation of the monitoring data of the installed system, through comparison with the ISISE-UC equipment, such as the response of the extensometer and the triaxial response of the accelerometer, with tests in the laboratory and in situ, with the analysis focused on the amplitude and frequency of the signals, evaluation of the sensor's configurability in terms of sensitivity, sampling rate and number of samples, validation of trigger generation, evaluation of the capacity of the monitoring system and autonomous operation of collecting and sending data. The calibration of numerical models by modal analysis, with determination of proper frequencies and evaluation of the damping in the monitored structure, including the evaluation of the reliability and representativeness of finite element modelling of the structural system, considering a linear elastic behaviour, and the evaluation of the influence of the parameters with the greatest impact on the calibration of the calculation model through modal analysis. The influence and dynamic behaviour of structural elements. The predictive analysis of the structural behaviour, with the evaluation of the dynamic loads induced by the vibration of industrial equipment.

Keywords: structural monitoring, modal analysis, metallic structure, numerical model, finite elements, predictive analysis, structural behaviour.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS	ix
SIMBOLOGIA	x
SIGLAS E ACRÓNIMOS	xi
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Enquadramento geral	13
1.2 Objetivos da dissertação	14
1.3 Organização da dissertação	14
2 MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL	15
2.1 Considerações gerais	15
2.2 Objetivos da monitorização	18
2.3 Constituição dos sistemas de monitorização	18
2.4 Métodos de monitorização	20
2.5 Aplicação dos sistemas de monitorização	23
2.6 Instrumentação	24
2.6.1 Considerações gerais	24
2.6.2 Sensores	25
2.6.3 Sistemas de aquisição de dados	38
2.7 Modelação numérica	39
2.8 Problemas e limitações	41
2.9 O futuro do SHM	42
3 ANÁLISE MODAL	44
3.1 Considerações gerais	44
3.2 Modelos de sistemas dinâmicos	46
3.3 Análise Modal Experimental (EMA)	48
3.3.1 Ensaios de vibração ambiental (AVT)	49
3.4 Análise Modal Operacional (OMA)	50
3.4.1 Métodos da Análise Modal Operacional	51
4 CASOS DE ESTUDO	56
4.1 Viga em consola	56
4.1.1 Síntese	56

4.1.2 Cálculo com modelo analítico	57
4.1.3 Elementos base de ensaio	58
4.1.4 Ensaio ENS 201702 – acelerómetros STEVAL.....	58
4.1.5 Ensaio ENS 20190 – Vibração Dinâmica em Consola.....	59
4.1.6 Ensaio ISISE-UC.....	61
4.1.7 Ensaio <i>OneSensor</i>	63
4.1.8 Comparação com modelos numéricos.....	65
4.2 Torre de reciclados – SONAE ARAUCO, O.H.	66
4.2.1 Introdução.....	66
4.2.2 Equipamento de medição.....	67
4.2.3 Modelação numérica.....	73
4.2.4 Resultados.....	75
4.2.5 Instalação do sistema de monitorização	79
4.2.6 Modo de funcionamento do sistema de monitorização	81
4.2.7 Visualização de dados	84
4.2.8 Comparação das frequências naturais de vibração	85
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
ANEXOS	92
Anexo A – Ficha Técnica STEVAL BFA001V1B e IDP004V1	92
Anexo B – Ensaio de testes de validação do equipamento de medição	111
Anexo C.1 – Peça Desenhada: Torre de reciclados - Planta	123
Anexo C.2 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção B.....	125
Anexo C.3 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção D.....	126
Anexo C.4 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção E.....	127
Anexo C.5 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção F	128
Anexo D – Densidades espectrais das acelerações medidas: sistema ISISE-UC.....	129
Anexo E – Densidades espectrais das acelerações medidas: sistema <i>OneSensor</i>	135
Anexo F – Monitorização <i>OneSensor</i> a longo prazo.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Organização de um sistema de monitorização, (Silva L. , 2015).	17
Figura 2.2 – Fluxo modelo de um sistema de monitorização, adaptado de (Vallen Systeme, 2021)	19
Figura 2.3 – Extensómetro de resistência elétrica, (Silva L. , 2015).	27
Figura 2.4 – Sensor de fibra ótica, FBG, adaptado do portal da (HBM, 2021).	28
Figura 2.5 – Extensómetro de corda vibrante, adaptado de (Silva L. , 2015).	28
Figura 2.6 – Paquímetro digital, (Mitutoyo, 2021).	29
Figura 2.7 – Comparador digital, (Mitutoyo, 2021).	30
Figura 2.8 – Dispositivo LVDT (Cavadas, 2008).	30
Figura 2.9 – Célula de pressão de um sistema de nivelamento hidrostático (Santos L. , 2014).	31
Figura 2.10 – Resistência RTD em função da temperatura, adaptado de (TE Connectivity, 2021).	32
Figura 2.11 – Sensor RTD com resistência de platina, (TE Connectivity, 2021)	33
Figura 2.12 – Composição exemplo de um acelerómetro piezoelétrico, adaptado de (PCB Piezotronics, 2021).	35
Figura 2.13 – Exemplo de um acelerómetro piezoresistivo, (ALTHEN, 2021)	35
Figura 2.14 – Deslocamento, captura de imagem e geração do modelo 3D, adaptado de (Manh La et al, 2016).	38
Figura 2.15 – Processo de modelação numérica através do MEF. (Silva V. , 2016)	41
Figura 2.16 – Receita global do mercado de SHM, por região, adaptado de (Brincker, Du, Amador, & Katsanos).	43
Figura 3.1 – Processo de análise de vibrações, teórico e experimental, adaptado de (Machado, 2018).	45
Figura 3.2 – Esquema dos métodos de OMA, adaptado de (Silva L. , 2015).	52
Figura 3.3 – Exemplo do método PP. (Brincker & Ventura, 2015)	54
Figura 4.1 - Modelo 3D da consola com o posicionamento dos acelerómetros (verde) e do motor eléctrico, (Carapito, 2015).	58
Figura 4.2 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #1, adaptado de (Conceição, 2019).	60
Figura 4.3 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #2, adaptado de (Conceição, 2019).	60
Figura 4.4 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #3, adaptado de (Conceição, 2019).	60
Figura 4.5 – Cadeia do processamento de sinal, adaptado de (Conceição, 2019).	61
Figura 4.6 - Equipamento de teste e localização dos acelerómetros.	62

Figura 4.7 - Esquema da viga em consola e a massa adicional, adaptado de (MIRA Systems, 2019).	64
Figura 4.8 – Amplitudes registadas com diferentes configurações, (MIRA Systems, 2019).	65
Figura 4.9 – Quatro configurações (<i>Setups</i>) de medição.	69
Figura 4.10 – Identificação dos pontos de medição ISISE-UC, vista Este adaptada de (MIRA Systems, 2021).	70
Figura 4.12 – Identificação dos pontos de medição <i>OneSensor</i> , vista este adaptado de (MIRA Systems, 2021).	72
Figura 4.13 – Perspetiva real da estrutura metálica da torre, vista Oeste ainda sem painel, adaptado de (MIRA Systems, 2021).	73
Figura 4.14 – Perspetiva do modelo estrutural da estrutura metálica da torre, vista Oeste (esq.) e vista Este (dir.), adaptado de (MIRA Systems, 2021).	74
Figura 4.15 – Modelação do pavimento em gradil metálico, (MIRA Systems, 2021).	75
Figura 4.16 – Modos de vibração. Cima: modo 1 (esq.), modo 2 (dir.); Baixo: modo 3 (esq.), modo 2 (dir.). (MIRA Systems, 2021)	76
Figura 4.17 – Configuração do Modo 1 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)	78
Figura 4.18 – Configuração do Modo 2 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)	78
Figura 4.19 – Configuração do Modo 3 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)	79
Figura 4.20 – Processo de instalação do sistema de monitorização, (MIRA Systems, 2021).	80
Figura 4.21 – Picos espectrais mais frequentes do Piso 7 eixo xx, em funcionamento. (MIRA Systems, 2021)	83
Figura 4.22 – Picos espectrais mais frequentes do Piso 7, eixo xx, em repouso. (MIRA Systems, 2021)	83
Figura 4.23 – Espectros de frequência, eixo xx, esquerda: em repouso; direita: e funcionamento, adaptado de (MIRA Systems, 2021)	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo de ensaios controlados.	21
Tabela 2.2 – Exemplos de sensores de fibra ótica, adaptado de (Aguiar, 2016).	27
Tabela 2.3 – Características bases de acelerómetros. (Braz, 2015) (Solutions, 2020)	33
Tabela 3.1 – Métodos de análise modal, adaptado de (Silva L. , 2015).	44
Tabela 3.2 – Características gerais da resposta estrutural, adaptado de (Brincker & Ventura, 2015).	46
Tabela 3.3 – Comparação da OMA em relação a outros métodos de análise modal, adaptado de (Silva L. , 2015).	51
Tabela 4.1 – Valores de A para a 4 primeiras frequências naturais (Hz), adaptado de (Rebelo, 2016).	57
Tabela 4.2 – Dados relativos ao IPE 120.	57
Tabela 4.3 – Primeiras frequências naturais nos eixos Y e Z do IPE.	57
Tabela 4.4 - Frequências obtidas no ensaio ENS 201702, sem massa adicional.	59
Tabela 4.5 – Frequências obtidas no ensaio com o protótipo <i>OneSensor</i> .	59
Tabela 4.6 – Características dos acelerómetros.	61
Tabela 4.7 – Resultados de ensaio.	63
Tabela 4.8 – Valores de massa adicional aplicada.	64
Tabela 4.9 – Frequências obtidas com as diferentes configurações, adaptado de (MIRA Systems, 2019).	65
Tabela 4.10 – Comparativo de valores de ensaios sem massa adicional.	65
Tabela 4.11 – Comparativo de valores de ensaios com massa adicional	66
Tabela 4.13 – Características dos acelerómetros e posição nas medições	67
Tabela 4.14 – Frequências naturais e amortecimento modal: ISISE-UC	76
Tabela 4.15 – Frequência e configuração de cada modo: MIRA <i>Systems</i>	77
Tabela 4.16 – Frequência e configuração de cada modo: modelo numérico	77
Tabela 4.17 – Categorização de eventos do sistema de monitorização.	81
Tabela 4.18 – Comparação das frequências naturais.	85

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 4.1 - Equipamento de teste e localização dos acelerómetros (Peres, 2019)	62
Fotografia 4.2 – Lado esquerdo: acelerómetros referência 955 e 556 em C1; Meio: acelerómetro referência 917 em C2; Lado direito: acelerómetros itinerantes 915 e 914, igual disposição em C3, C4, C5 e C6 (Peres, 2019).	70
Fotografia 4.3 – Sistema de aquisição de dados ISISE-UC (Peres, 2019).	71
Fotografia 4.4 – Lado esquerdo: acelerómetro em P3; Meio: acelerómetro em P2; Lado direito; acelerómetro em P1 (Peres, 2019).	72
Fotografia 4.5 – Sistema de aquisição de dados VESAM <i>Group</i> (Peres, 2019).	73

SIMBOLOGIA

cm^2 – centímetro quadrado, unidade de área do Sistema Internacional de Unidades;

cm^4 – centímetro à quarta;

g – grama, unidade de medida de massa do Sistema Internacional de Unidades;

GPa – gigapascal, unidade de pressão e tensão do Sistema Internacional de Unidades;

Hz – hertz, unidade de medida do Sistema Internacional de Unidades para frequência;

m – metro, unidade base de medida de comprimento do Sistema Internacional de Unidades;

m/s^2 – metro por segundo quadrado;

mm – milímetros, unidade de medida de comprimento do Sistema Internacional de Unidades;

mV – milivolt (10^{-3} volts), unidade de tensão elétrica;

Nm – Newton metro, unidade de momento do Sistema Internacional de Unidades;

pC – Parsec, unidade de comprimento;

rpm – rotações por minuto, unidade de velocidade angular, não SI, equivalente ao radiano por segundo (unidade do Sistema Internacional);

V/ms^{-2} – volt por metro por segundo quadrado.

SIGLAS E ACRÓNIMOS

AVT – *Ambiental Vibration Tests*

CAGR – *Compound anual growth rate*

CI – *Corrosion Indicator*

DC – *Direct Current*

DE – *Densidade Espectral*

DFT – *Discrete Fourier Transform*

EMA – *Experimental Modal Analysis*

ERA – *Eigen Realization Algorithm*

EUA – *Estados Unidos da América*

FBG – *Fiber Bragg Grating*

FC – *Função de Correlação*

FDD – *Frequency Domain Decomposition*

FFT – *Fast Fourier Transform*

FRFs – *Frequency Response Functions*

FVT – *Forced Vibration Tests*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

GTW – *gateway*

IP – *Infraestruturas de Portugal, S.A.*

IRFs – *Equivalent Impulse Response Functions*

ISHMII – *International Society for Structural Health Monitoring of Intelligence Infrastructure*

ISISE-UC – *Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering - University of Coimbra*

ITD – *Ibrahim Time Domain*

LNEC – *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

MDOF – *Multiple Degree of Freedom*

MEF – *Método dos Elementos Finitos*

MEMS – *Micro Electro Mechanical Systems*

NExT – *Natural Excitation Technique*

ODS – *Operational Deflection Shapes*

OMA – *Operacional Modal Analysis*

PP – *Peak-Picking Method*

PSD – *Power Spectral Densities*

p-LSCF – Poly-reference *Least Squares Complex Frequency Domain*

RD – *Random Decrement*

RTD – *Resistance Temperature Detector*

SDOF – *Single Degree of Freedom*

SEI – Sistema Estocástico de Identificação

SHM – *Structural Health Monitoring*

SOFO – *Surveillance d’Ouvrages par Fibre Optiques*

SONAE – Sociedade Nacional de Estratificados

SPS – *Super Proton Synchrotron*

SSI – *Stochastic Subspace Identification*

STM – *STMicroelectronics*

SVT – *Singular Value Decomposition*

TMA – *Traditional Modal Analysis*

TSA – *Time Series Analysis*

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento geral

O momento atual é marcado por um sector metalomecânico português que se projeta a nível internacional com alguma capacidade e experiência. Ainda assim, em maioria formado por pequenas e médias empresas, salvo exceções, quando comparadas à escala global.

Deste modo, é imperativo ir ao encontro de soluções apelativas que satisfaçam os clientes. Estes tendem a adjudicar uma solução completa ou parcialmente completa ao invés de especialização como refere (Santos F. , 2018). O comprador quer o projeto, fabrico, a montagem e a manutenção, o que requer um domínio abrangente e exigente. Sendo os primeiros já de alargado conhecimento dos concorrentes, a inovação pode e deve passar pela área da manutenção. Enfatizando questões como a sustentabilidade, preservação, durabilidade das estruturas e até fatores económicos, surgem os sistemas de monitorização estrutural.

É fulcral controlar o comportamento real das estruturas, sobretudo aquelas sujeitas a ações dinâmicas relevantes, de forma a antecipar ao máximo possíveis intervenções e minimizar um inúmero leque de consequências. De momento, este exercício é vulgarmente efetuado com base em modelações computacionais, validadas através de parâmetros modais da estrutura – frequências naturais, modos de vibração, coeficientes de amortecimento modais, obtidos mediante ensaios, como diz (Silva L. , 2015). O autor aponta os avanços tecnológicos relativos ao processamento de dados, a par da emergente economia dos microprocessadores, como a grande causa dos progressos visíveis na área.

A presente dissertação foi elaborada na sequência de um período de estágio proposto ao autor por parte da *VESAM Group*. O trabalho efetuado teve como principal contexto o estudo de metodologias de monitorização estrutural e de ferramentas de manutenção preditivas, incidindo na avaliação, validação e análise do comportamento estrutural de casos de estudo.

O sistema de aquisição e tratamento de dados de monitorização em desenvolvimento na empresa *VESAM Group*, com base no qual se fez parte do desenvolvimento desta dissertação, tem como linhas orientadoras os pontos acima descritos. O propósito desta dissertação passa pela validação dos resultados dados pelo referido produto comercial com potencial de recolher dados e com o fim de perspetivar o desenrolar da vida útil de estruturas metálicas.

1.2 Objetivos da dissertação

O objetivo último do presente trabalho seria o de acompanhar os procedimentos de monitorização bem como o desenvolvimento e calibração de modelos computacionais representativos das estruturas usadas nos casos de estudo.

Numa etapa inicial o foco foi validar os dados de monitorização dos sensores da *VESAM Group* através de comparação dos resultados recolhidos pelo equipamento do ISISE-UC, sendo a analogia baseada em parâmetros como a amplitude e frequência dos sinais medidos, avaliação de sensibilidade dos sensores, taxas de amostragem e número de amostras.

Finda a primeira fase, o passo seguinte consistiu na calibração de modelos numéricos recorrendo a uma análise modal. Assim, foram determinadas as frequências próprias e quantificado o amortecimento nas estruturas monitorizadas. A avaliação da fiabilidade e representatividade de modelações de elementos finitos do sistema estrutural, considerando um comportamento elástico linear, contou com a apreciação da influência dos parâmetros com maior impacto na calibração do modelo de cálculo.

Por fim, o propósito foi chegar a uma análise preditiva do comportamento estrutural sujeito a cargas dinâmicas, nomeadamente a vibração proveniente de fatores externos como maquinarias, quer em fase de funcionamento estacionário, quer em fase de arranque ou paragem dos mesmos.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por três capítulos fundamentais, aliados a um ponto introdutório e o conseqüente epílogo.

No capítulo inicial de introdução é contextualizada a elaboração desta dissertação, assim como os objetivos propostos. A explanação teórica exposta nos dois capítulos seguintes, nomeadamente no Capítulo 2 versando a temática da Monitorização Estrutural e no Capítulo 3 apresentando métodos experimentais e numéricos de Análise Modal, é parte essencial do entendimento das metodologias usadas nos casos de estudo apresentados no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta as Considerações Finais.

2 MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

2.1 Considerações gerais

O processo de criar estratégias de deteção e identificação de danos numa estrutura, durante a sua vida útil ou apenas um período pré-determinado, é denominado de monitorização da integridade estrutural – *Structural Health Monitoring* (SHM). Posto isto, é relevante explicar o conceito de dano, na qual (Farrar, C. et al, 2006) define como as mudanças nas propriedades materiais ou geométricas, incluindo nas condições de fronteira e na conectividade, que prejudicam o desempenho do sistema. Já (Aguilar, 2016) avança que a monitorização estrutural pode ser definida como uma contínua avaliação da estrutura com intuito de registar informação fíável acerca do estado da mesma. Auxilia, como completa (Silva L. , 2015), os intervenientes a entender as alterações manifestadas na estrutura causadas por ações internas ou externas e a identificar os respetivos mecanismos de carga e resposta. (Magalhães, 2010), direciona o foco deste processo para o desenvolvimento de sistemas baseados na aquisição permanente de dados – ações e respostas, ou apenas respostas, e no seu processamento automático *online*, de forma a transmitir informação distinta ao usuário acerca do desempenho estrutural.

De facto, o termo SHM é um descendente recente de processos conhecidos como monitorização estrutural ou de integridade estrutural, entre outros. Segundo (Brownjohn, 2006) a monitorização estrutural com recurso a instrumentos de gravação remonta ao início da segunda metade do século passado e, deste então, naturalmente acelerados com o uso de aparelhos de aquisição e armazenamento eletrónico de dados.

O processo inicial de utilização do SHM encontrou facilidades de entrada na indústria de construção mecânica, nomeadamente aeronáutica e automóvel, pela sua simples abordagem não baseada em modelos para identificação de erro, mas em reconhecimentos de padrões aplicados ao histórico de medições. (Farrar, C. et al, 2006) aponta motivos como a variabilidade operacional e ambiental mínima, uma boa correlação entre as medições obtidas e as falhas, tipos de danos padronizados e benefícios económicos para o sucesso deste sistema. De forma mais especializada, o uso da monitorização seguiu para diversas áreas como as plataformas *offshore* ou a comunidade aeroespacial, baseada em métodos de vibração associados a modelos numéricos para identificação de danos. Na engenharia civil, a avaliação de danos através das propriedades modais tem tido desenvolvimentos interessantes com aplicações em diversos tipos de estruturas, como pontes ou monumentos.

Nos últimos anos, o crescente interesse acerca deste conceito é justificado por um enorme potencial associado a significativas melhorias de estabilidade e económicas. É sabido que o desempenho e nível de segurança das estruturas decresce ao longo dos seus anos de utilização,

sendo a aproximação da sua idade crítica um fator determinante. (Antunes, 2011), reforça a sua importância fundamentada na complexidade e arrojo das construções que tendem a emergir, as quais dependem de distintos parâmetros de incertezas como a geometria, propriedades dos materiais e solicitações ao longo da sua vida útil. As presentes diretrizes de sustentabilidade e por vezes a difícil identificação de defeitos e danos em intervenções de reabilitação reforçam a integração do SHM. Ideia corroborada por (Félix, C. et al, 2017), que aponta como insuficientes os tradicionais meios de diagnósticos, a maioria baseada em inspeções visuais periódicas. Justifica com a dissimulação visual da degradação estrutural, sujeita ao juízo do observador, o que causa alguma subjetividade na interpretação. Mesmo o uso de ensaios não destrutivos, segundo o autor, por norma, é desencadeado em fases subseqüentes, de reação ao dano, o que se torna desfasado às necessidades da obra comprometendo a segurança, prejudicando a vertente económica e a eficiência da intervenção.

(Barbosa, 2018) revela que a maioria das empresas opta por uma estratégia de manutenção reativa, alegando a elevada despesa como causa do não uso de um sistema contínuo. A mesma refuta com um estudo do *McKinsey Global Institute*, “*The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype*”, afirmando que a manutenção preventiva poupará milhares de milhões de dólares no ano de 2025 a empresas e fabricantes.

Para tal, como regista (Cura, 2013), a monitorização deve beneficiar de custos acessíveis e fácil utilização. É imperativo que não colida com o funcionamento da estrutura e que seja capaz de detetar o necessário de forma apropriada. (Félix, C. et al, 2017) acredita que um diagnóstico estrutural em tempo útil contribui para uma gestão otimizada de qualidade e segurança das mesmas, potenciando a implementação de políticas de manutenção proactivas, eficientes e económicas.

(Júlio, 2020) acrescenta a evolução tecnológica aos grandes responsáveis deste novo processo, consequência do desenvolvimento de novos sensores e técnicas de medição, grandes melhorias na aquisição e transmissão de dados – sensores em fibra ótica, processamento digital de imagem, ou novas tecnologias de posicionamento e monitorização – GNSS (*Global Navigation Satellite System*), *Laser Scanning*. O autor acrescenta que o recurso a estratégias de *machine learning*, automatizadas, permitem o desenvolvimento de algoritmos para a deteção, localização e caracterização de danos estruturais, facilitando a gerência de avolumadas quantidades de informação por parte do usuário. A evolução do conhecimento e da regulamentação aponta ser inerente ao desenvolvimento e aplicação destes sistemas.

O SHM, engloba um plano de monitoramento com fases distintas (Rebello, C. et al, 2016):

- i. Plano de instrumentação – planeamento das secções a instrumentar, logística do equipamento a utilizar e fenómenos a observar;
- ii. Plano de observação – definir metodologia de observação;
- iii. Modelo de previsão – estabelecer os princípios para o processamento de dados e o seu uso para previsão do comportamento da estrutura.

Destarte, os sistemas de monitorização simbolizam um grande passo para atuar dentro do espaço temporal e modo adequado, nomeadamente nas estruturas metálicas que constituem parte importante no meio construtivo. Possibilita antecipar problemas de fadiga, fenómenos de encurvadura, vibrações excessivas, corrosão, que muitas vezes apenas são detetadas aquando o início de trabalhos de reforço ou reabilitação. Como diz (Brownjohn, 2006), pode isto significar a transição para uma filosofia de conceção baseada em desempenho.

Contudo, o sucesso neste âmbito ainda é algo relativo e até desafiador, olhando tanto para a complexidade e singularidade das estruturas como para a variabilidade das suas respostas dinâmicas a diferentes casos de carga. A integração entre os modelos numéricos e os métodos experimentais tem sido o maior obstáculo. (Brownjohn, 2006), acrescenta que a curto prazo a perspectiva não é otimista pois ainda não é uma realidade obter informação estrutural confiável em tempo real, sendo o êxito limitado a casos laboratoriais e experimentais.

O modo operacional de um sistema de monitorização é esquematizado de forma sucinta na figura que se segue.

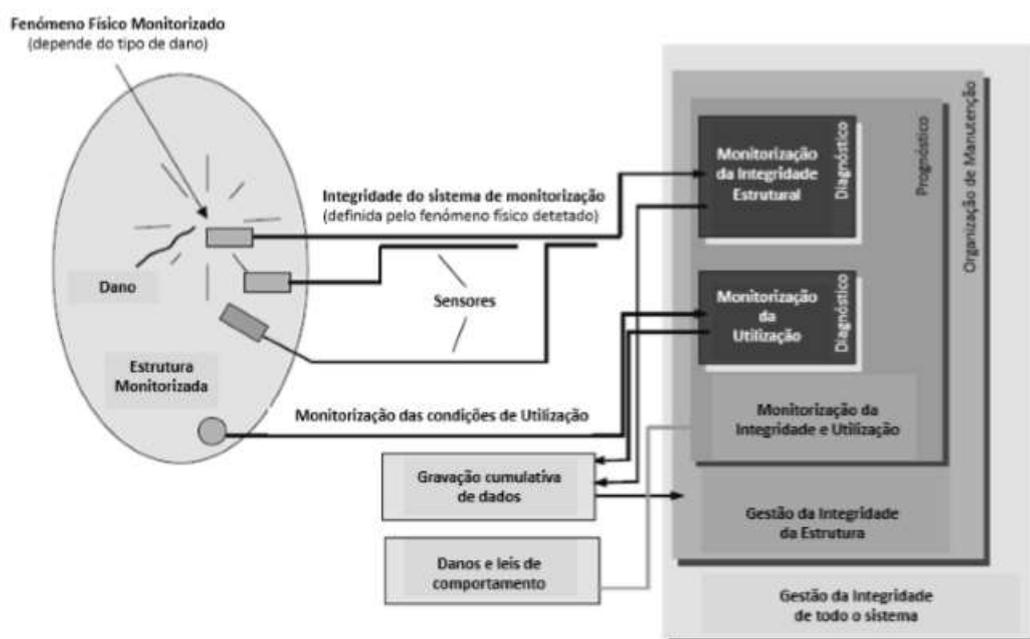


Figura 2.1 – Organização de um sistema de monitorização, (Silva L. , 2015).

2.2 Objetivos da monitorização

Pela sua natureza autónoma e tecnológica, a monitorização beneficia uma melhor compreensão do comportamento global e local de toda uma estrutura. (Brownjohn, 2006) aponta ao objetivo ideal de desenvolvimento de sistemas eficazes e confiáveis de adquirir, gerir, integrar e interpretar os dados de desempenho estrutural, aliando um máximo de informação a um custo mínimo, complementado ou até mesmo eliminando a subjetividade da interpretação humana.

De forma sucinta podem ser reunidos alguns objetivos generalizados inerentes ao SHM:

- Monitorização contínua em tempo real;
- Calibrar modelos numéricos de apoio ao projeto;
- Verificar premissas do projeto: quantificar condições de carga, materiais, sistema estrutural, limites de operacionalidade;
- Detetar atempadamente danos e deterioração da estrutura, possibilitando uma maior eficácia nas intervenções, com impacto direto na redução de custos operacionais;
- Atualizar parâmetros de projetos remotos;
- Detetar anomalias estruturais causadas por desastres naturais ou acidentes, prevenindo colapso da estrutura e perdas humanas;
- Otimizar o uso da estrutura reduzindo paragens devido a reparações, aperfeiçoando o processo construtivo, minimizando envolvimento humano e reduzindo horas de trabalho;
- Evitar desmontagem de partes da estrutura onde não existe qualquer defeito oculto;
- Melhorar aspeto qualidade-custo de manutenção de uma estrutura sabendo que com o uso de um sistema de monitorização há um aumento da certeza da trajetória de vida da mesma.

Por conseguinte, a implementação dos sistemas de monitorização tem o potencial de se tornar um fator essencial durante todo o ciclo de vida de uma estrutura: projeto, construção, manutenção, reabilitação e até demolição.

2.3 Constituição dos sistemas de monitorização

Os sistemas de monitorização têm evoluído de forma considerável nos últimos tempos. Com custos cada vez mais acessíveis, todos os seus constituintes têm melhorado existindo uma melhoria na qualidade de aquisição de grandezas, da frequência de aquisição e até ao nível de processamento e armazenamento.

Segundo (Aguiar, 2016), podemos dividir os principais componentes de um sistema de monitorização em quatro pontos, com as respetivas funções:

- Sistema sensorial – mede parâmetros
- Sistema de aquisição e transmissão – transmite e converte o sinal analógico ou digital para o computador;
- *Software* de processamento e armazenamento de dados – informa e guarda para posterior consulta os dados requeridos ao sistema de medição;
- Sistema de gestão de dados e de apoio à decisão – organiza de forma temporal e espacial os dados recebidos;
- Sistema de avaliação estrutural – modelos que completam a interpretação de dados e proporcionam conclusões por parte dos intervenientes.

A Figura 2.2 resume o fluxo tipo de um sistema de monitorização, complementando a descrição anterior.



Figura 2.2 – Fluxo modelo de um sistema de monitorização, adaptado de (Vallen Systeme, 2021)

(Silva L. , 2015) chama a atenção para a importância de os sistemas funcionarem de forma isolada, o que implica que a falha de algum componente não inviabiliza a operacionalidade do restante sistema.

Tendo conhecimento da constituição do sistema base é obrigatório a parte responsável delinear uma estratégia com objetivos, baseados nas características do caso de estudo, condições ambientais e fator económico. É importante fasear um processo padronizado de modo a entender e facilitar a monitorização.

Por conseguinte, são identificados os parâmetros pretendidos e planeadas as etapas da monitorização. A criteriosa escolha do sistema de monitorização, tipos de sensores, sistema de comunicação e *softwares* a usar é seguida da instalação criteriosa do sistema nos elementos, os

ensaios, recolha e armazenamento de dados. Por fim, surge a fase de pós processamento de dados onde, auxiliado do sistema de avaliação estrutural, são interpretados e analisados os resultados obtidos para futuras considerações.

2.4 Métodos de monitorização

A inspeção visual é a técnica de deteção de danos, não destrutiva, mais datada e utilizada. De forma habitual, este processo de vigilância vitalícia inclui inspeções de rotina e inspeções profundas. Contudo, como diz (Beskhyroun, S. et al, 2011) pouco confiável e sujeito à subjetividade dos intervenientes, em especial na monitorização de estruturas de grandes dimensões e com áreas de difícil acesso. No entanto, desde sempre se recorreu à observação visual possibilitando a avaliação de sinais prematuros de deterioração ou problemas estruturais, a título de exemplo, no caso do aço, através da deteção de deformações, fadiga, ausência de revestimentos ou presença de corrosão. (Antunes, 2011) afirma que esta metodologia, no presente, pode ser vista como alternativa complementar aos sistemas SHM.

Outras técnicas de avaliação não destrutivas são efetuadas depois da inspeção visual da estrutura, de modo a concluir o diagnóstico estrutural. Nomeadamente no elemento aço, podem ser enumerados diversos testes – ultrassónicos, com partículas magnéticas, por penetração de líquidos, radiografia, entre outros.

(Aguiar, 2016) descreve que através de um conjunto de sensores instalados na estrutura, com medições estáticas e dinâmicas, contínuas ou periódicas, aliadas a algoritmos de análise se identificam danos estruturais provenientes de alteração das propriedades do material ou da geometria do sistema.

Assim, (Antunes, 2011) sintetiza as técnicas de monitorização essencialmente em três grandes grupos:

- Monitorização da geometria;
- Ensaios controlados – testes estáticos ou dinâmicos, não destrutivos, semi-destrutivos ou destrutivos;
- Monitorização contínua.

A monitorização da geometria é por hábito periódica, com intervalos variados e é focada no controlo de eventuais alterações geométricas da estrutura, como por exemplo, assentamentos de fundações.

Os ensaios controlados são caracterizados pela resposta da estrutura à ação de cargas controladas ou à ação ambiente. (Aguiar, 2016) defende que estes possibilitam um

conhecimento mais alargado do comportamento das estruturas como a sua capacidade resistente ou estados de serviço. São bastante comuns no final dos trabalhos de construção ou na reabilitação de uma obra de arte, como explica (Cavadas, 2008).

Tabela 2.1 – Resumo de ensaios controlados.

Ensaio de carga	Tipo de ensaio	Descrição
Testes estáticos	Ensaio à rotura	Aplicação incremental das cargas para verificação da resistência última, complementando modelos numéricos ao recolher informação importante como o seu comportamento não linear.
	Ensaio de carga	Verificam conformidade dos métodos numéricos às condições reais; informam apenas sobre rigidez e condições de apoio.
	Provas de carga	Incremento gradual de carga até atingir limite comportamento linear, determinando carga máxima.
	Ensaio diagnóstico	Caracteriza o comportamento elástico da estrutura, comparando a modelos numéricos, ao aplicar carregamento conhecido sem pretensão de dano.
Testes dinâmicos	Teste de evolução de tensões	Permite conhecer distribuição e amplitude de tensões, nomeadamente em secções críticas.
	Ensaio de vibração forçada	Aplicação de impulsos de amplitude e tempo controlados para vibrar estrutura.
	Ensaio de vibração em regime livre	Adequado para determinar coeficientes de amortecimento, impondo deformação inicial e deixando a estrutura vibrar livremente; caracterizado pela sua função harmónica com amplitude decadente.
	Ensaio de vibração ambiente	Excitação da estrutura proveniente de ação externa; baixos níveis de amplitude de vibração; rigidez estrutural tende a ser sobrestimada e amortecimento subestimado.
Teste de durabilidade	Teste de tração do aço	Avaliação das propriedades mecânicas do aço.
	Teste de impacto	Avaliação da tenacidade do aço.

Assim, os testes estáticos indicam ensaios de carga para verificar a capacidade de carga e/ou rigidez da estrutura. São realizados para medir variações lentas das grandezas, de forma a contribuir para uma posterior análise do comportamento da estrutura. Os resultados destes, em geral, servem de termo de comparação ao longo da vida útil da estrutura ou para usar modelos numéricos estabelecendo um ponto inicial de referência da estrutura e comparar posteriormente modelos calibrados influenciados por possíveis danos ou alterações ambientais. (Rebelo, C. et al, 2016)

Por outro lado, os testes dinâmicos não utilizam os seus resultados de forma direta, pois é trabalhoso e incerto relacionar diretamente os valores medidos com a resistência ou até mesmo correlacionar com a rigidez.

A equação de equilíbrio dinâmico é constituída por forças dinâmicas externas, forças internas dependentes da rigidez, forças de inércia dependentes da massa e forças de amortecimento dependentes da dissipação de energia. Por norma, em engenharia civil, estas últimas são omissas da equação pelo seu baixo valor. Assim sendo, admitindo já quantificadas as forças externas, resta conhecer as outras parcelas, medindo quantidades que relacionem massa e rigidez – quantidades modais: frequências naturais e modos de vibração. (Rebelo, C. et al, 2016)

Os testes de vibração são realizados através de acelerómetros, sistemas de aquisição e posterior processamento de dados, para análise de séries temporais, podendo obter frequências de vibração, coeficiente de amortecimento, fator de amplificação dinâmica e, assim, caracterizar a resposta dinâmica da estrutura associada às suas normais condições de operação ou em cenários de carga recriados. Assim, estes dados podem ser usados para calibrar os modelos de elementos finitos numéricos e de certo modo padronizar referências relativas às características dinâmicas em estruturas idênticas. Contudo, (Cavadas, 2008) sublinha que a ocorrência de danos ou a alteração das condições de apoio proporciona diferentes respostas dinâmicas pois resulta em diferentes parâmetros modais.

Apontando o facto de a excitação ambiente estar sempre presente, (Magalhães, 2010) vai mais longe, idealizando um processamento contínuo de séries temporais, possível através da instalação permanente de um conjunto de acelerómetros, permitindo acompanhar a evolução dos parâmetros modais. Deste modo, face a qualquer evento extremo, uma redução de rigidez e conseqüente diminuição das frequências naturais na estrutura seria detetável. O autor conclui ser esta a ideia base dos SHM baseados em vibração.

Os testes de durabilidade atestam as capacidades mecânicas fundamentais do material, onde se optou por destacar o teste de tração do aço – ensaio uniaxial, de acordo com a norma EN ISO 6892-1 e o teste de impacto – ensaio de Charpy, segundo a norma EN 10045-1. (Simões, 2014)

Por conseguinte, quanto à monitorização contínua, (Antunes, 2011) revela que é agora realidade devido aos avanços tecnológicos ao nível dos constituintes dos sistemas de monitorização, podendo uma estrutura ser monitorizada toda a sua vida útil. Assim, é possível ter uma monitorização de baixa amostragem que pode medir deformações e deslocamentos por um longo período de tempo ou uma monitorização com alta taxa de amostragem medindo a curtos espaços temporais acontecimentos como um acidente.

A escolha do método adequado a usar é essencial com fim a obter os parâmetros a comparar com os resultados numéricos obtidos em projeto. Deste modo, é facilitada a compreensão do funcionamento da estrutura, assim como a avaliação de uma futura manutenção e reabilitação.

2.5 Aplicação dos sistemas de monitorização

Através da possibilidade que os sistemas de monitorização nos dão de acompanhar a evolução dos parâmetros em estudo, permitem o seu uso em qualquer fase da vida de uma estrutura, em especial nas de maior dimensão ou maior complexidade. No entanto, para uma tarefa bem-sucedida é necessário um plano consistente e antecipado que aborde pontos como as grandezas e secções a medir, condições do local, características da estrutura, quantidade de sensores a usar, horários, entre outros.

(Aguiar, 2016) aponta a quatro fases de vida de uma estrutura:

- Fase de construção;
- Fase de ensaios;
- Fase de serviço;
- Fase pós reforço ou reparação.

O uso na fase de construção necessita de ter em atenção a ordem do trabalho de forma a não se tornar um invés ao desenvolvimento da obra. Assim sendo, (Cavadas, 2008) diz ser possível promover ajustes ao projeto inicial, constituindo uma mais-valia na conceção de estruturas traduzida numa maior certeza do sistema estrutural adotado. Deste modo, existe confiança para modernizar técnicas construtivas ou até para utilização de materiais inovadores.

Após o processo construtivo, e antes do período de utilização, é habitual a realização de ensaios no sentido de aferir as condições de segurança. Assim, os valores obtidos são comparados com os do modelo numérico que volta a ser calibrado. Todo este processo ajuda a uma melhor compreensão do comportamento da estrutura e é enquadrado acima de tudo como um procedimento preventivo.

A fase de serviço é talvez o maior desafio pela sua longevidade e possibilidade de sinalizar falhas inerentes quer à durabilidade do material como de imprevistos. (Cavadas, 2008), afirma que dependendo da densidade e nível de instrumentação, a monitorização possibilita a previsão da localização do dano. Segundo (Aguilar, 2016), uma deteção tardia pode ser sinónimo de elevados custos ou até mesmo de encerramento. Em sistemas mais complexos podem ser integrados meios de identificação de acidentes, sismos ou ventos elevados, de modo a compreender os valores de frequência obtidos pelos sistemas de monitorização

Os sistemas de monitorização são ainda úteis numa fase de reabilitação, reparação ou reforço inspirando confiança na substituição de elementos estruturais, avaliando a eficiência das soluções quanto a requisitos como a segurança e durabilidade.

Num caso de estudo da Igreja de Santa Maria de Belém, por (Roque, J. A. et al, 2007), é reforçada a importância dos sistemas de monitorização numa fase de reabilitação, indicados como essenciais quer na preservação do valor histórico e arquitetónico das construções, como no planeamento dos trabalhos de intervenção ou até na avaliação das respetivas intervenções. Foram instalados sistemas de monitorização estática – sensores de temperatura, clinómetros, higrómetro e anemómetro, e sistemas dinâmicos – acelerómetros triaxiais.

Outro caso em registo idêntico é notado por (Varum, H. et al, 2008), na monitorização do arco da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro. Para tal, foi adotado um sistema de fibra ótica com tecnologia de redes de Bragg para medição de deformações e temperatura. O estudo, com sucesso, foi desenvolvido para levantamento de patologias.

Atualmente, segundo (Santos, J. et al, 2020), todo o leque de pontes e viadutos a cargo da Infraestruturas de Portugal, S.A. (IP), o maior gestor deste tipo de estruturas em Portugal, é inspecionado de forma regular. Destaque para algumas obras de arte mais complexas monitorizadas pelo LNEC, como por exemplo a Ponte 25 de Abril. O controlo desta data desde a fase de construção, controlando as várias fases construtivas, à realização de ensaios de carga de receção e o posterior acompanhamento da fase de serviço. Deste modo, foi perspectivado não apenas um controlo de segurança, mas também a validação de pressupostos assumidos em projeto e registo do histórico de tensões nos principais elementos.

2.6 Instrumentação

2.6.1 Considerações gerais

Na prática da instrumentação é importante efetuar um estudo preliminar de modo a definir os objetivos da monitorização, aferir as condições e as grandezas a medir para calibrar o modelo em estudo. Decorrente de tal, são escolhidos os sensores, mais ou menos complexos, aliados a

sistemas de aquisição de dados e as secções a instrumentar. Segundo (Aguiar, 2016), estes podem gerar sinais analógicos, digitais ou híbridos que indicam os parâmetros físicos de interesse ao utilizador. Consoante o tipo de estrutura, (Silva L. , 2015) afirma que se pode optar por equipamentos de registo contínuo de dados e/ou controlo remoto, obtendo deste modo um acompanhamento mais próximo e menores custos de deslocações.

Ao nível de instrumentação, (Aguiar, 2016) divide a sua caracterização de acordo com o tipo de energia de entrada e de saída, dos princípios físicos ou elétricos, das variáveis de medição e dos elementos dos sensores.

Esta secção aborda a instrumentação dos sistemas de monitorização, nomeadamente dos sistemas de aquisição e sensores.

2.6.2 Sensores

Os sensores desempenham parte fundamental no exercício de obtenção das grandezas a medir, visto serem os responsáveis por indicar eventuais anomalias perturbadoras à integridade da estrutura. A seleção dos mesmos, por (Silva L. , 2015), depende de alguns critérios como o custo, a sua funcionalidade, sensibilidade e precisão, entre tantos outros.

(Cavadas, 2008), categoriza de forma distinta grandezas globais e locais. As primeiras, de carácter cinemático, como os deslocamentos globais, flechas, rotações, deslocamentos de aparelhos de apoio, reações de apoio, entre outras, são importantes para uma análise do comportamento global da estrutura. (Antunes, 2011) fala da medição de deslocamentos globais, onde há a necessidade da existirem pontos de referência externos. Para tal, sugere sistemas de posicionamento global (GPS), inclinómetros e sensores de medição de deslocamento linear diferencial (LVDT). As grandezas locais, como extensões e tensões, por norma têm um papel complementar devido a uma maior incerteza associada a um estudo limitado ao ponto instrumentado, uma maior dependência das técnicas e também uma maior sensibilidade aos efeitos de temperatura. Estas podem ser medidas com sensores incorporados ou colocados na superfície exterior da estrutura.

Entretanto, as condições ambientais desempenham parte significativa num projeto, podendo mesmo adulterar medições, pelo que se torna importante adquirir alguns dados *in situ* como a temperatura ambiente, a humidade relativa, a radiação solar, a pluviosidade ou o vento. No mesmo sentido, a durabilidade é outro dos fatores de destaque, nomeadamente através do controlo de corrosão de estruturas metálicas.

Por fim, é recorrente avaliar a resposta dinâmica da estrutura, onde (Antunes, 2011) refere métodos de medição baseados no movimento, aceleração, deformação ou forças em pontos representativos.

A importância destes sistemas é exemplificada por (Antunes, 2011) que relata a implementação de uma combinação de sensores de deformação e temperatura numa ponte pedonal de aço, em Aveiro. As medidas transmitidas pelo sistema possibilitaram o aperfeiçoamento e calibração dos respetivos modelos numéricos, assim como o acompanhamento em tempo real da integridade da estrutura. (Manh La et al, 2016) argumenta com a importância das estruturas de aço e a existência de mais de cinquenta mil casos de pontes de aço deficientes ou de funcionamento obsoleto, nos EUA, que representam uma ameaça crescente à segurança das pessoas.

Não sendo objetivo desta dissertação descrever todos os equipamentos disponíveis, são distinguidos alguns exemplos.

2.6.2.1 Sensores de deformação

Para controlo de deformações da estrutura são utilizados extensómetros. Estes, segundo (Aguiar, 2016), dividem-se em extensómetros de superfície ou de embeber. São distinguidos ainda pela técnica de medição, capacidade de resposta, custo e a distância a que permitem medir, podendo, de forma mais recorrente, ser de resistência elétrica, fibra ótica ou de corda vibrante. As diferentes variantes referidas possibilitam a adaptação do tipo de aparelho em função do caso, contudo, dadas as vantagens económicas e a sua boa fiabilidade, (Aguiar, 2016) afirma que os extensómetros elétricos são os mais utilizados.

Extensómetros de resistência elétrica

Como o próprio nome indica, este último tipo de extensómetro é caracterizado pela medição através da variação da sua resistência elétrica. Estando o local a medir isolado eletricamente, a tal variação corresponde à deformação do material, convertida numa tensão elétrica e amplificada para leitura no recetor, (Aguiar, 2016). A aplicação dos mesmos não se torna viável em elementos de grandes dimensões, devido a possíveis perturbações dos campos magnéticos, (Silva L. , 2015).

A interferência das condições ambientais, em particular da temperatura, altera o comportamento dos extensómetros a longo prazo. Como (Rebelo, C. et al, 2016) assinala, um medidor de tensão numa amostra de teste tem possibilidade de indicar alguma tensão, mesmo não estando sujeito a forças externas. É chamada a tensão aparente, consequência da variação de temperatura, que deve ser calculada de acordo com os coeficientes de expansão térmica indicados à amostra e ao material em uso.

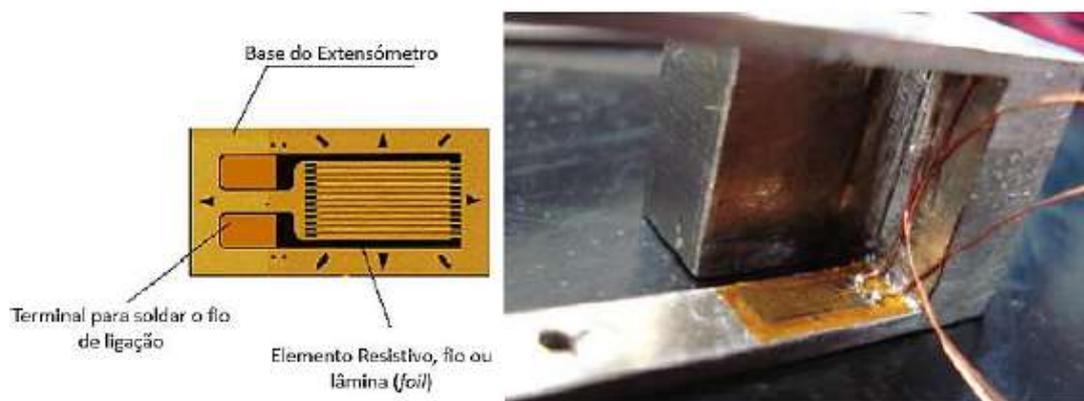


Figura 2.3 – Extensômetro de resistência elétrica, (Silva L. , 2015).

Extensômetros de fibra ótica

Os sensores de fibra ótica operam no seguimento de alterações das propriedades físicas em consonância com a peça em teste. Com a alteração do comprimento, surgem alterações na intensidade e refração da luz que percorre a fibra, na frequência ótica, na fase e na polarização, (Silva L. , 2015). Usufruem de alguma vantagem face aos anteriores, visto transmitirem informação a uma maior velocidade e maiores distâncias, resistem aos efeitos da corrosão, são imunes a interferências de ondas eletromagnéticas e frequência radio, têm capacidade de comunicação simultânea, isto é, possibilitam a existência de uma rede de sensores a realizar variadas medições, são operacionais face a condições climáticas extremas e apresentam dimensões inferiores. Na Tabela 2.2 são exemplificados alguns sensores de fibra ótica mais comuns, funcionando todos eles com base no impacto que determinadas grandezas têm sobre as propriedades óticas e as consequentes variações das características da luz que se propaga no núcleo da fibra, (Aguiar, 2016).

Tabela 2.2 – Exemplos de sensores de fibra ótica, adaptado de (Aguiar, 2016).

Tecnologia	Parâmetro medido	Sensibilidade intrínseca
Redes de Bragg (FBG)	Comprimento de onda	Deformação e Temperatura
Interferómetro de Fabry-Pêrot	Fase	Deformação
Interferómetro de Michelson	Fase	Deformação

(Brownjohn, 2006), ressalva a benéfica utilização destes sistemas, apontando ao exemplo do uso de tecnologia FBG na Ponte da Confederação, no estreito de Northumberland e do interferómetro de Michelson, através do sistema SOFO, disponível comercialmente.

Porém, elevados custos dos seus componentes associado a uma restrita disponibilidade de equipamentos de aquisição de sinal limita estes equipamentos. (Aguiar, 2016) acrescenta a fragilidade das conexões de fibra ótica que torna dúbio o seu uso em condições de obra.



Figura 2.4 – Sensor de fibra ótica, FBG, adaptado do portal da (HBM, 2021).

Extensómetros de corda vibrante

Os extensómetros de corda vibrante atuam através da leitura das frequências de vibração, emitidas quando as cordas, inicialmente em tensão entre duas extremidades, são comprimidas ou tracionadas. Deste modo, a alteração da frequência do fio de aço atua de forma proporcional à sua tensão. (Silva L. , 2015) indica como principal vantagem a possibilidade dessa mesma tensão poder ser transmitida a longa distância sem muita degradação, contudo apresenta limitações de medição estática, visto apresentar alguma demora a obter a frequência de vibração dos fios.



Figura 2.5 – Extensómetro de corda vibrante, adaptado de (Silva L. , 2015).

2.6.2.2 Medidores de deslocamento

A medição de deslocamentos nas estruturas representa um papel importante na avaliação do desempenho e estado das mesmas. Deste modo, é possível acompanhar a evolução do seu comportamento, quando sujeitas a variadas condições existentes no local ou até mesmo simuladas. Por norma, apenas são monitorizados certos pontos críticos com alguma relevância estrutural.

(Cavadas, 2008), dos inúmeros dispositivos com fim à medição de deslocamento, destaca os transdutores capacitivos, indutivos e resistivos.

O transdutor capacitivo funciona segundo o princípio da capacidade electrostática. Assim, através da variação da distância entre duas placas condutoras, paralelas entre si, separadas por um meio dielétrico e que acumula energia sob a forma de campo eléctrico, isto é, pela alternância da capacidade do condensador, apresenta uma elevada eficiência sensorial de medir grandezas físicas (Lopes, 2012). Este conceito pode ser verificado num paquímetro digital ou num comparador digital.

O transdutor indutivo é distinto por trabalhar seguindo a mudança da indutância, ou seja, a alteração da indutância ou a autoindução de uma bobine é inerente à variação de uma grandeza não eléctrica, como é o caso da atuação do LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* (Agostinho, 2012).

Por fim, no transdutor resistivo é estabelecida uma simbiose entre o deslocamento imposto e a resistência do sensor, tal como num sistema de nivelamento hidrostático (Cavadas, 2008).

Instrumentos capacitivos

O paquímetro digital possibilita a medição tanto de comprimentos, como de espessuras e profundidade, alcançando uma precisão à centésima de milímetro (Félix, 2002).



Figura 2.6 – Paquímetro digital, (Mitutoyo, 2021).

O comparador digital é um instrumento de uso autónomo e expedito, alimentado por pilha. Com a capacidade de medir deslocamentos até cerca de 12 mm, com precisão da milésima de milímetro, permite a ligação a um registador de leituras (Félix, 2002).



Figura 2.7 – Comparador digital, (Mitutoyo, 2021).

LVDT

O LVDT é um dispositivo composto por um núcleo com mobilidade retilínea, envolvido num cilindro, parte constituinte de um transformador primário e dois secundários. Decorrente desse movimento é gerada uma variação de indutância elétrica originando uma saída elétrica ajustada ao deslocamento (Dias, 2015) (Aguiar, 2016).

Este transdutor apresenta elevada repetibilidade, bom comportamento de resistência à humidade e corrosão, boa estabilidade a longo prazo, eficiência face a testes estáticos tal como a testes dinâmicos e um prolongado tempo de vida mecânico. Contudo, necessita de frequências de excitação bastante elevadas para obtenção de rápidos tempos de resposta (Agostinho, 2012) (Aguiar, 2016).



Figura 2.8 – Dispositivo LVDT (Cavadas, 2008).

Sistema de nivelamento hidrostático

O sistema de nivelamento hidrostático atua de acordo com o princípio dos vasos comunicantes, ou seja, através de um circuito hidráulico que alimenta os pontos de referência equipados com sensores de pressão, que permitem obter deslocamentos verticais. Não obstante a ser

apresentado como um método bastante sensível em relação a ensaios estáticos, demonstra debilidades na capacidade de resposta em elementos extensos devido à demora a restabelecer o equilíbrio hidrostático, dificuldades inerentes ao enchimento do circuito, variações da pressão atmosférica ou até oscilações térmicas (Aguiar, 2016).



Figura 2.9 – Célula de pressão de um sistema de nivelamento hidrostático (Santos L. , 2014).

2.6.2.3 Medidores de temperatura

A quantificação da temperatura é de elevada relevância, quer pela sua ação sobre as estruturas, como pela sua influência na medição de grandezas referentes ao SHM. Tal fato é enfatizado em estruturas metálicas, consequência da elevada condutibilidade térmica associada ao aço.

Deste modo, no âmbito da identificação de anomalias provenientes dos efeitos térmicos são aqui destacados alguns instrumentos, distintos pela gama de medição, geralmente dentro de intervalos curtos, e linearidade (Félix, 2002).

Termopares

O modo de laboração dos termopares assenta na diferença de potencial entre dois pontos condutores, consequência de uma variação térmica entre estes, que numa malha fechada, gera uma força eletromotriz termoelétrica no circuito estabelecendo a circulação da corrente. O apelidado de efeito de Seebeck.

A sua constituição passa por um par de fios de metal ou ligas metálicas distintas agregadas através de soldadura ou enrolamento dos fios. Esta ligação forma uma junção. Deste modo, mantendo uma destas a temperatura constante e cónita, a junção de referência, há possibilidade de ser conhecida a temperatura na junção de medição, medindo a força eletromotriz termoelétrica gerada em circuito aberto. (Félix, 2002)

A sua larga de medição de temperaturas, baixo custo, variedade e o fato de não necessitar de qualquer fonte de alimentação fundamentam a sua utilização. No entanto, a baixa amplitude de

sinal, instabilidade e necessidade de uma referência poderão indicar alguma relutância. (Bernardino, 2014)

Detetores resistivos

Por norma, denominados de RTD – *Resistance Temperature Detector*, os detetores resistivos funcionam com base no seu material constituinte, onde a resistência à passagem da corrente elétrica é sensível à temperatura. Por norma, o material resistivo a usar poderá ser o cobre, níquel ou platina, sendo esta a mais característica, dada a precisão obtida, a sua capacidade de resposta térmica bastante linear, estabilidade, durabilidade e a larga gama de temperatura entre as restantes opções. Deste modo, o metal utilizado interage com duas pontas de fio condutor, com revestimento protetor, garantido a estanquidade e proteção mecânica do sensor.

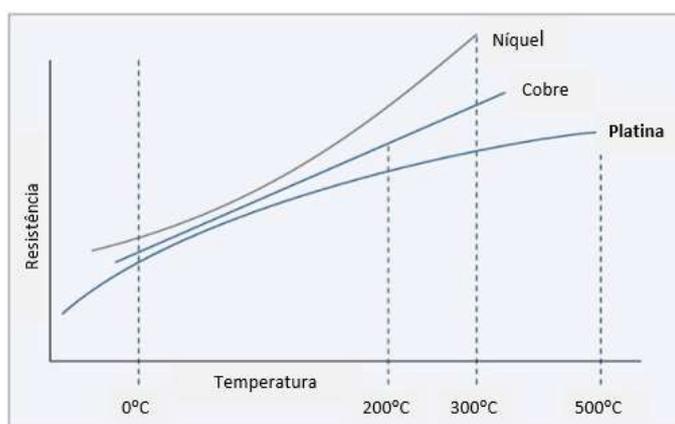


Figura 2.10 – Resistência RTD em função da temperatura, adaptado de (TE Connectivity, 2021).

Este aplicativo necessita de ser excitado por uma corrente elétrica que origina uma diferença de potencial medida. A sua resistência é determinada pela lei de Ohm.

A instalação destes sensores requer alguma atenção, de forma a evitar uma instabilidade de resultados inerentes a variações térmicas provocadas pela radiação solar ou pela temperatura da estrutura. Nesse sentido, é indicado a utilização de uma placa protetora de isolamento térmico (Aguiar, 2016) (Bernardino, 2014).

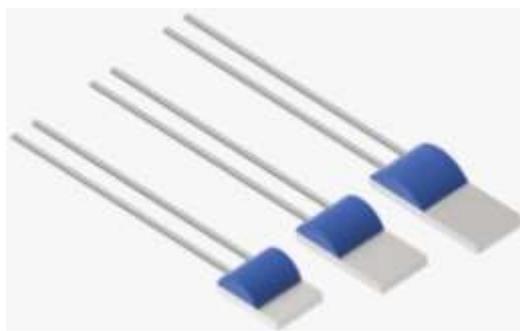


Figura 2.11 – Sensor RTD com resistência de platina, (TE Connectivity, 2021)

2.6.2.4 Medidores de vibração

Como potencial causa de falha em estruturas, a vibração é indubitavelmente um fator preponderante na temática da SHM. Neste intuito, surge o desenvolvimento dos acelerómetros, de forma a existir uma maior compreensão dos fenómenos dinâmicos associados.

Estes transdutores com o propósito de converter o movimento mecânico num sinal elétrico de saída são compostos, em geral, por uma massa de reação, suspensa através de uma estrutura estacionária assente na superfície da estrutura. Assim, o movimento suportado pelo acelerómetro difere do movimento oscilatório associado à massa, originando um diferencial de deslocamento entre eles. (Aguiar, 2016) (Braz, 2015)

A diversidade de acelerómetros existentes no mercado permite adaptar os mesmos às mais variadas funções e áreas. Por norma, são distintos pelos diversos formatos e materiais constituintes, a gama de frequências medível, assim como o modo de conversão para sinal elétrico.

Tabela 2.3 – Características bases de acelerómetros. (Braz, 2015) (Solutions, 2020)

Sensibilidade:	Referente à destreza do acelerómetro de detetar movimento, descreve a conversão entre vibração e tensão numa certa referência. Por norma a baixa sensibilidade estão associados sinais de alta amplitude e vice-versa. Especificada em $\text{pC}/(\text{ms}^{-2})$ ou $\text{mV}/(\text{ms}^{-2})$.
Sistema de eixos:	Projetados para medições referentes a um só eixo – acelerómetro uniaxial ou a movimentos nos três planos ortogonais – acelerómetro triaxial.
Amplitude:	Representa o alcance de vibração do sensor a uso sem distorção do sinal. O limite inferior é definido pelo ruído presente no sistema de

	medição, porém o limite superior é baseado no comportamento estrutural do acelerómetro.
Resposta:	A resposta à frequência detetada pelo acelerómetro revela o desvio máximo da sua sensibilidade durante o intervalo de frequência.
Linearidade:	Assinala os limites do sinal de saída que o acelerómetro difere em relação a uma linearidade ótima.
Propriedades físicas:	Tamanhos e massas elevados podem desvirtuar resultados, alterando as características dinâmicas da estrutura.
Restrições ambientais:	Importante escolher aparelhos adaptáveis a ambientes críticos tal como de temperaturas extremas, exposição a produtos químicos ou humidade.

Acelerómetros piezoelétricos

Os acelerómetros do tipo piezoelétricos são caracterizados pela sua aptidão de gerar sinal elétrico quando submetidos a tensões mecânicas. Sendo a parte ativa constituída precisamente por um material piezoelétrico, atua como elemento mola ligado a uma massa sísmica livre, no interior do sensor, à superfície da estrutura. O deslocamento da mesma provoca um momento na massa, provocando uma força no componente piezoelétrico responsável pelo sinal elétrico que pode ser amplificado e medido por um *data logger*.

Este tipo de dispositivo, caracterizado por um elevado rácio de sinal/ruído, é independente de qualquer fonte de alimentação, estável, robusto e praticamente imune às variações térmicas, para além de demonstrar uma capacidade de resposta linear para uma larga faixa de vibrações. Não obstante, são incapazes de apresentar resposta em faixas de frequências muito baixas, usualmente abaixo de 1 Hz, dado que o elemento piezoelétrico só produz sinal elétrico quando sujeito a forças inerciais. (Rebelo, C. et al, 2016) (Silva L. , 2015)

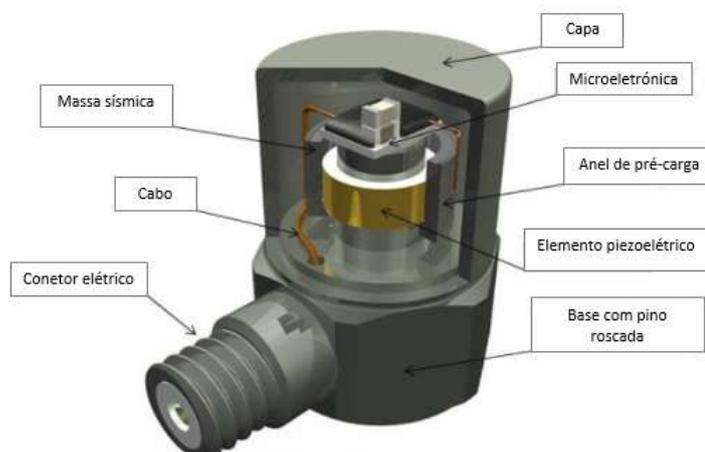


Figura 2.12 – Composição exemplo de um acelerómetro piezoelétrico, adaptado de (PCB Piezotronics, 2021).

Acelerómetros piezoresistivos

Antagonicamente aos acelerómetros já descritos, o funcionamento dos piezoresistivos depende de uma fonte de energia externa, isto é, são sensores passivos. Através de fenómenos vibratórios na massa provocados por deformações inerentes a ações exteriores ao dispositivo é estimulada uma alteração da resistência elétrica. Por consequência, é gerado um diferencial no circuito elétrico do sensor ajustado à aceleração estrutural. (Rebelo, C. et al, 2016) (Silva L. , 2015)

São distintos pela sua alta resolução, compensação de temperatura e saída amplificada, sendo possível a existência de séries não amplificadas na monitorização de estruturas. (Aguiar, 2016)



Figura 2.13 – Exemplo de um acelerómetro piezoresistivo, (ALTHEN, 2021)

Acelerómetros capacitativos

Identificados dentro da gama dos sensores passivos, os acelerómetros capacitativos individualizam pela sua alta sensibilidade a pequenas variações térmica e apresentarem uma boa linearidade. (Rebelo, C. et al, 2016) (Aguiar, 2016)

Acelerómetros tipo *force balance*

Os acelerómetros tipo *force balance* partilham da obrigação de alimentação exterior com vista a sua funcionalidade. A partir de aplicabilidade magnética, decorrente de corrente elétrica proporcional à aceleração imposta no dispositivo, a massa sísmica constituinte do mesmo é forçada a manter a sua posição perante vibrações. (Silva L. , 2015)

Acelerómetros FBG

Aproveitando as propriedades da fibra ótica, os acelerómetros baseados em redes de Bragg exibem uma baixa perda de transmissão, imunidade a interferências eletromagnéticas e até uma redução das suas propriedades físicas quando comparados com os demais. A acrescentar, demonstram reduzido ruído, resultante da codificação da informação no domínio espectral, e viabilidade de agregar um grande número de sensores no mesmo cabo de fibra ótica.

De modo geral, o seu funcionamento incide num sistema massa-mola constituído por um *cantilever* de base e uma massa inercial, conectados através de fibra ótica. Assim sendo, a existência de aceleração externa suscita movimento da massa, resultando em tensões na FBG e consequentes alterações das propriedades espectrais, o que permite aferir valores de aceleração. (Antunes, 2011)

Acelerómetros *wireless* e MEMS

Dado os atuais avanços tecnológicos disponíveis, começou a fazer sentido a possibilidade de utilização de acelerómetros por meio de *wireless* e MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*). Assim, o modo de operar é fundamentado através de dois grandes componentes: um transmissor alimentado por bateria e um recetor conectado a algum servidor. Se o primeiro elemento consiste numa interface de deteção, seção de condicionamento de sinal, um núcleo computacional e um transmissor de rádio para comunicação sem fios, o recetor é similar, mas de funcionalidade oposta. Recebe o sinal e converte para posteriormente reconstruir os dados originais antes de os enviar para o utilizador.

Tal como nos casos anteriores, o parâmetro físico medido é transformado num sinal elétrico proporcional. No entanto, o núcleo computacional representa a principal diferença. A existência de um microcontrolador possibilita o processamento de dados a bordo e verificações do histórico nos ciclos de medição. De notar, que o tamanho do microcontrolador é determinante na velocidade de processamento e consumo de energia, existindo no mercado variadas opções, de acordo com o monitoramento a realizar. A sua comunicação via radiofrequência possibilita a interação entre nós e o registo dados, sendo, no entanto, fundamental a projeção de uma rede

eficaz de comunicação. Desta forma, pode ser definida uma transmissão direta de dados do sensor para o servidor central ou optar por implicar o uso de nós intermédios.

Este tipo de dispositivo é conotado de baixos consumos de energia e custos e, naturalmente, uma redução de efeitos invasivos. A utilização de plataformas sem fios é um claro benefício em termos logísticos, facilitando a aquisição de dados em zonas de difícil acesso, reduzindo o seu o tempo de instalação e recusando restrições associadas ao comprimento dos fios. Outros aspetos evitados como o efeito da sobrecarga do peso dos fios e ruído produzido pelos mesmos podem ser favoravelmente mencionados.

Em contrapartida, baterias de fonte finita limitam medições a longo prazo, assim como possíveis problemas de falhas de rede, de sincronização ou até algum desprovemento de confiabilidade na transmissão de dados expressam alguns inconvenientes.

Finalmente, de referir que esta tecnologia retrata uma precisão de medição equivalente à registada por acelerómetros piezoelétricos tradicionais. (Agostinho, 2012) (Sabato et al, 2016)

2.6.2.5 Controlo de corrosão

Uma das principais causas de degradação estrutural e funcional é a corrosão dos elementos metálicos. Num ambiente propício à oxidação do aço, com condições adversas ou até na inexistência de pinturas preventivas ou controladoras pode ser observado um gradual estado de perda de secção. (Cavadas, 2008)

Esta deterioração proveniente de reações químicas do material com o ambiente poderá afetar as frequências naturais da estrutura, decorrente de perdas de massa e rigidez da mesma. Enquanto diversos casos são detetados através de simples métodos visuais, já outros não visíveis, como a propagação de corrosão no interior do material, carecem de técnicas específicas de avaliação. A título exemplificativo, (Gillich et al, 2017) propõe um procedimento analítico, baseado num Indicador de Corrosão (CI), que define as mudanças de parâmetros modais em relação à posição e profundidade do elemento corroído.

Por outro lado, (Manh La et al, 2016) apresenta um dispositivo robô, equipado com sensores de imagem múltipla que captam registos fotográficos da superfície metálica e auxiliam na navegação do mesmo, assim como na idealização de um modelo 3D. Programado para se manter dentro dos limites do elemento que percorre, tem a facilidade de se deslocar em qualquer posição ou inclinação. No fundo, é um processo híbrido de identificação de anomalias corrosivas, combinando um algoritmo de deteção automático com a visualização e análise das imagens captadas.

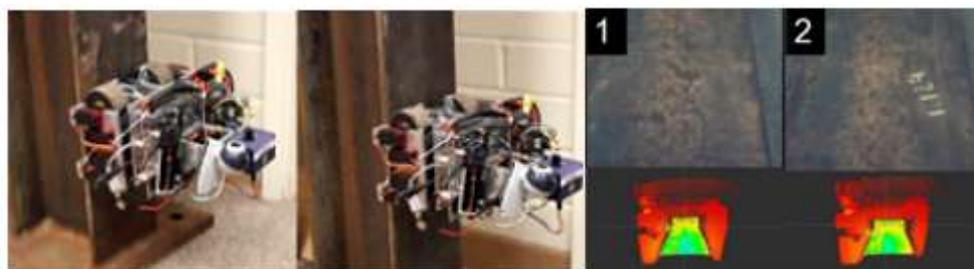


Figura 2.14 – Deslocamento, captura de imagem e geração do modelo 3D, adaptado de (Manh La et al, 2016).

2.6.3 Sistemas de aquisição de dados

A aquisição de dados é garantida pelo sistema que estabelece a interação entre os sensores e a rede de dados. (Silva L. , 2015), explica que o sistema de aquisição recebe e acumula os sinais obtidos pelos sensores, trata de os converter e transmitir ao respetivo computador para uma consequente análise e processamento. Acrescenta que a seleção do mesmo depende do tipo, quantidade e condicionamento de sinal requerido por cada sensor em uso.

(Cavadas, 2008), explica que os sistemas podem ser constituídos por placas de aquisição integradas no computador, ou simplesmente funcionarem de forma autónoma. Os primeiros levam a sistemas de monitorização centralizados, tornando obrigatória a existência de cabos de ligação, por vezes de elevado comprimento e a desaconselhável presença de computador em obra. Contudo, aparentam ser uma melhor solução na vertente económica e mais potentes. Os outros sistemas, devido à sua ligação de rede, permitem uma instrumentação mais distribuída, reduzindo o comprimento de cablagem e consequentemente as perdas associadas. Apesar de mais dispendiosos, são menos potentes e indicam consumos de energia mais reduzidos.

Referente à ligação entre os sensores e o sistema de aquisição, (Silva L. , 2015) enquadra dois tipos:

- Ligação com cabos;
- Ligação remota sem fios – *wireless*.

Deste modo, entende que a ligação sem fios é usual no caso de grandes estruturas e sistemas de monitorização mais desenvolvidos. A ligação através de cabos pode apresentar problemas quando demasiado extensa devido a ruído e alguma perda de sinal analógico face à distância dos sensores em relação à central de controlo de dados.

A frequência ou taxa de amostragem é um aspeto importante segundo o qual o autor se refere sendo função da variação de velocidade dos parâmetros monitorizados e, por isso, tendo

consequência direta na velocidade de aquisição de dados. A taxa de amostragem deve ser conjugada com a variação da grandeza de maneira a reduzir a possibilidade de serem gerados erros e imprecisões. (Silva L. , 2015) dá o exemplo da variação da temperatura que, por norma, apresenta uma variação lenta e por isso requer uma baixa taxa de amostragem.

Já a discretização do sinal analógico é um fator decisivo no processamento posterior de dados no domínio das frequências. Por (Rebelo, C. et al, 2016), a discretização efetuada pelo sistema de aquisição introduz dois tipos de erros na análise numérica:

- i. Erro no valor da amplitude – representa um erro típico de arredondamento, corrigível usando processador com capacidade de utilizar números maiores;
- ii. Erro no cálculo do valor espectral da função discretizada ou ‘*aliasing*’ – inerente à discretização em funções sinusoidais e à periodicidade do espectro como resultado da discretização no domínio do tempo. Assim, no espectro de uma função já discretizada é observada uma função periódica e não o espectro real da função contínua. A discretização introduz erros no cálculo da função da transformada de Fourier, isto é, se o sinal analógico original tiver frequências mais altas que o espectro periódico, o espectro real aparece adulterado mostrando esses picos de frequência em valores inferiores.

Deste modo, é perceptível a capacidade que os sistemas de aquisição de dados têm em processar as séries temporais de acelerações, usando transformadas de Fourier para obter frequências ou outras informações modais da estrutura.

2.7 Modelação numérica

O complemento de um modelo numérico a um sistema SHM representa uma visão mais abrangente por parte do projetista em relação à resposta da estrutura. Como é expresso por (Antunes, 2011), esta relação é vantajosa em ambos sentidos. Se os resultados do modelo podem ajudar na conceção e planificação do uso do sistema de instrumentação, a avaliação dinâmica, que identifica frequências naturais da estrutura e modos de vibração, possibilita a calibração do mesmo. (Ribeiro, 2012), aponta às imprecisões, por tendência erróneas, relativas à geometria das seções, à variabilidade das propriedades mecânicas dos materiais, ações atuantes, condições de apoio, entre outras, como fundamento desta constante busca. Contudo, o sucesso passa pela minimização das diferenças entre resultados numéricos e experimentais, sendo parte essencial do mesmo a sensibilidade estrutural do utilizador, tal como o auxílio de algoritmos matemáticos.

Parte crucial do processo, a calibração de modelos numéricos diverge em duas metodologias apoiadas nos parâmetros modais – direta e iterativa. Por norma, o primeiro método compreende

a redução de matrizes de rigidez e de massa, visto os modelos numéricos apresentarem um número de graus de liberdade superior aos instrumentados. Contudo, este processo poderá impedir a identificação de graus de liberdade onde existem erros de modelação ou até mesmo de elementos com danos estruturais. Os métodos iterativos englobam a minimização de uma função objetivo pelo meio de iterações sucessivas. Esta função é estabelecida através de ajustes entre parâmetros modais numéricos e experimentais, modificados no modelo numérico, por isso de significado físico bem perceptível, o que facilita a abordagem. (Ribeiro, 2012)

Não obstante, desta interação entre o trabalho de campo e computacional decorrem alguns aspetos pertinentes, como indica (Antunes, 2011). Assim, é plausível:

- Pormenorizar danos ou limitações de desempenho;
- Avaliar a vulnerabilidade da estrutura consoante diferentes solicitações;
- Estimar a resposta estrutural a sobrecargas, eventos sísmicos, acidentais ou qualquer imprevisto;
- Ajudar no projeto de reforço estrutural detetando qualquer dano ou alteração de utilização.

Na modelação numérica, os métodos discretos de análise estrutural convertem problemas contínuos em problemas discretos, sendo os baseados no MEF dos mais usuais pelos engenheiros de estruturas. Este método analítico trata de discretizar um meio contínuo em pequenos elementos, conservando as propriedades do meio original, descritos por equações diferenciais e solucionados por modelos matemáticos, face ao objetivo. O MEF permite determinar os estados de tensão e de deformação de qualquer sólido sujeito a ações exteriores. (Silva V. , 2016)

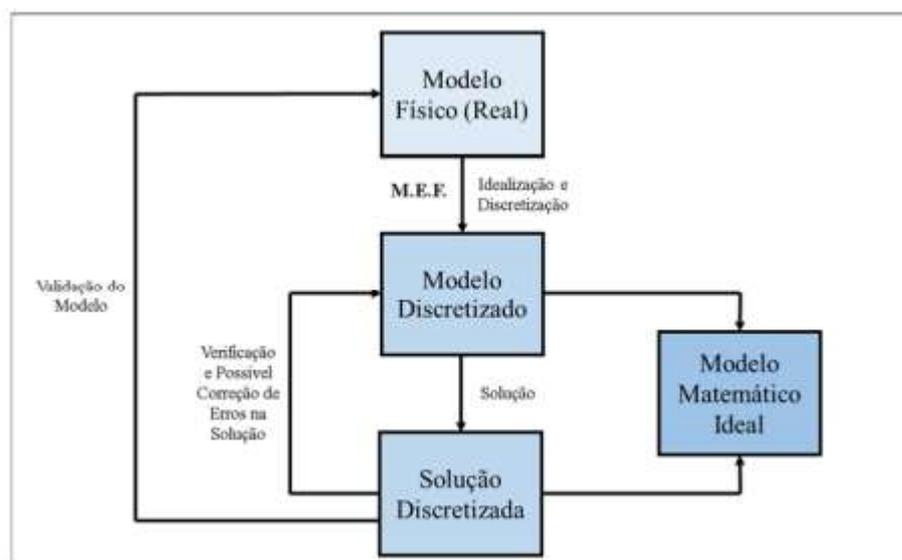


Figura 2.15 – Processo de modelação numérica através do MEF. (Silva V. , 2016)

2.8 Problemas e limitações

A monitorização estrutural ainda enfrenta alguns constrangimentos que levam à falta de consentimento geral do seu uso por parte dos intervenientes. Apesar da ideia da sua utilização ser bastante atrativa por todo o seu potencial, os poucos exemplos de transição da pesquisa para a prática limitam a sua expansão.

(Farrar, C. et al, 2006) indica que a premissa base do uso do SHM é que o dano altera significativamente as propriedades de rigidez, massa ou dissipação de energia do sistema, o que significa uma diferente resposta dinâmica. Assim, a sua aplicação apresenta alguns desafios técnicos, como o dano em si representar um fenómeno local e existir probabilidade de não influenciar a baixa frequência registada na estrutura. A falta de acessibilidade aos componentes ou secções que se pretendem estudar, derivado de singularidades de certas estruturas, apresentam mais um entrave à aplicação do sistema.

Em maioria dos casos é recomendada uma análise exaustiva de custo-benefício com vista a provar as suas vantagens. Apesar das despesas iniciais de planeamento, aquisição e instalação de equipamento, os custos de operação e manutenção tendem a ser baixos. Contudo, é seguro afirmar que, generalizando, existe ainda alguma falta de confiabilidade no sistema.

A falta de conhecimento especializado pode levar a uma instrumentação inadequada ou até sobrecargas nos sensores, isto é, por má disposição ou insuficiência de equipamento todo o desempenho pode ser prejudicado. No mesmo sentido, o armazenamento excessivo de dados, esgotando os recursos do sistema de gestão atuante, apresenta mais um revés. Para mais, a

conversão de dados em informação poderá ser inútil se má direcionada. É conclusivo que um processo não orientado facilmente compromete a fiabilidade de resultados.

Sendo os sistemas sem fios perfeitamente banais no nosso quotidiano, as escolhas de opções de baixo custo constituem uma realidade, afetando a eficácia de desempenho devido à sua limitada capacidade de dados, aquisição dos mesmo ou alterações no seu pré-processamento

Por sua vez, os fatores ambientais e ruídos externos podem afetar as propriedades modais detetadas, adulterando resultados e conclusões, tal como a localização de danos na estrutura. Uma possível solução passaria pela utilização de modelos físicos ou estatísticos dos efeitos ambientais, não contornando ainda assim o fator ruído.

Um ponto chave de toda e qualquer tecnologia passa sempre pelo aspeto do financiamento. Deste modo, avanços vagarosos no desenvolvimento desta, contrapondo com outras aplicações vigentes, resultam em menores incentivos económicos. As abordagens à progressão dos SHM incluem desde sensores de aquisição de dados, a sistemas incorporados, comunicações, entre outros, que requerem uma colaboração multidisciplinar. Em maioria dos casos passíveis do seu uso, os proprietários das infraestruturas carecem de capacidade interna de investigação, o que requer procura por auxílio externo.

Por fim, a falta de colaboração entre técnicos reflete outra das limitações, dada a existência de entraves na transmissão de fundamentos adquiridos, justificados por disputas comerciais, contudo prejudicando o alargamento do conhecimento e conseqüente uso mais generalizado. (Brownjohn, 2006)

(Barbosa, 2018), gestora de produto de tecnologia de monitoramento, resume os desafios a enfrentar pelo SHM ao tamanho da estrutura, à localização, ao ambiente e complexidade de toda a rede.

2.9 O futuro do SHM

(Brincker, Du, Amador, & Katsanos) indica que a tendência segue a monitorização de um maior número de estruturas, uma variabilidade de sensores em uso, aliado a centenas de sinais adquiridos e armazenados, com apenas uma pequena fração de dados a serem usados.

O estudo de mercado, implícito na figura que se segue, demonstra o investimento intrínseco ao SHM, com particular destaque para uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 10,09% (2017 – 2025). Tal facto, só comprova a crescente aposta nesta componente.



Figura 2.16 – Receita global do mercado de SHM, por região, adaptado de (Brincker, Du, Amador, & Katsanos).

Assim, o propósito para um sistema SHM pode ser idealizado em:

- Uso de todos os dados;
- Tudo automatizado;
- Informação em tempo real;
- Dados diretamente na *cloud*, ao invés do computador;
- Utilização limite da estrutura;
- Extinção da falha estrutural;
- Economia de materiais estruturais;
- SHM como base do projeto.

Por fim, a criação de conselhos, como o ISHMII, tem vindo a promover a publicação de artigos, conferências e *workshops*, de modo a auxiliar o desenvolvimento e conhecimento de todos os intervenientes.

3 ANÁLISE MODAL

3.1 Considerações gerais

A análise dinâmica de estruturas surge com a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o seu comportamento quando sujeitas a vibrações. Se a ocorrência e deteção de danos devido a excitações pode ser acompanhada por processos descritos no capítulo prévio – SHM, a sua resposta apenas pode ser obtida através de uma análise dinâmica. Deste modo, modelos cada vez mais precisos são consequência da convergência de uma análise teórica e um modelo experimental o mais aproximado da realidade. Para tal, (Machado, 2018) indica a aquisição das propriedades dinâmicas do sistema através de uma análise modal. Destarte, descreve esta metodologia como a identificação de parâmetros modais de uma certa estrutura, auxiliado pela correlação entre as características dinâmicas do modelo matemático e as propriedades físicas obtidas de modo experimental. Assim, a mesma identificação é possível através de variados métodos analíticos, distinguindo sistemas com um grau de liberdade (*Single Degree of Freedom*, SDOF) ou múltiplos graus de liberdade (*Multiple Degree of Freedom*, MDOF), tal como indicado no esquema que se segue.

Tabela 3.1 – Métodos de análise modal, adaptado de (Silva L. , 2015).

ANÁLISE MODAL	
SDOF	MDOF
Método de <i>Rayleigh</i> Solução da equação do movimento	Solução de várias equações do movimento Método dos elementos finitos (MEF)

O método de *Rayleigh*, apesar de aplicável em ambos, apenas apresenta solução exata no primeiro. A solução direta da equação de movimento é admitida na condição da matriz de amortecimento ser desprezável ou ser representada na combinação linear das matrizes massa e rigidez. (Silva L. , 2015)

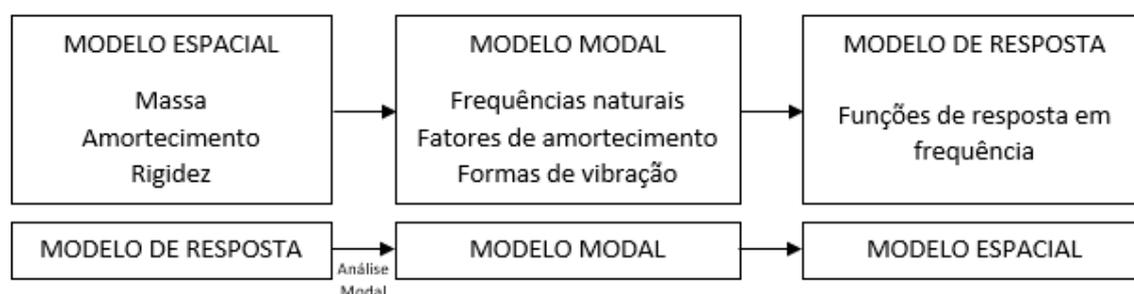


Figura 3.1 – Processo de análise de vibrações, teórico e experimental, adaptado de (Machado, 2018).

Segundo (Magalhães, 2010), uma aproximação primária à análise de vibrações surgiu a partir de medições da resposta da estrutura a uma ou várias ações dinâmicas conhecidas. A partir da relação entre o aplicado (*input*) e, conseqüentemente, a saída (*output*) detetada são identificados os parâmetros modais. Desde então, os equipamentos de teste e algoritmos de processamento de dados evoluíram de forma significativa. Assim, o mesmo autor afirma que este conceito, denominado de Análise Modal Experimental (EMA), é de momento um campo sólido e bem fundamentado, utilizado em diversas áreas, sendo destacado na área da engenharia civil, nomeadamente em pontes, barragens, torres, entre outros.

O desenvolvimento de poderosos algoritmos para identificação de parâmetros modais, maioria no âmbito da EMA é uma realidade. Porém, quando a informação modal deriva da resposta estrutural (*output*), aquando o normal funcionamento da mesma, (Magalhães, 2010) intitula o processo de Análise Modal Operacional (OMA) ou Análise Modal de Saída (*Output-only Modal Analysis*), em oposição à Análise Modal de Entrada-Saída (*Input-Output Modal Analysis*). Neste caso, não existem dados objetivos de entrada, mas sim um assumir de que os mesmos são gerados a partir de um processo estocástico (ruído branco). O ruído branco é reconhecido como sendo um espectro composto por todas as frequências possíveis. A determinação de um modelo ajustável é reconhecida de Sistema Estocástico de Identificação (SEI). Esta diferenciação torna apelativa a OMA para obras de arte, dada a complexidade de as excitar de modo artificial.

Recentemente, têm sido exploradas novas técnicas modais combinadas, apeladas de *Operational Modal Analysis with Exogenous Inputs* (OMAX), caracterizada pela aplicação de uma força artificial em condições funcionais. No entanto, distinta da EMA visto as forças operacionais serem incluídas no modelo de identificação ao invés de assumidas como ruído, permitindo a existência de amplitudes de forças artificiais niveladas ou até inferiores à, sempre

presente, vibração ambiente. Por conseguinte, pequenos dispositivos de excitação são bem aceites.

Tabela 3.2 – Características gerais da resposta estrutural, adaptado de (Brincker & Ventura, 2015).

Análise Modal	Tipo de excitação	Exemplos
EMA	Excitação artificial	queda de pesos; elementos hidráulicos; explosões controladas.
OMA	Excitação natural	vento; mar; tráfego.

Deste modo, podem ser realizados ensaios de vibração forçada (FVT – *Forced Vibration Tests*) e ensaios de vibração ambiental (AVT – *Ambient Vibration Tests*). Contudo, é de fácil compreensão a complexidade dos FVT em grandes estruturas, requerendo recurso a dispositivos bastante dispendiosos e pesados para aplicação da excitação. Por outro lado, os AVT, passam por uma solução mais prática e económica visto a suscetibilidade às excitações naturais ou inerentes à utilização, tal como o vento ou o tráfego, não existindo necessidade de perturbar o normal funcionamento das estruturas.

Este capítulo, aborda a análise modal, explorando inicialmente a ligação dos sistemas dinâmicos aos métodos de identificação modal, seguido de uma sucinta abordagem à Análise Modal Experimental (EMA) e, por fim, à Análise Modal Operacional (OMA). Ao longo desta interpretação foram explorados exemplos e/ou aplicações das mesmas, tal como a natural analogia.

3.2 Modelos de sistemas dinâmicos

A identificação de parâmetros modais é, por norma, realizada com o propósito de obter estimativas experimentais de frequências naturais, configurações de modos de vibração e valores de amortecimentos modais que podem ser correlacionados com resultados obtidos a partir de um modelo de elementos finitos da estrutura em análise.

Por outro lado, maioria dos métodos de identificação modal são baseados em modelos experimentais, do sistema dinâmico testado, ajustáveis aos dados registados e dos quais se obtêm estimativas dos parâmetros modais. A prioridade passa sempre pela maior precisão na definição dos modelos – na rigidez, massa ou apoios da estrutura. Ocasionalmente, discriminar

a influência do amortecimento é complexo, pelo que é comum corroborar valores empíricos e resultados de medição. (Silva L. , 2015)

No entanto, é importante referir que os modelos são sempre idealizações de sistemas dinâmicos reais, naturalmente simplificados. Estes podem ser estabelecidos no domínio do tempo ou no domínio das frequências, com equações de tempo contínuo (modelos analíticos) ou equações de tempo discreto, sendo estas últimas habitualmente utilizadas para ajustar dados experimentais, caracterizados como discretos. (Magalhães, 2010)

O autor exemplifica tipos de modelo que possibilitam o cálculo dos parâmetros modais, diferenciando os que assumem que as funções de entrada são conhecidas – análise determinística, dos que consideram uma entrada desconhecida – análise estocástica.

Modelos no domínio do tempo

De análise determinística:

- Modelo de Elementos Finitos;
- Modelo de espaço de estado de tempo contínuo (*continuous-time state-space model*);
- Modelo de espaço de estado de tempo discreto (*discrete-time state-space model*).

De análise estocástica:

- Modelo de espaço de estado estocástico (*stochastic state-space model*).

De notar que, os processos estocásticos são caracterizados por um conjunto de funções aleatórias dependentes do tempo e associados a uma caracterização estatística, como a função de correlação, de uma ou várias variáveis. Em aplicações práticas é habitual assumir que estes processos são estacionários, ergódicos e de média zero. O estado estacionário é devido às propriedades estatísticas serem constantes ao longo do tempo, a ergodicidade pelas mesmas propriedades poderem ser calculadas considerando valores médios de muitas realizações num determinado instante de tempo ou usando apenas valores médios de apenas uma realização ao longo do tempo e a suposição de média zero é válida pelo erro inerente aos sinais de tempo medidos.

No âmbito da transição do domínio de tempo para o domínio da frequência são dispostas diversas ferramentas matemáticas, tais como: transformadas de Laplace ou transformada s, transformada de Fourier, transformadas de z, transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) que utiliza algoritmo *Fast Fourier Transform* (FFT), função de transferência e função de resposta de frequência, *Laplace Transform of the state-space model*.

Modelos no domínio da frequência

De análise determinística:

- Modelo modal;
- Modelos de fração matricial: modelo de denominador comum, descrição da matriz-fração esquerda, descrição da matriz-fração direita.

Os modelos modais apresentam um melhor entendimento físico, contudo não são aconselhados para análise de dados experimentais por serem altamente lineares. Não obstante, os modelos de fração matricial são mais abstratos, podendo ser facilmente ajustados aos dados medidos.

De análise estocástica:

- Espectro de saída e meio espectro.

No domínio da frequência, os processos estocásticos são caracterizados pelo seu espectro.

3.3 Análise Modal Experimental (EMA)

A apelidada EMA, ou TMA (*Tradicional Modal Analysis*), associado à análise de séries temporais (TSA – *Time Series Analysis*) concretiza a medição da resposta estrutural consequente de excitações dinâmicas. A relação entre o *input* e o *output* do sistema possibilita a identificação dos parâmetros modais.

(Machado, 2018), aconselha parcelar este tipo de análise em três diferentes requisitos. Uma vez que não existe uma metodologia padronizada para os diversos casos, é fundamental individualizar equipamentos e condições de teste, de modo a ser realizado o método mais adequado. Todavia, o desconhecimento teórico dos resultados esperados pelo sistema pode precipitar análises desnecessárias, distantes da realidade. Para mais, deve ser analisado o tipo de excitação ou a gama de amplitude da resposta, não arriscando a deturpação de dados e a qualidade do processo. Assim, o autor prioriza uma consistente base teórica de comportamento oscilatório, a medição precisa da resposta e, por fim, a análise realística e minuciosa da informação recolhida.

De referir que o EMA é manifestamente um método fiável, condizente com resultados convincentes e representativos do comportamento dinâmico real de um sistema, mas difícil de aplicar em estruturas de grandes dimensões, como são as estruturas de engenharia civil, pela necessidade de excitar artificialmente a estrutura.

3.3.1 Ensaios de vibração ambiental (AVT)

Os AVT são passíveis de aplicação em processos de reabilitação ou de verificação da segurança de estruturas existentes. O intento, além do já referido processo de identificação das propriedades dinâmicas estruturais, compreende a calibração e atualização de modelos de elementos finitos, assim como o alinhamento de uma base para a aplicação de uma monitorização dinâmica contínua. Para mais, devido ao aproveitamento das condições de operação reais, perante casos de comportamento não linear, o decorrente é aliado a níveis realísticos de vibração e não a vibrações artificiais. Em contrapartida, são exigidos sensores de alto nível de precisão e sensibilidade, dado o baixo nível de excitação existente. Comparando com os FVT, são inferiorizados na vertente de não estimar a massa modal, ou seja, os modos de vibração não são estimados de forma absoluta, e também na frequência de excitação, sujeita a não abranger toda a banda de interesse, em particular em estruturas de maior rigidez com altas frequências. (Silva L. , 2015)

Processo experimental e equipamento

O procedimento seguido na atuação deste tipo de ensaios é bastante simples. (Magalhães, 2010) explica que a resposta é obtida por um ou mais sensores de referência em posição fixa, em conjunto com vários sensores que são colocados sequencialmente e pontos de medição ao longo da estrutura, constituindo assim diferentes configurações de pontos de medição (*setups*). Para cada configuração é feita a aquisição dos sinais durante um determinado período de tempo. A quantidade de pontos instrumentados é análoga à resolução espacial inerente à caracterização dos modos de vibração mais relevantes, em concordância com uma prévia modelagem de elementos finitos.

A duração das séries temporais em cada configuração representa uma significativa influência na estimativa dos parâmetros modais, concretamente dos coeficientes de amortecimento modal. Regra geral, séries temporais com 180 vezes o período do modo com a frequência mais baixa demonstram apresentar resultados satisfatórios.

Entre os diversos sensores de aceleração baseados em distintos princípios de funcionamento – piezoelétricos, capacitivos, equilíbrio de força, os mais adequados para AVT aparentam ser os últimos. Os acelerómetros de equilíbrio de força manifestam uma faixa de medição a começar em DC, concretizada numa maior sensibilidade às frequências naturais mais baixas. São concebidos para serem insensíveis a vibrações de alta frequência, característicos pela sua precisão e baixo ruído.

O sinal elétrico contínuo produzido pelos sensores é conduzido através de cabos elétricos para um sistema de aquisição central. Este, é composto por um ou vários conversores analógico-

digitais que convertem os sinais contínuos em sequências discretas de números, acessíveis ao processador de um comum computador. O atributo mais relevante destes conversores é o número de *bits*, pois está diretamente relacionado com a resolução da medição. O sistema de aquisição também pode conter circuitos elétricos preliminares no processamento dos sinais analógicos, tais como filtros passa-baixo ou amplificadores de sinal.

Embora mais usual, a implementação destes sistemas com longos cabos elétricos ligados a um sistema de aquisição central demonstra ser trabalhosa e demorada. Assim sendo, a tendência passa pela redução do comprimento de cabos ou até mesmo por tecnologias sem fios.

3.4 Análise Modal Operacional (OMA)

O domínio da OMA foi estruturado nas últimas duas décadas, contudo, previamente nos anos 60, variadas aplicações indicaram o princípio dos testes modais. (Rainieri, C; Fabbrocino, G, 2014) revela que eram referidos como testes de vibração ambiente. As primeiras metodologias eram principalmente baseadas na análise de PSDs e na identificação de *Operational Deflection Shapes* (ODSs). Estes representam a deflexão de uma estrutura numa certa frequência, sob um dado de entrada genérico, geralmente sendo o resultado da contribuição de diferentes modos, porém representando uma estimativa aproximada das formas de modo reais.

A partir da década de 90, surgiu um grande avanço na identificação dos parâmetros modais dos sistemas estruturais beneficiando dos variados desenvolvimentos tecnológicos. (Silva L. , 2015), refere o uso da técnica de excitação natural, NExT, durante esse período, inerente às funções de correlação. De referir, que ao longo dos anos os processos OMA têm vindo a ser desenvolvidos de forma autónoma, contudo, a maioria dos métodos derivam dos procedimentos EMA.

A OMA é caracterizada pelo estudo das propriedades modais de um sistema nas suas normais condições de funcionamento, isto é, no seu modo operacional. A ideia passa aproveitar as vibrações naturais ou operacionais, tais como o vento, tráfego, máquinas, ao invés das artificiais. Sendo a excitação atuante resultante de todo o seu envolvente, possibilita o funcionamento ininterrupto da estrutura e a dispensa de uso de qualquer tipo de gerador de vibrações. Tal facto é significativo na diminuição de tempo e custos da operação. A técnica de medição é idêntica ao referido ODS, onde um ou mais acelerómetros são usados como referência, de modo a obter a resposta de todos os graus de liberdade.

No entanto, nestes casos, por norma, a excitação é de baixa frequência, visto ser proveniente de estruturas de grandes dimensões e ser provocada pelas condições operacionais das mesmas. Deste modo, existe a necessidade de recorrer a sensores bastante sensíveis, com o mínimo ruído. Ainda assim, o rácio entre os dados obtidos e o ruído intrínseco aos mesmos terá de ser inferior

ao dos convencionais testes, suscitando um extremo rigor no tratamento de dados. Caso contrário, algumas características da excitação podem ser confundidas com a resposta dinâmica do sistema. Para mais, perante uma estrutura demasiado rígida e de frequências naturais elevadas, poderá não se conseguir excitar toda a banda de frequências ambicionada. Por último, o desconhecimento da excitação atuante implica que a etapa de identificação não disponha de vetores modais normalizados para massas unitárias. (Brincker & Ventura, 2015)

Tabela 3.3 – Comparação da OMA em relação a outros métodos de análise modal, adaptado de (Silva L. , 2015).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Economia; - Rapidez na execução: dispensa de equipamentos de excitação; - Obtenção dos parâmetros dinâmicos do sistema completo; - Funcionamento operacional ininterrupto da estrutura; - Monitorização <i>online</i>: integrar numa SHM. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incerteza na recolha de dados: fontes variadas que influenciam resposta dinâmica; - Normalização de dados requerida

Com bases teóricas similares ao EMA, contudo com uma conceção de excitação atuante díspar, é forçoso um pré-processamento de dados alternativo para a OMA. Uma vez que a excitação na EMA é determinística e na OMA aleatória, a referência sobre a carga aplicada é representada pela premissa de um processo estocástico do tipo ‘ruído branco’. Em consequência, a energia é difundida numa larga gama de frequências sem privilegiar nenhuma delas. Na prática, a excitação não tem que ser estritamente ‘ruído branco’, desde que todos os modos de vibração sejam devidamente excitados com vista às suas contribuições serem identificáveis na resposta. (Machado, 2018)

3.4.1 Métodos da Análise Modal Operacional

Os métodos disponíveis para proceder à identificação de parâmetros modais de sistemas dinâmicos com base na sua resposta à excitação ambiente são possíveis de classificar como no domínio da frequência ou no domínio do tempo. (Machado, 2018), acrescenta que estes são distintos pelo pré-processamento envolvido em cada, ou seja, o tipo de tratamento a que a resposta está sujeita previamente à iniciação do método. O domínio da frequência dá uso às respetivas densidades espectrais, enquanto que o domínio do tempo utiliza as funções de correlação das respostas medidas.

(Silva L. , 2015), opta por dividir os métodos OMA de acordo com o seu propósito de processamento de dados de ensaio de vibração ambiental ou no caso de compreender técnicas automatizadas de longa duração, com vista a sua utilidade no processamento contínuo de sinais dinâmicos de monitorização. O esquema que se segue reproduz o citado. De reparar que no domínio da frequência são utilizadas as funções de resposta de frequência – FRFs, enquanto que no domínio do tempo são recorrentes as funções de resposta de impulso equivalente – IRFs.

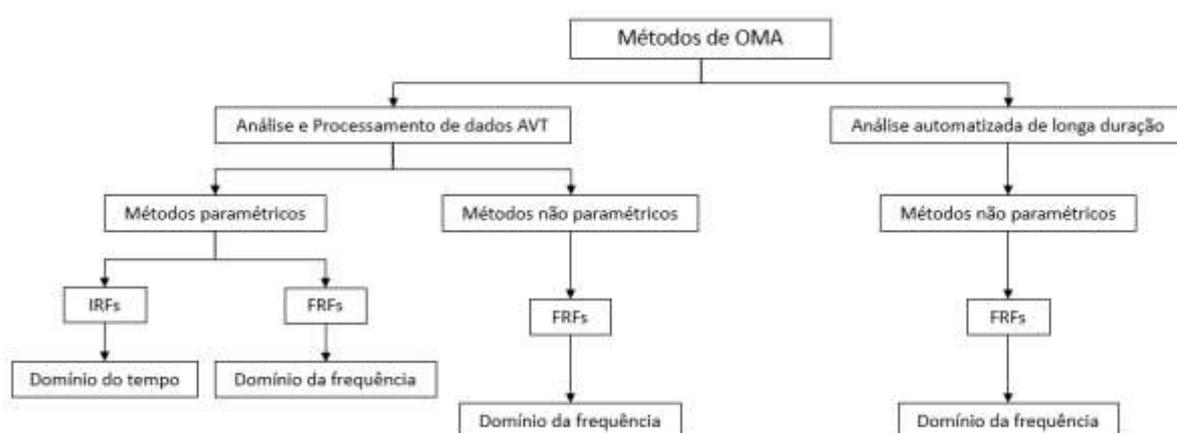


Figura 3.2 – Esquema dos métodos de OMA, adaptado de (Silva L. , 2015).

Função de correlação (FC)

As funções de correlação constituem parte ativa do início de todo o processo de tratamento de dados e derivada análise que possibilita o recurso a certas metodologias, de modo a obter os parâmetros modais da estrutura analisada. Assim, (Brincker & Ventura, 2015) assume que a FC extrai praticamente toda a informação acerca das características modais do sistema, a partir dos dados recolhidos, e que a mesma pode ser aceite como resposta livre do sistema.

(Silva L. , 2015), menciona que o cálculo ou estimativa das FC pode ser realizado através de formulações como o cálculo direto através de somatório, a partir da FFT inversa dos espetros e através do decremento aleatório.

Densidade espectral (DE)

A densidade espectral é outro aspeto relevante, destacada por (Machado, 2018), pois é a partir deste tipo de funções que se passa do domínio do tempo para o domínio da frequência. De acrescentar a sua importância na utilização de técnicas no domínio da frequência, para além da boa prática de inspeção gráfica das funções de DE, avaliando a existência dos picos próximos das ressonâncias.

Usualmente, para todas as séries de medições ou conjunto de dados, as dimensões da matriz de DE são $n \times n$, representando n o número de transdutores, um por cada grau de liberdade. Cada elemento dessas matrizes é uma função de DE: os elementos diagonais são os valores reais das DE entre uma resposta e a mesma, enquanto que os restantes elementos da matriz retratam as DE complexas entre duas respostas distintas. (Silva L. , 2015)

Processamento do sinal

O início do processamento, naquilo que integra a OMA, passa pela realização de uma Transformada Discreta de Fourier (DFT) acerca dos dados temporais recolhidos, de modo a obter matrizes de densidade espectral de potência, compreendendo todas as informações sobre as frequências. Sendo a excitação de banda larga e de espectro contínuo, implica que o descritor de frequência seja uma função de densidade espectral de potência $(m/s^2)^2/Hz$, que normaliza a medição no que respeita à largura de banda do ruído dos filtros de passagens de banda (FFT).

Métodos de identificação modal

Como já mencionado, esta análise pode ser realizada no domínio do tempo ou no da frequência. Considerando a existência de inúmeros algoritmos alternativos, apenas são aqui descritos, de forma sucinta, algumas técnicas de identificação dos parâmetros modais.

As análises no domínio do tempo oferecem uma maior simplicidade na obtenção de dados livres de tendência, dada a manipulação de dados. Contudo, na análise do comportamento vibratório de uma estrutura, neste domínio, a resposta é admitida como livre do sistema. Tal, representa que todos os modos de vibração estão no sinal de resposta, em qualquer altura, constituindo uma das principais dificuldades nestas análises. Em suma, o âmbito destes métodos passa por obter as propriedades modais através das FC, utilizando, em geral, algum tipo de técnica fundamentada num modelo paramétrico de regressão. (Machado, 2018)

(Brincker & Ventura, 2015), exemplifica alguns dos métodos no domínio do tempo:

- Ibrahim Time Domain (ITD);
- Polyreference;
- Eigen Realization Algorithm (ERA);
- Stochastic Subspace Identification (SSI);
- Frequency-Domain Decomposition (FDD).

Nos dados no domínio da frequência ocorre uma decomposição modal de forma natural, isto é, os dados são apresentados em pequenas vagas de frequências, dando destaque ao modo de vibração predominante nessa frequência. Tal facto denuncia a maior vantagem dos métodos de

identificação neste domínio. Contudo, dada a manipulação matemática que acontece na mudança de domínio, os dados não se revelam completamente absorvos de tendência.

(Silva L. , 2015), numera determinados métodos no domínio da frequência:

- *Peak-Picking Method (PP)*;
- *Frequency Domain Decomposition (FDD)*;
- *Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)*;
- *Random Decrement (RD)*;
- *Frequency-Spatial Domain Decomposition (FSDD)*;
- *Transmissibility Operational Modal Analysis (TOMA)*;
- *Power Spectrum Density Transmissibility (PSDT)*;
- *Poly-Least Squares Complex Frequency (p-LSCF)*.

Métodos PP, FDD e EFDD

O método PP é apresentado como um dos mais adequados para uma primeira verificação da qualidade dos dados recolhidos, obtendo assim uma visão inicial das propriedades dinâmicas do sistema. Descrito como rápido e de simples estimação das frequências de ressonância, mediante a seleção dos picos do espectro de saída, tem como princípio a identificação de sistemas no domínio da frequência. Assim, para frequências próximas das frequências naturais da estrutura, a contribuição do modo ressonante é primordial no condicionamento da resposta dinâmica. Subentendendo que os modos têm frequências bem distintas, as mesmas são lidas através da observação dos picos dos gráficos dos espectros. (Silva L. , 2015)

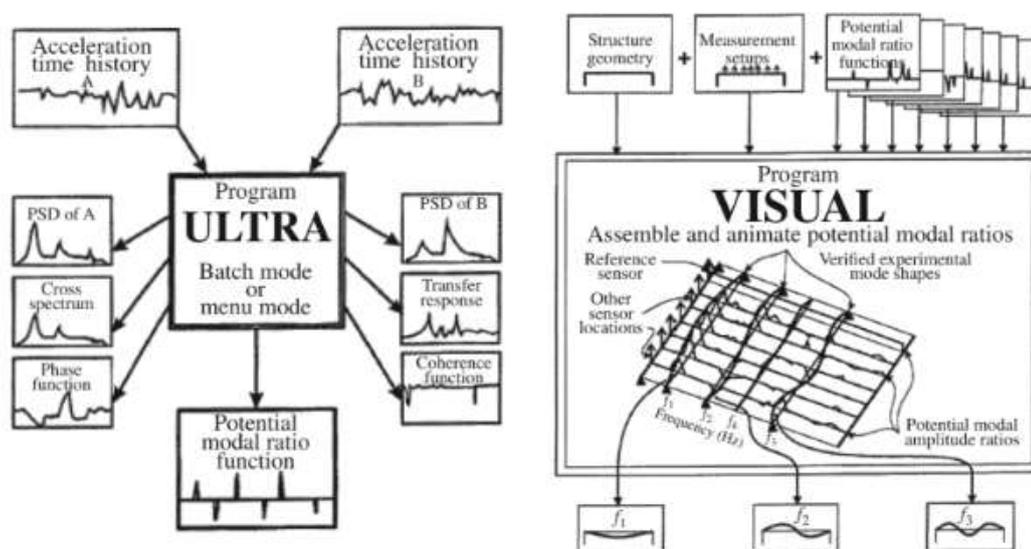


Figura 3.3 – Exemplo do método PP. (Brincker & Ventura, 2015)

O FDD permite a identificação de modos com frequências próximas e obtenção de boas estimativas dos coeficientes de amortecimento modais, superando assim algumas limitações do anterior. Este método é baseado na diagonalização das matrizes de densidade espectral de resposta, de modo a decompor as mesmas nas contribuições modais em cada frequência. Deste modo, estima os modos que usam a decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition – SVT*) de cada um dos conjuntos de dados. (Silva L. , 2015)

Proposto por (Brincker & Ventura, 2015), o EFDD representa um método melhorado da decomposição no domínio da frequência. Este repara as principais falhas do PP e do FDD, permitindo obter estimativas do amortecimento modal e melhorar as aproximações das frequências de vibração. Assim, é traduzido na aplicação de um ajuste às funções de densidade espectral, escolhendo por critério e examinando vários pontos nas proximidades de cada ressonância, e finalmente, aplicando a inversa da transformada de *Fourier*. Permite um maior acerto nas estimativas das frequências das vibrações, visto que é baseado na passagem a zero do ajuste à função de auto correlação e não somente a um valor de pico. (Marques et al, 2014)

4 CASOS DE ESTUDO

Decorrente da adjudicação à empresa VESAM da obra de monitorização de uma torre de reciclados, localizada nas instalações da SONAE ARAUCO em Oliveira do Hospital, optou-se por proceder, de forma prévia, a ensaios em ambiente laboratorial controlado, com ações dinâmicas aplicadas numa viga em consola com os seguintes objetivos:

- Validar o funcionamento do sistema de aquisição de dados e do sensor de acelerações ONESensor desenvolvido pela empresa;
- Compreender fenómenos de arranque e paragem de equipamentos mecânicos;
- Implementar, testar e validar a sequência: modelação – medição – calibração do modelo.

A etapa seguinte consistiu no trabalho de campo, através de medições efetuadas na estrutura acima referida. Em ambos os casos foram utilizados, em paralelo, equipamentos de medição da VESAM (ONESensor, software de aquisição *Firefly Decoder* e de pós-processamento *Octave*) e do ISISE-UC (acelerómetros piezoelétricos PCB 393B12 e sistema de aquisição e pós-processamento *LabVIEW SignalExpress*). Nos pontos seguintes é descrito todo o processo de instalação do sistema de monitorização nas respetivas estruturas (modelo laboratorial e torre de reciclados), incluindo a análise comparativa de resultados entre sistemas de monitorização e destes com os obtidos em modelos numéricos.

4.1 Viga em consola

4.1.1 Síntese

De forma a simplificar, isto é, ter um modelo de fácil calibração, nos ensaios iniciais foi testada uma viga IPE 120, em consola, fixa a um pórtico de aço do Centro de Pesquisa da VESAM e a qual já tinha sido utilizada para a medição de frequências próprias por via de vibração ambiente não sujeita a nenhuma ação direta – ensaio ENS 201702: Modos de Vibração.

Deste modo, no ensaio ENS 20190: Vibração Dinâmica em Consola, a ação dinâmica foi introduzida através de um motor elétrico controlado por um variador que induzia vibração na consola mediante rotação do mesmo.

O objetivo inicial passou por validar o sistema de aquisição de dados implementado na estrutura, comparando os resultados obtidos pelos acelerómetros desenvolvidos pela VESAM Group e pelo equipamento do ISISE-UC, não descuidando a relevância dos cálculos teóricos. Os efeitos de paragem e arranque dos equipamentos mecânicos revelam ser preocupantes para o comportamento das estruturas, pelo que o segundo propósito passou por compreender os

mesmos. Numa última fase, através de modelação em programas de elementos finitos, o equipamento foi sendo calibrado dando mais um passo na aprovação do seu uso no campo.

4.1.2 Cálculo com modelo analítico

Obter um valor teórico é de importância extrema visto servir de referência para comparação com valores obtidos quer em programas de modelação como nos próprios ensaios em laboratório. Assim, considerando um modelo analítico sem massa e através da fórmula (1), foram obtidos os valores da tabela 4.3.

$$f_n = \frac{A}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (1)$$

Tabela 4.1 – Valores de A para a 4 primeiras frequências naturais (Hz), adaptado de (Rebelo, 2016).

A ₁	3,52
A ₂	22,40
A ₃	61,70
A ₄	121,00

Para efeito de cálculo foram consideradas as características geométricas de um IPE 120 com 1860 mm de comprimento, admitindo um módulo de elasticidade E= 200 GPa.

Tabela 4.2 – Dados relativos ao IPE 120.

m (kg/m)	10,40
A (cm ²)	13,21
I _y (cm ⁴)	317,80
I _z (cm ⁴)	27,67

Na tabela 4.3 são dados os valores das primeiras frequências naturais nos eixos Y (direção horizontal) e Z (direção vertical) da viga obtidas do modelo analítico sem massa adicional.

Tabela 4.3 – Primeiras frequências naturais nos eixos Y e Z do IPE.

Valores teóricos	Frequências (Hz)	
	Eixo Y	Eixo Z
	11,87	40,23

4.1.3 Elementos base de ensaio

- Consola – IPE 120 com 1860 mm de comprimento;
- Ligação Consola/Chapa – cordão de soldadura em todo o perímetro do perfil;
- Ligação de Chapa de topo/Pórtico – chapa metálica com 280x280x15 mm com 6 parafusos TCB M20, classe 10.9 com furação disposta de forma a possibilitar a orientação dos dois eixos da viga segundo a vertical;
Momento de aperto inicial dos parafusos: 328 Nm;
Momento de aperto final dos parafusos: 468 Nm;
- Motor – Peso: 4950 g, RPM máx: 2800;
- Variador;
- Ligação Motor/Consola – chapas de aço com 4 furações ligadas ao motor com parafusos M16 e entre si com varões roscados $\phi 16$.

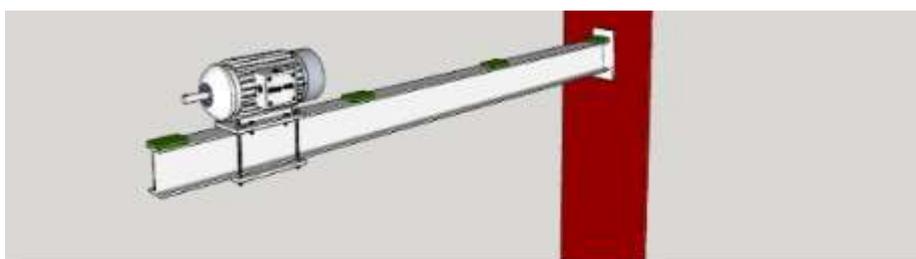


Figura 4.1 - Modelo 3D da consola com o posicionamento dos acelerómetros (verde) e do motor eléctrico, (Carapito, 2015).

Como ilustrado, os sensores são distribuídos de forma uniforme ao longo da consola, com a colocação do primeiro sensor junto à chapa de topo e o último na ponta da viga. De notar que o procedimento é executado com a viga orientada com o eixo forte na vertical.

4.1.4 Ensaio ENS 201702 – acelerómetros STEVAL

Este ensaio, realizado anteriormente pela VESAM Group, serviu de referencial para comparação de valores, nomeadamente de frequências próprias através de vibração ambiente sem qualquer massa adicional. Com recurso a um *kit* da STM, composto por quatro sensores com capacidade de medição de acelerações triaxiais e uma *gateway* para controlo e recolha de informação dos sensores, são adquiridos os dados.

- Acelerómetros referência STEVAL – BFA001V1B;
- Gateway referência STEVAL – IDP004V1.

A ficha técnica de ambos equipamentos pode ser consultado no Anexo A, com recurso à (ST life.augmented, s.d.).

O equipamento em uso denota uma capacidade de taxas de amostragem elevadas, na ordem dos 48 kHz, pelo que, a fim de garantir uma boa qualidade de sinal, é utilizada uma taxa dez vezes superior às frequências de vibração a medir. Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores medidos das frequências naturais segundo o eixo fraco e eixo forte do perfil I sem considerar massa adicional do motor elétrico, posteriormente colocado na extremidade da consola. Como seria de esperar, os valores obtidos são próximos dos valores teóricos, embora apresentando maior diferença na frequência mais alta devido a menor relação sinal/ruído.

Tabela 4.4 - Frequências obtidas no ensaio ENS 201702, sem massa adicional.

ENS 201702	Frequências (Hz)	
	Eixo Y	Eixo Z
	11,45	38,02

4.1.5 Ensaio ENS 20190 – Vibração Dinâmica em Consola

Em condições semelhantes às descritas previamente foi realizado um primeiro ensaio (#1) usando o novo sensor desenvolvido pela equipa de investigação da VESAM Group, o *OneSensor*. Na Tabela 4.5 é possível verificar resultados comparáveis aos obtidos no ensaio anterior com os acelerómetros de referência. Seguiram-se medições na viga, agora com a massa adicional do motor elétrico entretanto colocado no banzo superior da viga, ensaios #2 e #3. No ensaio #2 o motor elétrico encontrava-se parado e no #3 o motor estava em funcionamento.

Para medir a aceleração no eixo y (horizontal) e eixo z (vertical) foi colocada uma unidade do protótipo na extremidade da consola. Cada eixo foi avaliado de forma independente e o sensor calibrado para cada configuração de teste. Os dados foram coletados através do *Firefly Decoder* e posteriormente analisados no programa *Octave*.

Tabela 4.5 – Frequências obtidas no ensaio com o protótipo *OneSensor*.

Ensaio*	Frequências (Hz)	
	Eixo Y	Eixo Z
#1	11,375	37,875
#2	7,812	26,406
#3	não identificável	não identificável

*#1 (sem motor, vibração ambiente); #2 (motor parado, vibração ambiente); #3 (motor ativo, 2300 rpm, 38.33 Hz).

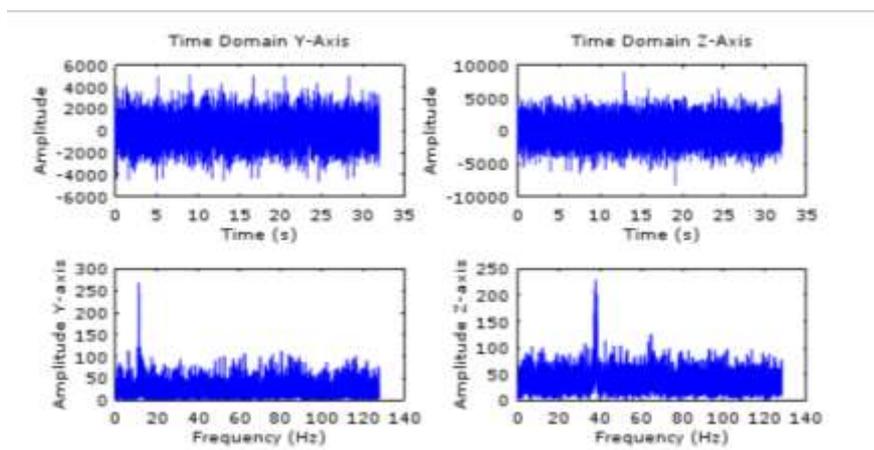


Figura 4.2 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #1, adaptado de (Conceição, 2019).

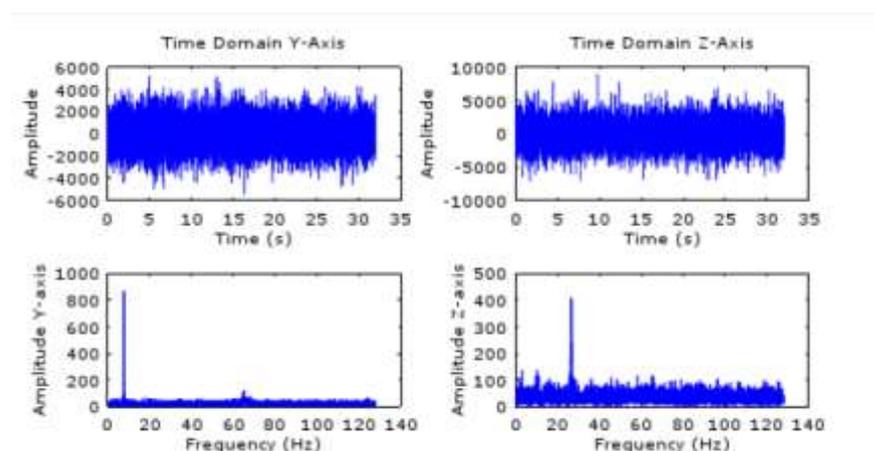


Figura 4.3 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #2, adaptado de (Conceição, 2019).

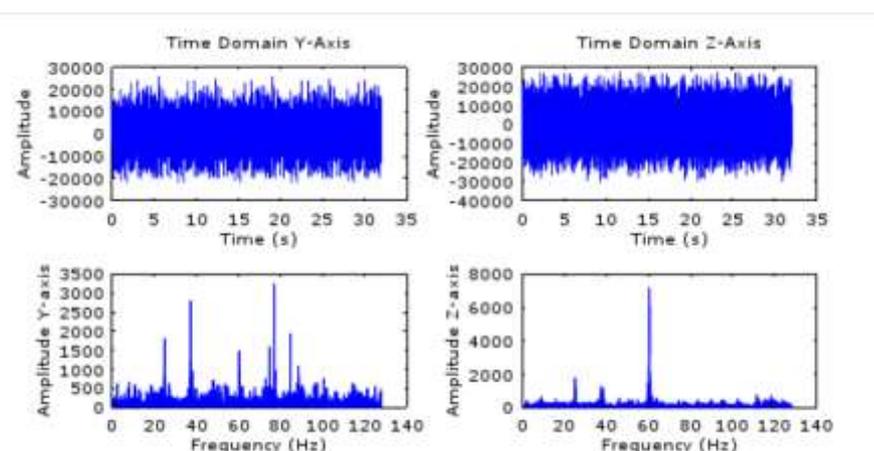


Figura 4.4 – Amplitude e frequências registadas no ensaio #3, adaptado de (Conceição, 2019).

O *OneSensor* apresentou problemas de saturação aquando do funcionamento do motor. Por esse motivo não foi possível identificar inequivocamente as frequências naturais.

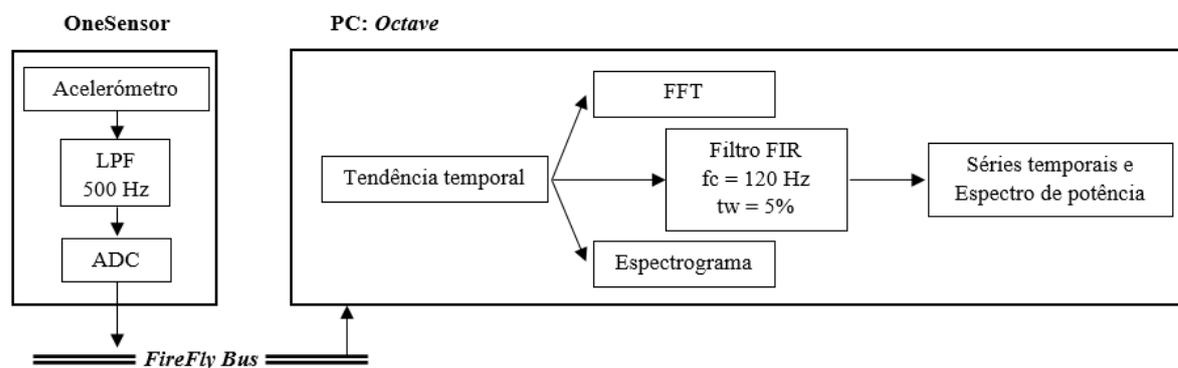


Figura 4.5 – Cadeia do processamento de sinal, adaptado de (Conceição, 2019).

4.1.6 Ensaio ISISE-UC

No âmbito da comparação e validação dos valores de aceleração tabelados nos ensaios efetuados foi testado o mesmo sistema estrutural, incluindo a presença da massa adicional, usando o sistema de aquisição e tratamento de sinal do ISISE-UC.

Os quatro acelerómetros utilizados, cujas especificações são dadas na Tabela 4.6, correspondem ao tipo PCB 393B12.

Tabela 4.6 – Características dos acelerómetros.

Canal	SN	Sensibilidade	Peso	Gama de freq.
1	18914	1.057 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz
3.3	18917	1.029 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz
3.2	18915	1.041 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz
3.4	21955	1.073 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz

De notar que, todas as configurações de teste incluíram um ponto de medição vertical (914) e medição horizontal (917) transversal ao nível do eixo da viga, um ponto de medição horizontal transversal ao eixo da viga ao nível do banzo (915) e por fim um ponto de medição fora da viga em teste (955) usado para despistar as frequências naturais do pórtico de ensaio. Este último foi colocado na direção do eixo da consola da primeira configuração e transversal ao eixo do elemento nas configurações seguintes.

A distribuição do equipamento de teste acima descrita é representada na figura 4.6 e fotografia 4.1. Foram feitas três medições, sendo a primeira com a configuração (1) e as duas seguintes com a configuração (2).

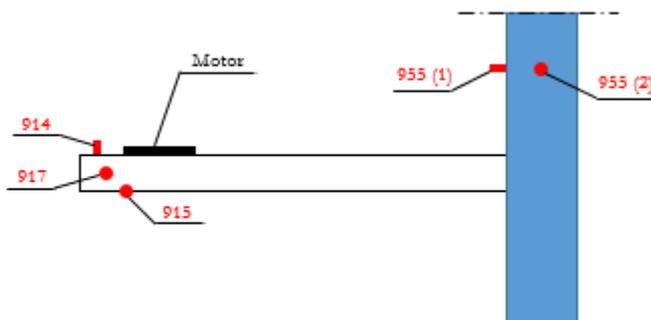


Figura 4.6 - Equipamento de teste e localização dos acelerómetros.



Fotografia 4.1 - Equipamento de teste e localização dos acelerómetros (Peres, 2019)

As duas primeiras configurações de medição tiveram em perspetiva a vibração ambiente sendo seguida de medições de vibração forçada. Para auxílio de leitura dos dados adquiridos através dos acelerómetros foi utilizado o *LabVIEW SignalExpress 2012*, um *software* de data *logging* para aquisição de séries temporais, análise de frequências e apresentação de resultados.

Os valores obtidos podem ser lidos na Tabela 4.7 que apresenta os resultados obtidos dos espectros calculados. Cada valor corresponde à frequência de um pico no espectro, que estará relacionado com alguma frequência natural do sistema. Deve-se notar que não apenas as frequências naturais da viga, mas também as frequências naturais do pórtico de ensaio aparecem nos resultados e são identificadas como tal. Pode constatar-se que as frequências naturais identificadas para a viga com massa adicional são próximas das mostradas na Tabela 4.5 ensaio #2 obtidas pelo sistema da VESAM.

Tabela 4.7 – Resultados de ensaio.

Configuração	Acelerómetro	Valores de frequência dos picos espectrais (Hz)						
1	914			10,17	15,47	26,14		45,91
1	917		7,67	10,17	16,93		37,07	
1	915		7,67	10,17	16,86	26,26		
1	955(1)			10,17	15,39		36,48	45,88
2	914			10,17	15,47	26,14		45,91
2	917		7,67	10,17	16,93		37,07	
2	915		7,67	10,17	16,86	26,26		
2	955(2)	3,66	5,56				37,17	45,74
3	914	6,45			17,05	26,43		46,58
3	917	6,45	7,70		17,13			46,6
3	915	6,45	7,78		17,13			46,6
3	955(2)	3,28	6,40	9,95	18,85			
Identificação da origem dos picos espectrais								
			7,70		17,0	26,3		
	identificação	Pórtico de ensaio	Viga Modo horiz.	Pórtico de ensaio	Viga Modo torção	Viga Modo vertical	Pórtico de ensaio	Pórtico de ensaio

Com consulta ao Anexo B, para cada configuração são mostradas as séries temporais, de apenas 100 segundos, dos quatro pontos de medição e o respetivo espectro de potência até 50 HZ.

4.1.7 Ensaio *OneSensor*

Na continuação do ensaio da viga em consola com vista à validação da resposta dada pelo *OneSensor*, foram feitas medições de vibração ambiente em que na estrutura foi colocada uma massa adicional com diferentes valores a fim de obter diferentes valores de frequência natural da viga.

O sensor foi colocado de acordo com a figura 4.7, sendo definido como amostra acelerações axiais a 250 SPS, com um filtro de baixa frequência definido para 62,5 Hz. Não sendo o tempo de amostragem predefinido, optou-se por coletar pelo menos cinco minutos de dados através de comandos UART. Estes foram recolhidos para um computador e posteriormente processados e analisados no *Octave*.

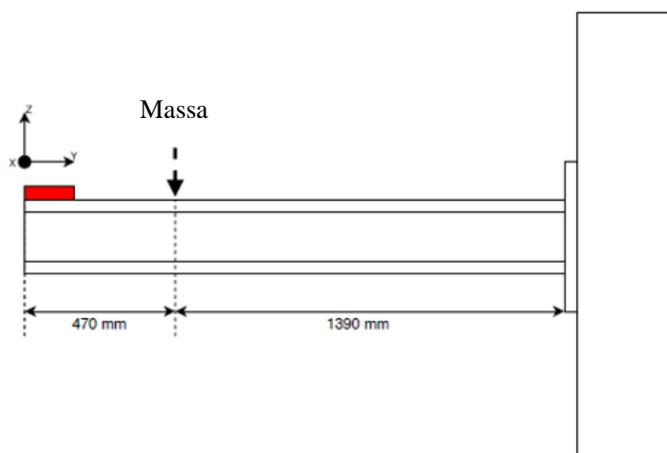


Figura 4.7 - Esquema da viga em consola e a massa adicional, adaptado de (MIRA Systems, 2019).

O ensaio de vibração livre começou sem qualquer massa adicional e prosseguiu para a sequência de valor da massa apresentadas na tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores de massa adicional aplicada.

Massas	Massa total adicionada (Kg)
L ₁	8,9600
L ₂	24,1045
L ₁ L ₂	33,0645
L ₂ L ₃	48,1945
L ₁ L ₂ L ₃	57,1545

Das análises feitas com base nos dados fornecidos pelo *OneSensor* pode concluir-se que este tem a sensibilidade suficiente para identificar as vibrações que o ambiente do laboratório transmite ao elemento viga e possibilita a análise espectral e identificação de frequências naturais do sistema.

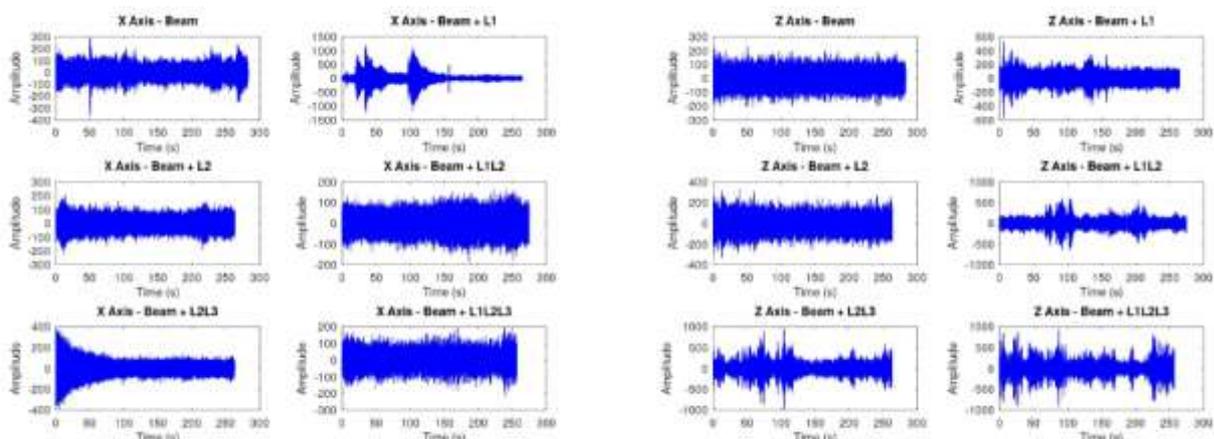


Figura 4.8 – Amplitudes registadas com diferentes configurações, (MIRA Systems, 2019).

Uma análise FFT através do *Octave* mostra a variação de frequências, apresentadas na tabela que se segue, indicando uma tendência de diminuição com o incremento de massa, como esperado.

Tabela 4.9 – Frequências obtidas com as diferentes configurações, adaptado de (MIRA Systems, 2019).

Configuração	Frequências (Hz)	
	Eixo X	Eixo Y
Viga	11,43	38,25
Viga + L ₁	7,73	26,50
Viga + L ₂	5,48	19,09
Viga + L ₁ L ₂	4,96	18,50
Viga + L ₂ L ₃	3,89	15,34
Viga + L ₁ L ₂ L ₃	3,30	13,52

4.1.8 Comparação com modelos numéricos

Os valores experimentais detalhados nos pontos anteriores são a seguir comparados com valores obtidos em modelos numéricos através do *software Robot Structural Analysis* e *SeismoStruct*.

Tabela 4.10 – Comparativo de valores de ensaios sem massa adicional.

Ensaio sem massa adicional	Frequências (Hz)	
	Eixo horizontal	Eixo vertical
Valor analítico	11,87	40,23
ENS 201702	11,45	38,02
ENS 20190	11,38	37,88

<i>OneSensor</i>	11,43	38,25
<i>Robot Structural Analysis</i>	11,89	40,26

Tabela 4.11 – Comparativo de valores de ensaios com massa adicional

Ensaio com massa adicional (8,78kg)	Frequências (Hz)	
	Eixo horizontal	Eixo vertical
<i>OneSensor</i>	7,73	26,50
<i>Robot Structural Analysis</i>	7,12	24,11
<i>SeismoStruct</i>	7,40	25,70

Os valores refletem uma aproximação razoável podendo concluir-se que o *OneSensor* poderá ser usado em testes de campo para a medição de vibração ambiente.

4.2 Torre de reciclados – SONAE ARAUCO, O.H.

4.2.1 Introdução

Com vista à aproximação do objetivo final, a passagem para o trabalho de campo sucedeu os ensaios laboratoriais. Assim, com o intuito de instalar um sistema permanente de monitorização na estrutura localizada em Oliveira do Hospital, nas instalações da SONAE ARAUCO, foram realizados ensaios inerentes à medição de vibrações, incluídos numa parceria ISISE-UC/VESAM Group.

A estrutura, uma torre em estrutura metálica com oito pisos em gradil metálico, é apresentada como parte integrante de um complexo sistema de equipamentos eletromecânicos para separação de partícula e resíduos de estilha de madeira.

O desenvolvimento do presente ponto compila todo um processo desde a obtenção dos primeiros resultados, incluindo o desenvolvimento de um modelo de análise numérico, à implementação da rede sensorial em uso, num processo de contínua comparação, análise crítica e validação de resultados. É relevante chamar a atenção para a diferença entre o sistema de coordenadas usado pelo ISISE-UC e pelo VESAM Group, este último atualmente em vigor.

O relatório redigido pela (MIRA Systems, 2021) aponta aos seguintes objetivos:

- Medição das frequências próprias de vibração da estrutura;
- Identificação modal;
- Validação das medições efetuadas pelo *OneSensor*;
- Apresentação do sistema instalado;
- Análise a alterações ocorridas na estrutura;

- Apresentação do portal de visualização de dados;
- Monitorização: a longo prazo, de eventos;
- Análise às frequências da estrutura;
- Comparação das frequências obtidas nos ensaios com as obtidas pela rede instalada;
- Análise à variação de frequências de vibração da estrutura;
- Análise ao funcionamento do sistema de monitorização.

No Anexo C podem ser consultadas planta e cortes da respetiva estrutura em análise, cortesia da VESAM.

4.2.2 Equipamento de medição

De modo a obter as frequências e os respetivos modos de vibração da estrutura em estudo foi realizado um conjunto de medições por ambas as entidades. Assim, são dispostos e comparados resultados, sempre no âmbito da validação do *OneSensor*.

ISISE-UC

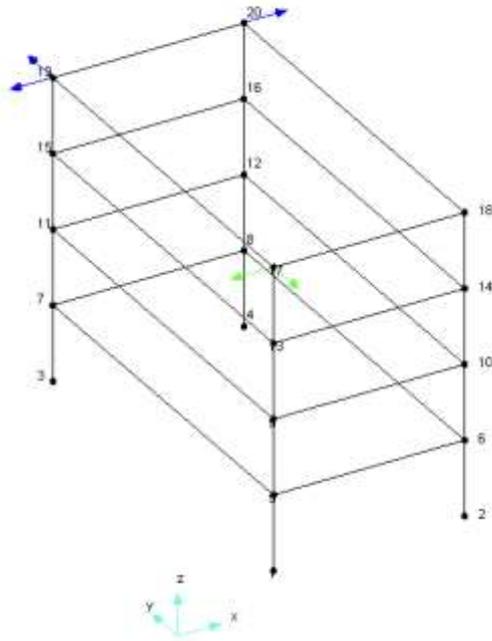
Foram dispostos cinco acelerómetros piezoelétricos do tipo PCB 393B12 ao longo da estrutura. Os detalhes do mesmo podem ser consultados na Tabela 4.10.

Tabela 4.12 – Características dos acelerómetros e posição nas medições

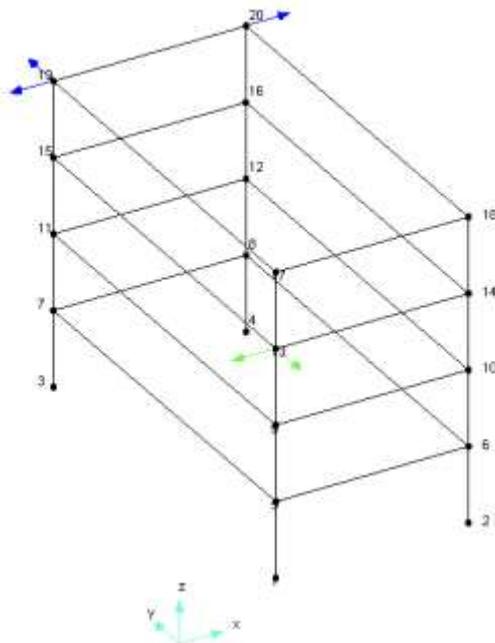
<i>Canal</i>	<i>SN</i>	<i>Sensibilidade</i>	<i>Peso</i>	<i>Gama de freq.</i>	<i>Papel na medição</i>
1	914	1.057 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz	sensor itinerante -yy
2	915	1.029 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz	sensor itinerante -xx
3	917	1.041 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz	sensor referência xx
4	955	1.073 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz	sensor referência -xx
5	556	1.073 V/ms^{-2}	210 g	0.15 – 1000 Hz	sensor referência yy

A Figura 4.9 ilustra as quatro configurações de teste: três pontos de medição horizontal (azul) tidos como referência e dois pontos de medição horizontal (verde) que foram movidos de modo a definir diferentes situações.

Project Geometry - Data Set - setup1



Project Geometry - Data Set - setup2



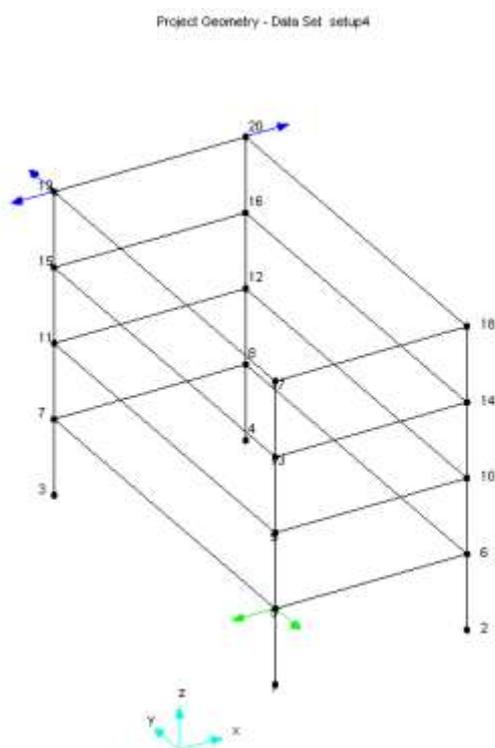
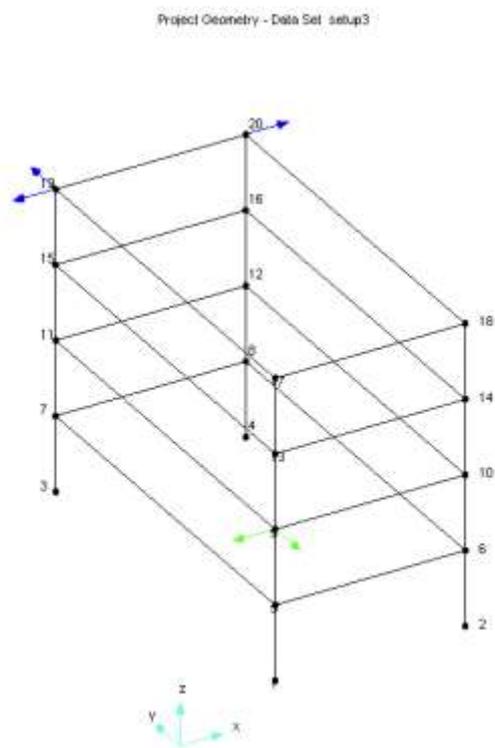


Figura 4.9 – Quatro configurações (*Setups*) de medição.

As configurações definidas visam o posterior uso de dados para análise dinâmica, através do método de identificação modal por medição da vibração natural.

Na Figura 4.10 e Fotografia 4.2 podem ser vistas as diferentes disposições dos sensores.

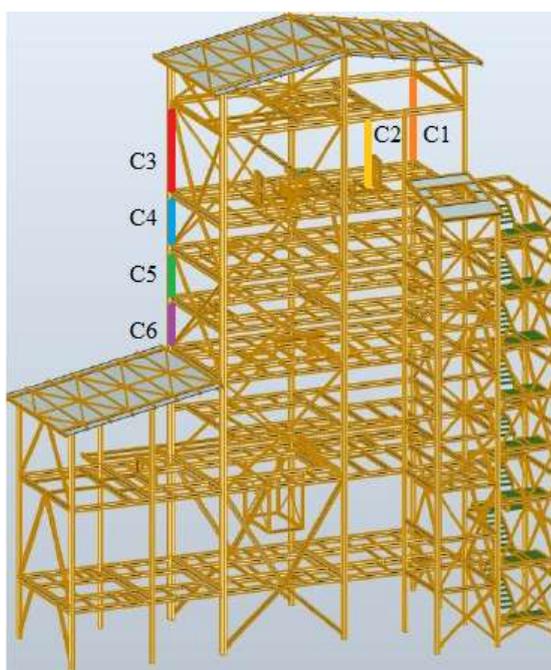


Figura 4.10 – Identificação dos pontos de medição ISISE-UC, vista Este adaptada de (MIRA Systems, 2021).



Fotografia 4.2 – Lado esquerdo: acelerómetros referência 955 e 556 em C1; Meio: acelerómetro referência 917 em C2; Lado direito: acelerómetros itinerantes 915 e 914, igual disposição em C3, C4, C5 e C6 (Peres, 2019).

Os acelerómetros 556 e 995 foram posicionados na coluna 1 (C1) e o 917 na coluna 2 (C2), compondo os dois pontos de referência. O 914 e 915 foram inicialmente colocados no mesmo nível da referência, no sétimo piso, na coluna 3 (C3), sendo sucessivamente dispostos com o mesmo arranjo, no sexto piso (C4), no quinto piso (C5) e, por fim, no quarto piso (C6).

A aquisição de dados foi realizada usando um sistema composto pelo chassis NI cDAQ9172 com placas de condicionamento de sinal e digitalização NI 9233 controladas pelo *software* NI *SignalExpress*, instalado num computador – Fotografia 4.3.

Foram adquiridas séries temporais de cinco minutos para cada configuração. Durante estas, as séries e os espectros de potência média foram monitorados para detetar perturbações do sinal, por possíveis eventos inesperados, que poderiam afastar da suposição teórica de excitação por ruído branco.



Fotografia 4.3 – Sistema de aquisição de dados ISISE-UC (Peres, 2019).

MIRA SYSTEMS

Como previsto, a *MIRA Systems* realizou, em simultâneo, medições triaxiais em variadas localizações da estrutura, de forma semelhante às dispostas anteriormente. O *OneSensor* tem capacidade de incluir vários sensores na mesma unidade, tal como a capacidade de registar acelerações em três diferentes direções.

A disposição dos sensores é indicada na Figura 4.12 e Fotografia 4.4.

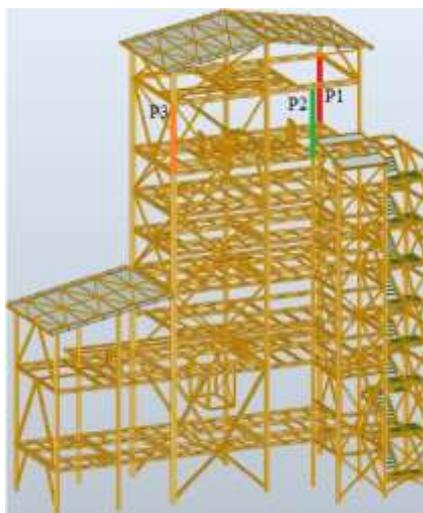


Figura 4.11 – Identificação dos pontos de medição *OneSensor*, vista este adaptado de (MIRA Systems, 2021).



Fotografia 4.4 – Lado esquerdo: acelerómetro em P3; Meio: acelerómetro em P2; Lado direito; acelerómetro em P1 (Peres, 2019).

Os dados do *OneSensor* foram adquiridos um computador portátil, auxiliado pelo *software Octave* no processamento e análise de dados recebidos.



Fotografia 4.5 – Sistema de aquisição de dados VESAM *Group* (Peres, 2019).

4.2.3 Modelação numérica

Após reconhecimento *in situ*, com levantamento das respetivas dimensões, secções dos elementos constituintes da estrutura e desenhos de projeto disponíveis, foi definida a geometria do modelo estrutural. Para tal, foram utilizados elementos finitos de barra disponíveis no *software Robot Structural Analysis* tendo como objetivo a determinação numérica das características dinâmicas da estrutura – frequências e modos de vibração – com a maior fiabilidade possível.



Figura 4.12 – Perspetiva real da estrutura metálica da torre, vista Oeste ainda sem painel, adaptado de (MIRA Systems, 2021).

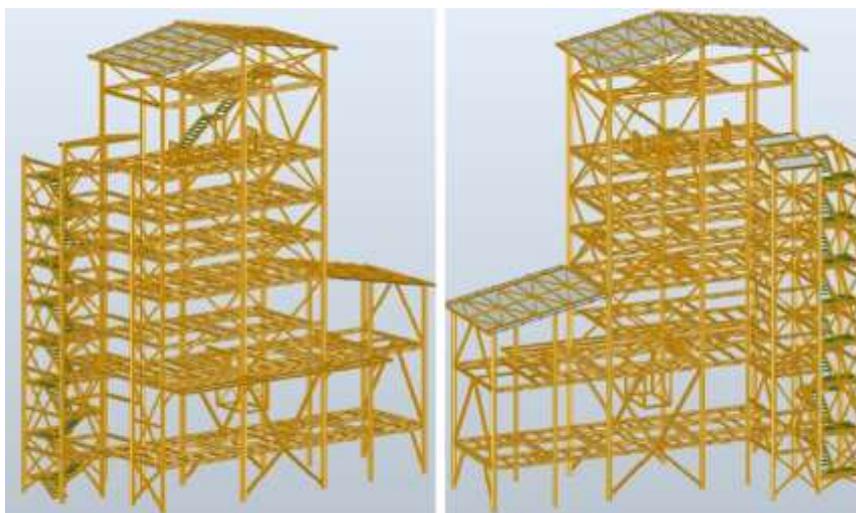


Figura 4.13 – Perspetiva do modelo estrutural da estrutura metálica da torre, vista Oeste (esq.) e vista Este (dir.), adaptado de (MIRA Systems, 2021).

Os equipamentos, nomeadamente a quantificação da ação do seu peso em cada piso, provocou alguma incerteza. A título de exemplo, relativo ao nível do segundo, quarto e sétimo piso não foi possível aceder a informações acerca da maquinaria presente. Contudo, foi considerado o peso dos principais equipamentos mecânicos presentes.

É importante referir a ausência da fachada Oeste da torre no modelo, revestida com painel sandwich, que certamente influencia a resposta da estrutura, assim como, no sétimo piso, a ligação da treliça de apoio ao transportador *Redler*, cuja estimativa de peso era desconhecida.

Não obstante, neste tipo de estruturas porticadas, ao nível dos diferentes pisos é primordial assegurar o efeito diafragma precavendo danosas ações horizontais. O gradil metálico confere a rigidez de membrana com significativa influência nos modos e frequências próprias da estrutura. No modelo foi definido um elemento finito plano que simula a rigidez do mesmo.

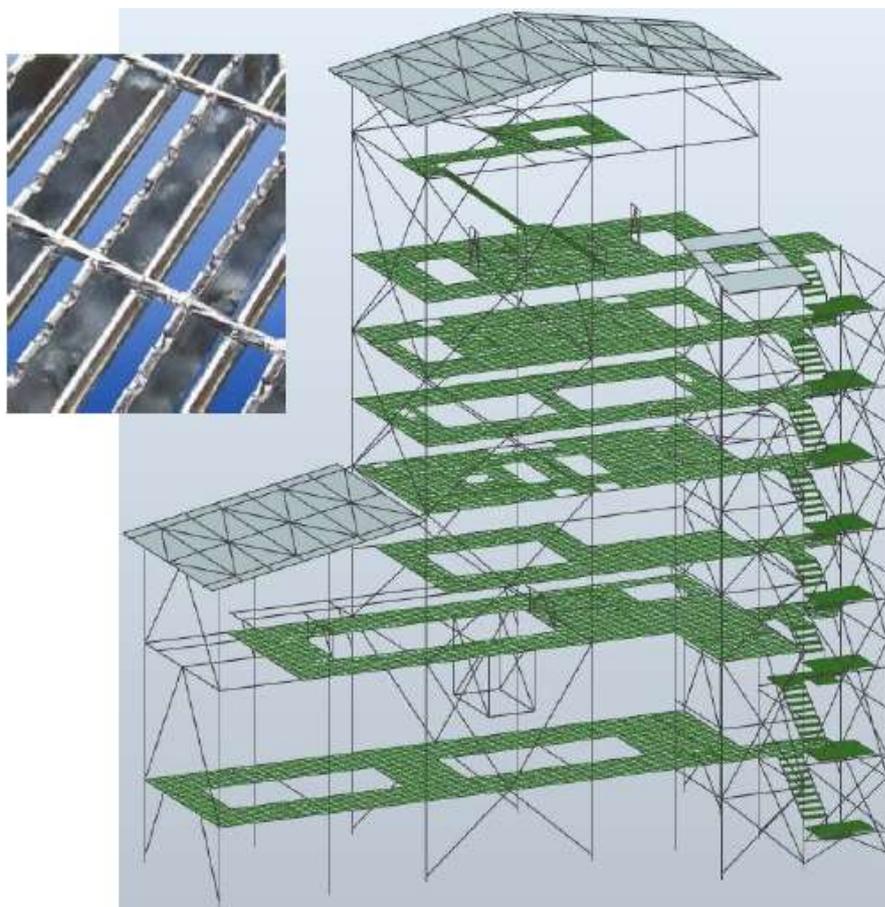


Figura 4.14 – Modelação do pavimento em gradil metálico, (MIRA Systems, 2021).

A modelação realizada apresenta uma geometria e caracterização seccional bastante idêntica da real estrutura a monitorizar. Deste modo, apesar de alguma complexidade, o cálculo computacional para a análise modal decorre num espaço temporal aceitável e sem dificuldade na obtenção de frequências e modos de vibração.

4.2.4 Resultados

ISISE-UC

As séries temporais de acelerações foram inseridas no *software ARTeMIS*, de modo a identificar as características modais – frequência natural, amortecimento e configuração de modos.

Tabela 4.13 – Frequências naturais e amortecimento modal: ISISE-UC.

Modo	Frequência [Hz]	Amortecimento [%]	Amortecimento padrão [%]	Comentário
Modo 1	1,797	1,265	0,4271	1. Modo transversal em xx
Modo 2	2,608	0,6435	0,5988	1. Modo transversal em yy
Modo 3	3,145	0,4580	0,3194	2. Modo transversal em xx
Modo 4	3,792	0,5501	0,1922	1. Modo de torção global

Tal como indicado no quadro, os picos espectrais identificativos das frequências naturais foram detetados para 1.797 Hz na direção xx, a de menor inércia da estrutura e 2.608 Hz na direção yy, de maior inércia da mesma.

As densidades espectrais podem ser consultadas nos espectrogramas apresentados no Anexo D.

Às frequências tabeladas são associadas as configurações de modos de vibração que se seguem.

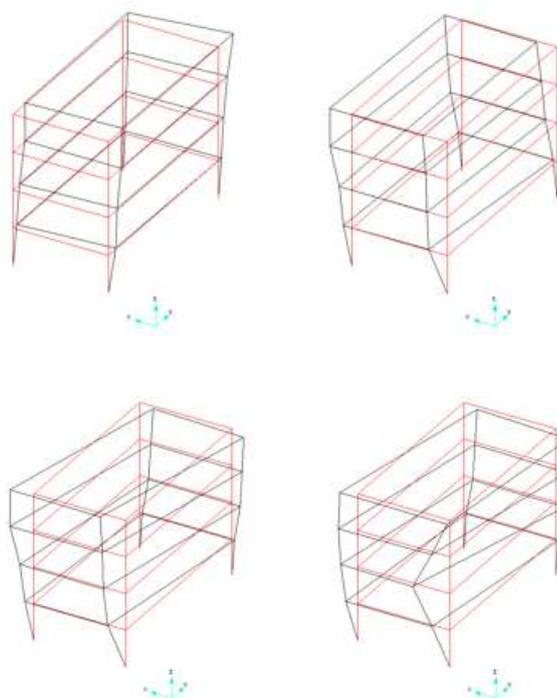


Figura 4.15 – Modos de vibração. Cima: modo 1 (esq.), modo 2 (dir.); Baixo: modo 3 (esq.), modo 2 (dir.). (MIRA Systems, 2021).

MIRA SYSTEMS

Os valores medidos pelos acelerómetros inerentes ao equipamento *OneSensor* apresentam bastante proximidade dos obtidos através dos acelerómetros piezoelétricos.

Tabela 4.14 – Frequência e configuração de cada modo: MIRA Systems.

Modo	Frequência [Hz]	Configuração do modo
Modo 1	1,800	Modo transversal na direção de menor inércia: direção xx
Modo 2	2,652	Modo transversal na direção de maior inércia: direção yy

Os dois maiores picos espectrais são detetados na gama dos 1,800 Hz na direção xx, de menor inércia, e 2,652 Hz na direção yy, maior inércia, tal como indicado no quadro.

As densidades espectrais podem ser consultadas nos espectrogramas apresentados no Anexo E.

Modelo numérico

Através da modelação numérica do comportamento estrutural, com recurso a uma análise modal, foram determinados modos e frequências próprias de vibração da estrutura.

Tabela 4.15 – Frequência e configuração de cada modo: modelo numérico.

Modo	Frequência [Hz]	Configuração do modo
Modo 1	2,83*	Oscilação lateral segundo a menor inércia do edifício
Modo 2	2,87	Oscilação lateral-torsional do edifício
Modo 3	3,43	Oscilação lateral segundo a maior inércia do edifício

*sem gradil: 2,14 Hz.

A visualização dos mesmos é apresentada nas figuras que se seguem.

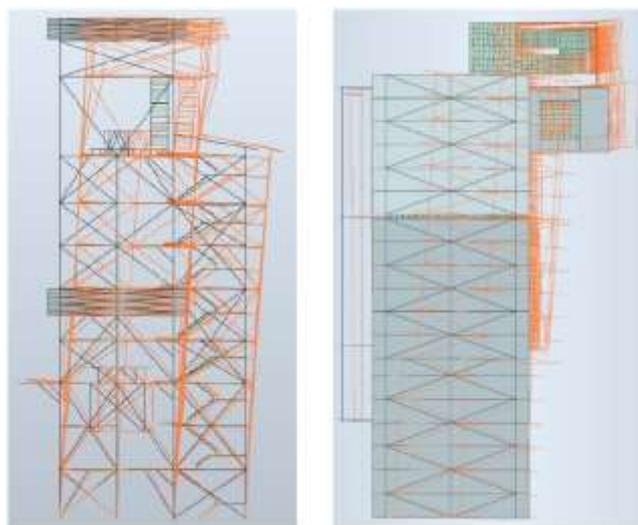


Figura 4.16 – Configuração do Modo 1 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)

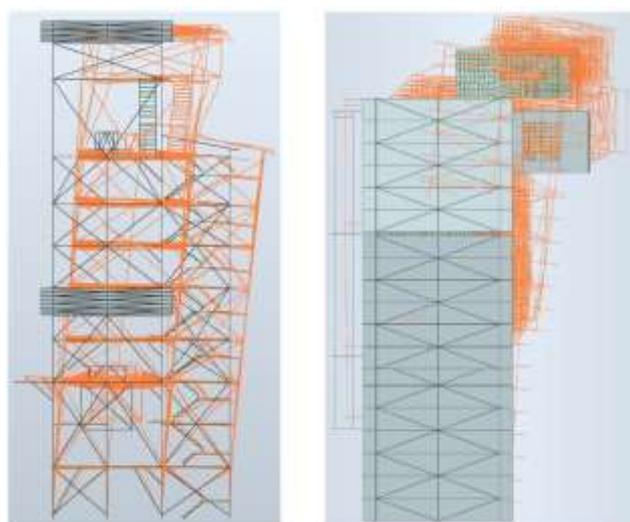


Figura 4.17 – Configuração do Modo 2 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)

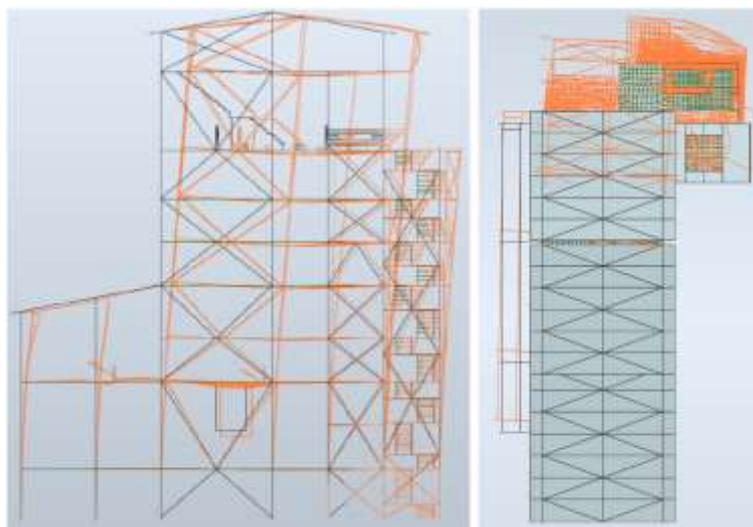


Figura 4.18 – Configuração do Modo 3 – vista de alçado lateral e planta. (MIRA Systems, 2021)

A diferença de resultados está relacionada com a complexidade da estrutura, assim como da indefinição acerca das massas e rigidezes dos equipamentos presentes. No entanto, é positivo o fato do modo mais baixo corresponder em ambos os casos a um modo de oscilação lateral segundo a menor inércia da estrutura, com primazia do Piso 7, onde a altura do piso é superior e não existem travamentos laterais.

4.2.5 Instalação do sistema de monitorização

A instalação do sistema de monitorização decorreu entre o final de 2019 e o começo de 2020. De salientar que todo o sistema foi montado na estrutura sem qualquer alteração à mesma, recorrendo a fixações não invasivas, sem furações.



Figura 4.19 – Processo de instalação do sistema de monitorização, (MIRA Systems, 2021).

Por conseguinte, o sistema disposto é composto por:

- Sete sensores *OneSensor*:
 - Aceleração triaxial;
 - Temperatura;
 - Humidade relativa.
- Dois sensores *OneSensor*:
 - Aceleração triaxial;
 - Extensometria;
 - Temperatura;
 - Humidade relativa.
- Uma estação meteorológica:
 - Pluviosidade;
 - Velocidade e direção do vento;
 - Temperatura;
 - Humidade relativa.
- Um *gateway (GTW)*:
 - Equipamento de gestão de rede;

- Recolha e envio de dados recolhidos pelo sistema;
- Bateria: *Sealed Lead Acid* 12VDC 7h.
- Rede:
 - Cablagem entubada com tubo galvanizado de 20 mm com proteção de topo contra danos;
 - Tubagem fixa à estrutura com abraçadeiras e fixadores aos banzos dos perfis da torre;
 - Caixas de derivação T-BOX 60 IP66 com buçins PG11, fixas a chapas quinadas em L (galvanizadas) ligadas à estrutura com a mesma tipologia de clips de tubagem;
- Estruturas de suporte em aço galvanizado.

4.2.6 Modo de funcionamento do sistema de monitorização

Funcionamento por eventos

O sistema foi instalado de modo a todos os sensores comunicarem entre si e com o equipamento de gestão (GTW). A aquisição de dados foi categorizada em três pontos, retratados no quadro que se segue.

Tabela 4.16 – Categorização de eventos do sistema de monitorização.

Categorização de eventos	Descrição
Eventos principais (<i>Main events</i>)	<p>Acionado sempre que algum sensor deteta uma ação incidente na estrutura ou uma resposta estrutural acima de valores pré-configurados (<i>thresholds</i>).</p> <p>Duração de registo de eventos: 20 segundos; Taxa de amostragem: 100 Hz.</p>
Eventos automáticos (<i>Automatic events</i>)	<p>Criados para a eventualidade de longos períodos inativos ou sem incidência de qualquer ação significativa, registando dados caraterísticos do comportamento estrutural baseados em vibrações ambiente, sem indução de ações externas.</p> <p>Período entre registos: 30 minutos.</p>

Monitorização a longo prazo (Long term monitoring)	Aquisição pontual de dados, espaçados no tempo, resultando em gráficos de evolução cronológica para ações e resposta estrutural. Período entre registos: 5 minutos.
---	--

No Anexo F é exemplificada a categorização destes eventos, através da exposição dos principais valores adquiridos no primeiro mês completo de monitorização, junho de 2020.

Os dados adquiridos são encaminhados por rede móvel para os servidores da *MIRA Systems*, passando por um processo de descriptação, tratamento e análise para serem dispostos a consulta por parte de qualquer cliente.

É importante referir que o sistema está ligado à rede elétrica da torre, mas devidamente diferenciado através de um disjuntor específico e identificado junto à tomada de alimentação, garantindo o isolamento da restante rede. No caso de qualquer falha elétrica é alimentado por uma bateria com uma autonomia de seis a oito horas, consoante o número de eventos registados e de futuras alterações no sistema de monitorização.

Análise das frequências de vibração

De modo a analisar as medições das acelerações da vibração natural surge a necessidade de distinguir e identificar os picos registados no espectro de frequências. Assim, a *MIRA Systems* desenvolveu um algoritmo de *machine learning* capaz de diferenciar quatro momentos:

- Maquinaria em funcionamento;
- Maquinaria em repouso;
- Ensaios técnicos;
- Incerto.

Posto isto, para a análise espectral de frequências foi utilizado o método da Transformada Rápida de Fourier (FFT), apontada à gama onde se prevê encontrar as frequências naturais da estrutura, dos 0 aos 10 Hz, prosseguido de um algoritmo especializado de *Peak Picking*. Com base neste procedimento, e diferenciando a tipologia de cada evento, foi possível notar a periodicidade com que esses picos ocorrem em determinado evento a analisar com auxílio de histogramas.

Os histogramas exibem o número de ocorrências de cada um dos picos espectrais, permitindo identificar frequências de vibração das máquinas ou frequências de vibração natural da estrutura, segundo ambos os eixos.

A título de exemplo, a figura 4.21 destaca um pico espectral como sendo o mais frequente, entre os 5,15 Hz e 5,20 Hz, que estará relacionado com as frequências de vibração das máquinas em funcionamento, enquanto a presença do pico a rondar os 1,85 Hz aponta para uma das frequências de vibração natural da estrutura, fato que a figura 4.22 confirma.

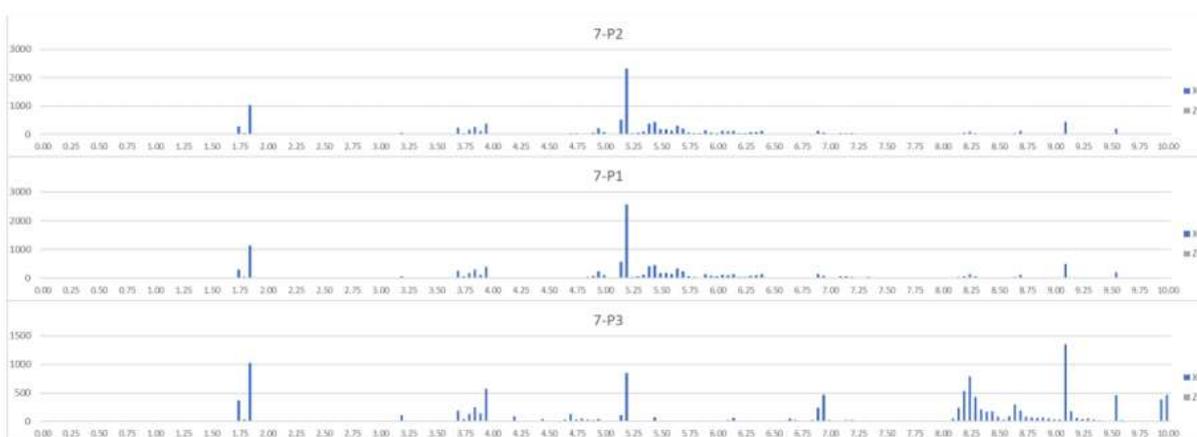


Figura 4.20 – Picos espectrais mais frequentes do Piso 7 eixo xx, em funcionamento. (MIRA Systems, 2021)

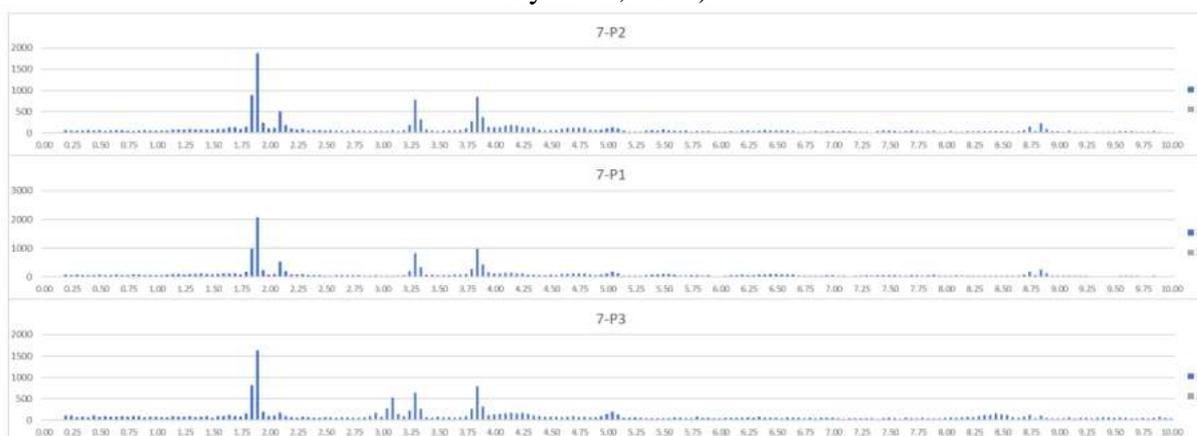


Figura 4.21 – Picos espectrais mais frequentes do Piso 7, eixo xx, em repouso. (MIRA Systems, 2021)

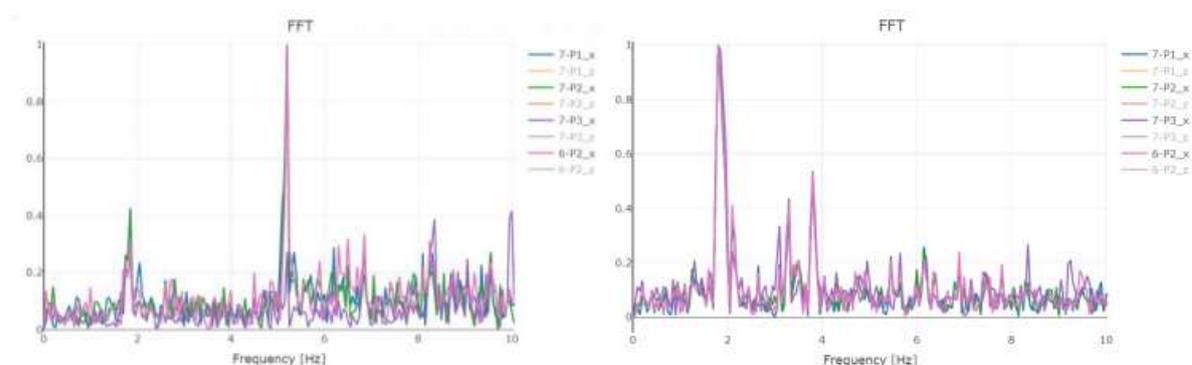


Figura 4.22 – Espectros de frequência, eixo xx, esquerda: em repouso; direita: e funcionamento, adaptado de (MIRA Systems, 2021)

4.2.7 Visualização de dados

A visualização do conteúdo recolhido é passível de consulta a cada requerente dos serviços através de qualquer navegador de internet, com acesso livre a todos os dados recolhidos e análise dos mesmos por parte da entidade gestora.

O conteúdo do visualizador é dividido por três seções principais:

- Entrada e seleção – resume o conteúdo fundamental do projeto, tal como instalações, localização e identificação de cada sensor na estrutura;
- Monitorização – apresenta a monitorização a longo prazo, permitindo a visualização de valores diários num período alargado ou em registos detalhados dentro de cada dia;
- Análise de eventos – exhibe eventos registados, incluindo a evolução temporal e o grau de severidade dos mesmos. Permite filtrar canais e eventos, isolados ou em conjunto, possibilitando uma análise comparativa. Finalmente, inclui a visualização da evolução dos picos de frequência, associados a cada canal, ao longo do tempo.

A par do sistema de visualização acima descrito foi desenvolvido um sistema de alertas, possível de ser enviado por email ou através de mensagem de texto aos utilizadores. Este serviço engloba a emissão de alertas referentes à ação do vento, acelerações e extensões, sendo hierarquizado em três níveis distintos:

- *Low* – primeiro nível de ameaça, funcionando como um pré-alerta;
- *High* – segundo nível de ameaça, referente a valores significativos condizentes com uma ameaça eminente;
- *Extreme* – terceiro nível de ameaça, análogo a valores mais severos e a uma ameaça eventualmente ainda ativa.

Neste caso específico, portanto, a pedido do cliente, foram adicionalmente desenvolvidos alertas com indicadores ambientais, atendendo ao risco de poluição sobre populações vizinhas.

4.2.8 Comparação das frequências naturais de vibração

Após um período de recolha de dados do sistema de monitorização instalado, os mesmos são comparados aos verificados anteriormente na fase de ensaios.

Tabela 4.17 – Comparação das frequências naturais.

Configuração de modo	Frequências (Hz)			Modelo numérico
	ISISE-UC*	MIRA Systems*	MIRA Systems**	
1	1.797	1.800	1.850 ~ 1.900	2.830
2	2.608	2.652	2.600 ~ 2.650	3.430
3	3.145	-	3.300	-

*valores obtidos em junho de 2019 – fase de ensaios.

**valores obtidos de junho de 2020 a fevereiro de 2021.

A configuração do modo 1, indicada na tabela, corresponde a um modo transversal segundo a menor inércia da estrutura – direção xx. A segunda indica um modo transversal segundo a maior inércia – direção yy nas coordenadas ISISE-UC e direção zz nas coordenadas adotadas pela MIRA Systems. Por último, a terceira configuração distingue um segundo modo transversal em na direção xx.

De notar que, relativo aos valores apresentados do modelo numérico ainda é possível apontar uma frequência intermédia, correspondente a uma oscilação lateral-torsional, não relevante neste paralelismo.

Os resultados obtidos pelo sistema de monitorização instalado na estrutura são bastante aproximados dos obtidos nos ensaios. O recurso a novas medições no local por acelerómetros piezoelétricos, por certo, permitiria validar o correto funcionamento de toda a instalação implementada.

Em (MIRA Systems, 2021), tal variação é justificada com as intervenções estruturais ocorridas, em particular a implementação de uma nova parede de painel sandwich na fachada virada a Norte, na direção do eixo xx, conferindo um aumento de rigidez na mesma direção e conseqüente crescente das frequências naturais de vibração. Por outro lado, o modelo numérico carece de alguma calibração, de modo a aproximar valores.

A contínua receção de dados continuará nos próximos meses, sendo prevista uma análise completa aos atuais dados do sistema em funcionamento baseada em informação proveniente das séries temporais das acelerações, através do *software* ARTeMIS, com vista a obter as

principais características modais. Não obstante ao crescente conhecimento do comportamento estrutural, é importante detalhar e entender a interferência das diferentes ações ambientais nas frequências de vibração sempre com foco na previsão da integridade e da potencial degradação da estrutura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma sucinta, o principal objetivo de validação do funcionamento de um sistema de monitorização em desenvolvimento pela empresa VESAM foi concluído com sucesso. Da comparação dos resultados obtidos por este sistema com os obtidos pelo ISISE-UC pode concluir-se do bom funcionamento do sistema em apreço tanto em ambiente laboratorial com em situação de aplicação real. Os bons resultados foram confirmados após um período de cerca de 7 meses de monitorização contínua de uma estrutura metálica complexa usando o equipamento instalado pela empresa.

Ao longo dos vários testes ao sistema em período prévio à instalação final, desde os casos de estudo à estrutura alvo, os resultados comparativos permite validar o correto funcionamento do sistema de monitorização. Contudo, a calibração de modelos numéricos em estruturas à escala real necessita de informação sobre elementos estruturais e não estruturais (massa e rigidez) que, por vezes não é possível obter de forma fiável. No caso de estudo apresentado, a existência de elementos não estruturais com massa e rigidez significativas dificultou uma boa modelação numérica e respetiva calibração experimental.

A interferência da temperatura nas frequências de vibração, e a forma de extrair a mesma também carece de maior conhecimento. No entanto, apenas é passível de qualquer conclusão com o crescente acumular de registos do comportamento estrutural da torre, após vários meses de monitorização.

O maior desafio futuro deste aplicativo tende a ser a filtragem dos dados essenciais, isto é, saber refletir e avaliar de que forma a diversidade e quantidade de dados apresentados pelo sistema pode ser usado numa eficaz compreensão do comportamento estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agostinho, S. (2012). *Inspeção e Monitorização de Estruturas em Engenharia Civil - Utilização de UAV na Inspeção e Monitorização*. Universidade da Madeira: Dissertação para obtenção do grau de Mestre de Engenharia Civil.
- Aguiar, D. (2016). *Instrumentação para Monitorização de Estruturas de Engenharia Civil*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na especialidade de Mecânica Estrutural.
- ALTHEN. (2021). *Althen Sensors & Controls*. Obtido de <https://www.althensensors.com/sensors/acceleration-sensors/automotive-testing-accelerometers/13907/asc-74c1-piezoresistive-accelerometer/>
- Antunes, P. (2011). *Sensores ópticos para monitorização dinâmica de estruturas*. Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Aveiro: Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Física.
- Barbosa, C. (03 de janeiro de 2018). Otimização de estruturas com sistemas de monitorização contínua. *Construção Magazine*.
- Bernardino, A. (2014). *Desenvolvimento de um Sistema de Monitorização Multicanal de Temperatura para a Experiência de Lux-Zeplin*. Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra: Dissertação para a obtenção do grau de Mestre de Engenharia Física, na especialidade de Instrumentação.
- Beskhyroun, S. et al. (23 de Maio de 2011). New methodology for the application of vibration-base damage detection techniques. *Wiley Online Library*.
- Braz, J. (2015). *Conceção e Validação de uma Mesa de Vibração para a Calibração de Acelerómetros*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa: Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
- Brincker, R., & Ventura, C. (2015). *Introduction to Operational Modal Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Brincker, R., Du, G., Amador, S., & Katsanos, E. (s.d.). Future aspects of SHM - OMA based SHM of course.
- Brownjohn, J. M. (13 de dezembro de 2006). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield*, pp. 589-622.
- Carapito, P. (2015). *Procedimento Específico de Ensaio - ENS20190: Vibração Dinâmica em Consola*.
- Cavadas, F. (2008). *Monitorização e Análise do Comportamento de Pontes Metálicas Antigas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na especialidade de Estruturas.
- Conceição, B. (2019). *MIRA Systems - ENS20190: Initial Results*.

-
- Cura, H. (2013). *MonStruct - Sistema de monitorização de estruturas civis*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra: Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores.
- Dias, R. (2015). *Transformador Diferencial de Variação Linear - Condicionamento de Sinal e Desmodulação Síncrona*. Departamento de Engenharia Electrotécnica Energia e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica - ramo de Automação e Electrónica Industrial.
- Farrar, C. et al. (2006). An Introduction to Structural Health Monitoring. *Los Alamos National Laboratory Los Alamos, New Mexico, USA & Dynamic Research Group, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, UK*, pp. 1-2.
- Félix, C. (2002). *Monitorização do Comportamento de Estruturas em Betão*. Instituto Politécnico do Porto - Instituto Superior de Engenharia: Dissertação para concurso de vaga a professor-coordenador do quadro do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na área de Engenharia Civil, na área de Estruturas.
- Félix, C. et al. (11 de dezembro de 2017). Monitorização estrutural e da durabilidade na observação e diagnóstico de obras de arte. *Construção Magazine*.
- Gillich et al. (2017). Assessing Corrosion Damage from the Natural Frequency Changes. *RJAV vol XIV issue 2/2017*.
- HBM. (27 de Abril de 2021). *HBM an HBK company*. Obtido de <https://www.hbm.com/pt/4599/new-light-optical-fiber-sensors/>
- Júlio, E. (13 de março de 2020). Monitorização e Preservação. *Construção Magazine*, p. edição nº 95.
- Lopes, J. (2012). *Estudo de métodos de calibração de sensores capacitivos*. Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações.
- Machado, R. (2018). *Identificação por Análise Modal Operacional - Algoritmo de Abordagem Clássica no Domínio da Frequência*. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP): Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- Magalhães, F. (2010). *Operational Modal Analysis for Testing and Monitoring of Bridges and Special Structures*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP): Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- Manh La et al. (2016). Automated Robotic Monitoring and Inspection of Steel Structures and Bridges. *Cambridge University Press*.
- Marques et al. (2014). 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. *Caraterização do Comportamento Dinâmico de Edifícios através de Análise Modal Experimental*.
-

-
- MIRA Systems. (2019). *MIRA Merge - Ambient Vibration*. Zona Industrial de Cantanhede: MIRA Systems.
- MIRA Systems. (2021). *Monitorização SONAE ARAUCO, O.H.: MS_005 - Relatório de Situação*. Zona Industrial de Cantanhede: MIRA Systems.
- Mitutoyo. (2021). Obtido de [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/1306242215145/Digital%20Solar%20Indicator%20ID-SS/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/543-500B/index.xhtml;jsessionid=6FC44A1A7AB7BE58CAE92415A3EF7498](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/1306242215145/Digital%20Solar%20Indicator%20ID-SS/$catalogue/mitutoyoData/PR/543-500B/index.xhtml;jsessionid=6FC44A1A7AB7BE58CAE92415A3EF7498)
- Mitutoyo. (2021). Obtido de [https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/01.03.03A/Digital%20ABS%20Caliper%20CoolantProof%20IP67/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/500-706-20/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/pt/mitutoyo/01.03.03A/Digital%20ABS%20Caliper%20CoolantProof%20IP67/$catalogue/mitutoyoData/PR/500-706-20/index.xhtml)
- PCB Piezotronics. (2021). Obtido de <https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>
- Peres, J. (2019). Ensaio laboratoriais: VESAM/ISISE-UC.
- Rainieri, C; Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications*. Springer .
- Rebelo, C. A. (2016). *Dinâmica e Dimensionamento Sísmico*.
- Rebelo, C. et al. (14 de Maio de 2016). VESAM - Steel Structures Total Integration System (SIGMA).
- Ribeiro, D. (2012). *Efeitos Dinâmicos Induzidos por Tráfego em Pontes Ferroviárias: Modelação Numérica, Calibração e Validação Experimental*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil.
- Roque, J. A. et al. (2007). Avaliação do Comportamento Sísmico da Igreja de Santa Maria de Belém. *7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica*.
- Sabato et al. (Novembro de 2016). Wireless MEMS-Based Accelerometer Sensor Boards for Structural Vibration Monitoring: A Review. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 17, nº 2.
- Santos, F. (15 de janeiro de 2018). A Estrutura Metálica em Portugal no ano 2017. E em 2027? *Construção Magazine*.
- Santos, J. et al. (29 de Fevereiro de 2020). Monitorização Estrutural da Ponte 25 de Abril. *Construção Magazine*.
- Santos, L. (2014). Monitoramento e ensaios de pontes. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas*.
- Silva, L. (2015). *Monitorização de Estruturas com recurso a Radar Interferométrico*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Estruturas.
- Silva, V. (2016). *Estudo e Controlo de Alternativas de Reforço Estrutural da Ponte de Arcos da Portela*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra:
-

- Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Mecânica Estrutural.
- Simões, R. A. (2014). *Manuel de Dimensionamento de Estruturas Metálicas, 3ª Edição*. CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.
- Solutions, N. (15 de Jul de 2020). *Measuring Vibration with Accelerometers*. Obtido de NI Solutions: <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>
- ST life.augmented. (s.d.). Obtido de https://www.st.com/content/st_com/en.html
- TE Connectivity. (2021). *RTD Platinum Thin Film Elements, PTF Family, TE Connectivity*. Obtido de [te.com](https://www.te.com): <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-RTD0046.html?tcpns=CAT-RTD0046%7CNB-PTCO-002%7CNB-PTCO-006%7CNB-PTCO-011%7CNB-PTCO-012%7CNB-PTCO-024%7CNB-PTCO-029%7CNB-PTCO-032%7CNB-PTCO-035%7CNB-PTCO-053%7CNB-PTCO-101%7CNB-PTCO-126%7CNB-PTCO-157%7CNB-PTCO-160%7CNB>
- TE Connectivity. (2021). *TE Connectivity: Connectores & Sensors for Harsh Environments*. Obtido de [te.com](https://www.te.com): <https://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/understanding-rtds.html>
- Vallen Systeme. (27 de Abril de 2021). *vallen.de*. Obtido de <https://www.vallen.de/applications/structural-health-monitoring-shm/>
- Varum, H. et al. (Junho de 2008). Estratégias de monitorização de monumentos: Caso de estudo - Arco Cruzeiro da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro. *CINPAR 2008, 4th International Conference on Structural Defects and Repair*.

ANEXOS

Anexo A – Ficha Técnica STEVAL BFA001V1B e IDP004V1



STEVAL-BFA001V1B

Data brief

Predictive maintenance kit with sensors and IO-Link capability



Features

- Compact solution for condition monitoring and predictive maintenance based on 3D digital accelerometer, environmental and acoustic MEMS sensors
- Main supply voltage: 18 V - 32 V
- Main components:
 - 32-bit ARM® Cortex®-M4 core for signal processing and analysis (STM32F469AI)
 - INEMO 6DoF (ISM330DLC)
 - Absolute digital pressure sensor (LPS22HB)
 - Relative humidity and temperature sensors (HTS221)
 - Digital microphone sensors (MP34DT05-A)
 - IO-Link PHY device (L6362A)
 - EEPROM (M95M01-DF) for data storage
 - Step-down switching regulator and LDO regulator (L6984 and LDK220)
- Complete set of firmware demo examples based on 3D accelerometer library with advanced frequency and time domain signal processing for predictive maintenance, including:
 - Programmable FFT size (512, 1024, 2048)
 - Programmable FFT averaging
 - Programmable overlapping
 - Programmable windowing (Flat Top, Hanning, Hamming)
 - Speed RMS moving average, acceleration max. peak
 - Programmable threshold for warning and alarm conditions in spectral band
- Microphone algorithms for:
 - PDM to PCM
 - Sound pressure
 - Audio FFT
- IO-Link PHY using the L6362A Device transceiver for data communication with host unit
- M12 industrial connector
- SWD connector for debugging and programming capability
- Reset button
- Expansion connector with GPIO, ADC, I2C bus
- Designed to meet IEC industrial standard requirements
- WEEE compliant
- RoHS compliant

Product summary
Capacitive digital sensor for relative humidity and temperature HTS221
INEMO 6DoF inertial module for Industrial Applications. Ultra-low power and high accuracy ISM330DLC
Piezoresistive absolute pressure sensor, 260-1280 hPa, digital output barometer, I2C, SPI LP25HB
1-Mbit SPI bus EEPROM with high-speed clock M95M01-DF
MEMS audio sensor omnidirectional digital microphone, 64 dB SNR, -26 dBFS sensitivity, top-port, 122.5 dB SPL AOP MP34DT05-A
High-performance advanced line, ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU, 2 Mbytes Flash, 384+4 kB of RAM, DMA controller, up to 17 timers STM32F469AI
IO-Link communication transceiver device L6362A

Description

The STEVAL-BFA001V1B is an industrial reference design kit designed for condition monitoring (CM) and predictive maintenance (PdM).

The hardware development kit consists of an industrial sensor board (STEVAL-IDP005V1), an adapter for the ST-LINK/V2-1 programming and debugging tool



STEVAL-BFA001V1B

(STEVAL-UKI001V1), a 0.050" 10-pin flat cable, a 4-pole cable mount connector plug with male contacts and an M12 female connector with a 2 m cable.

The firmware package includes dedicated algorithms for advanced time and frequency domain signal processing and analysis of the 3D digital accelerometer with 3 kHz flat bandwidth. The package includes drivers for pressure, relative humidity and temperature sensor monitoring. Audio algorithms for acoustic emission (AE) are also part of the package.

The firmware runs on the high performance STM32F469AI, ARM® Cortex®-M4, 32-bit microcontroller and the sensor data analysis results are sent via wired connectivity based on IO-Link device transceiver (IO-Link stack protocol not included).

The STEVAL-BFA001V1B reference design is suitable for monitoring motors, pumps and fans, and can accelerate the development of predictive maintenance solutions.

The package also allows connection with the STEVAL-IDP004V1 IO-Link master capable, multi-port evaluation board; a PC GUI included in the package displays the algorithms output and sensor data. The data can also be displayed on a PC using a common terminal emulator by simply connecting the STEVAL-IDP005V1 to a PC through the STEVAL-UKI001V1 adapter and ST-LINK/V2-1 included on any STM32 Nucleo-64 development board.

The package includes an industrial M12 cable for power or connection with a master port. The connection is managed using a standard multipolar cable with one wire used for IO-Link data, one for the L+ line (positive supply voltage pole) and one for the L- line (negative supply voltage pole).

The layout is designed to meet IEC61000-4-2/4 and EN60947 requirements for industrial applications.

The STEVAL-IDP005V1 is specifically designed with dimensions (50mm x 9mm x 9mm) that reflect real industrial applications and needs.

The firmware is freely available on [STSW-BFA001V1](#).



1 Schematic diagram

Figure 1. Schematic - STEVAL-UKI001V1

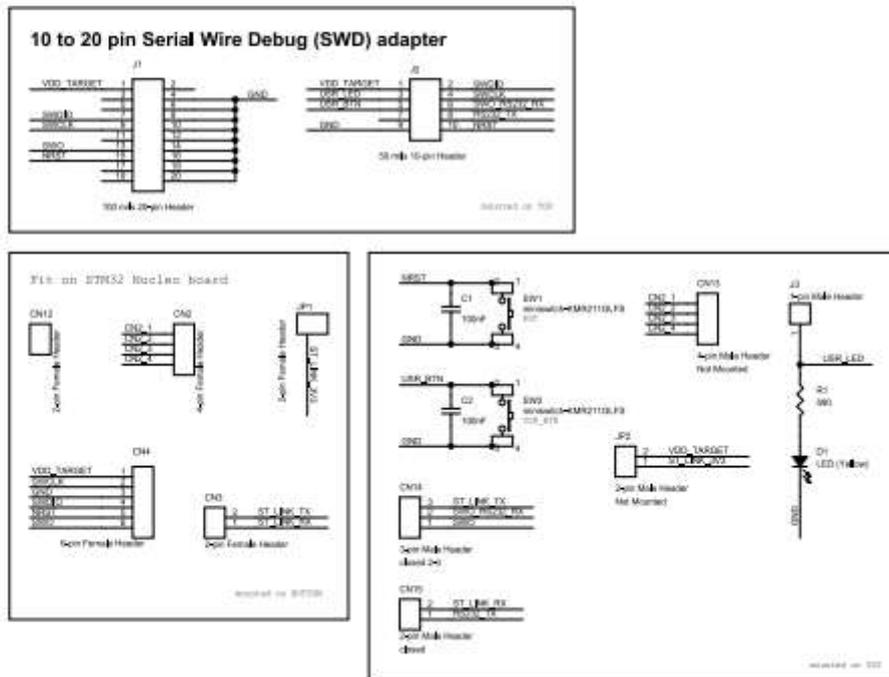


Figure 3. Schematic - STEVAL-IDP005V1 (2 of 7)

IO-Link

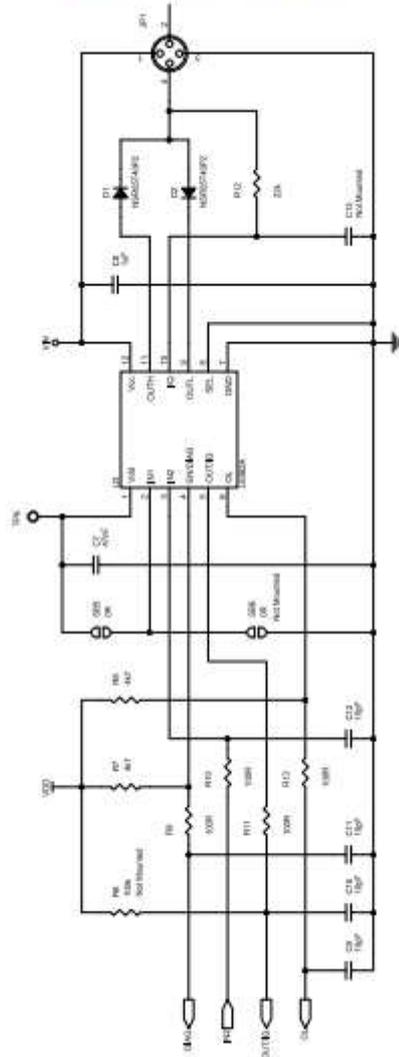


Figure 4. Schematic - STEVAL-IDP005V1 (3 of 7)

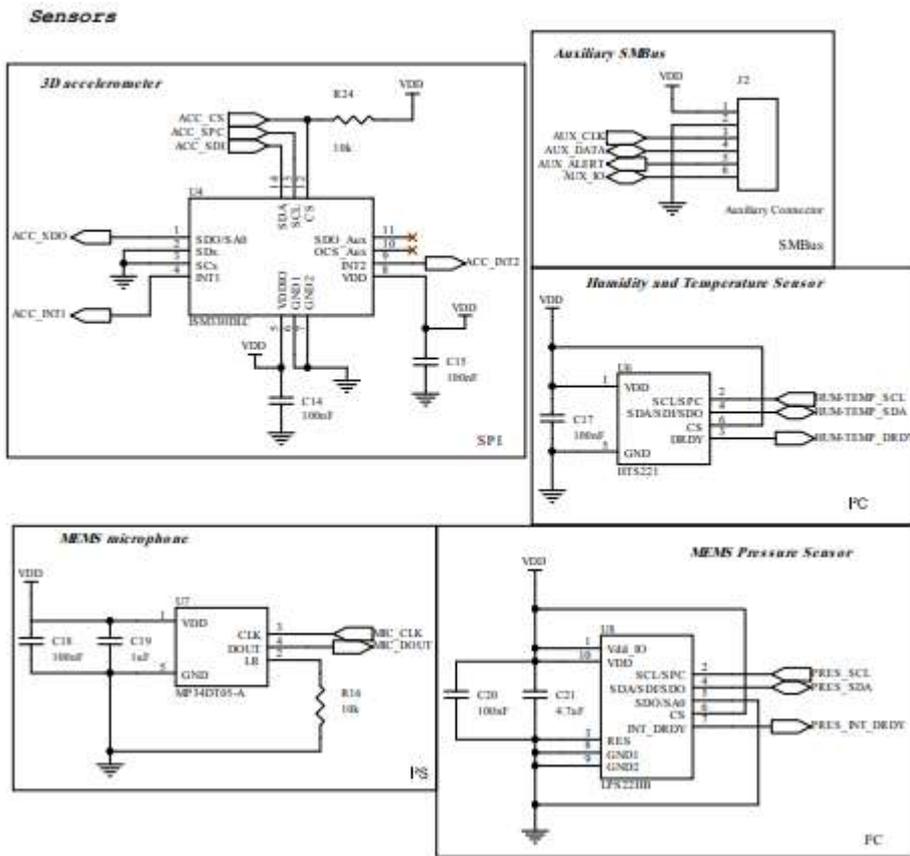


Figure 5. Schematic - STEVAL-IDP005V1 (4 of 7)

EEPROM

1-Mbit SPI bus EEPROM with high-speed clock

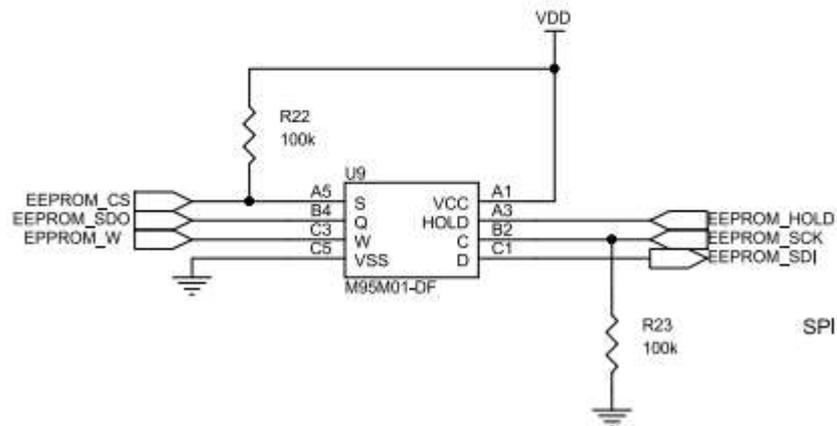


Figure 6. Schematic - STEVAL-IDP005V1 (5 of 7)

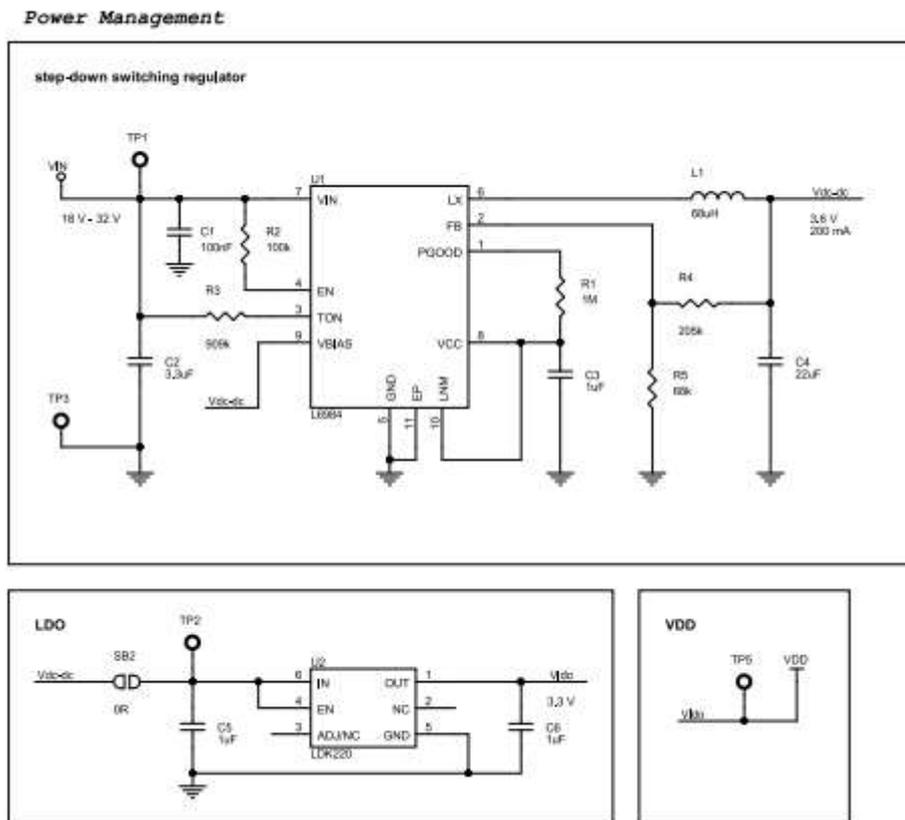


Figure 7 Schematic - STEVAL-IDP005V1 (6 of 7)

Microcontroller (Part A)

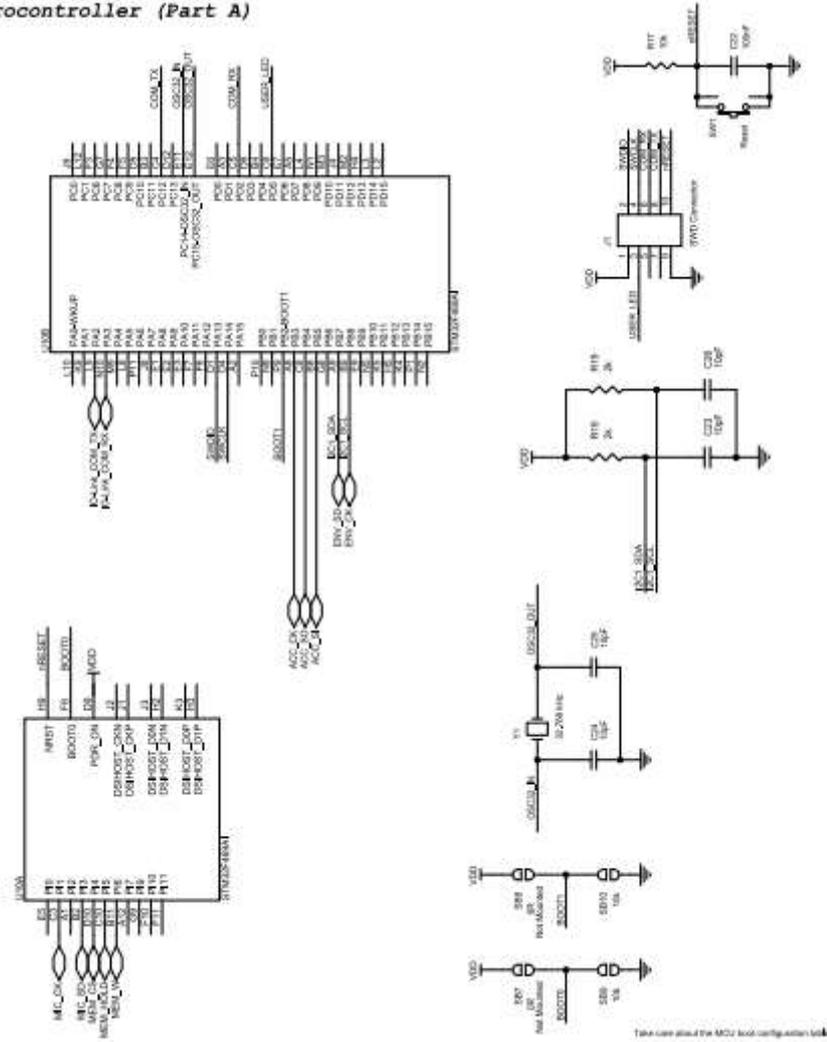
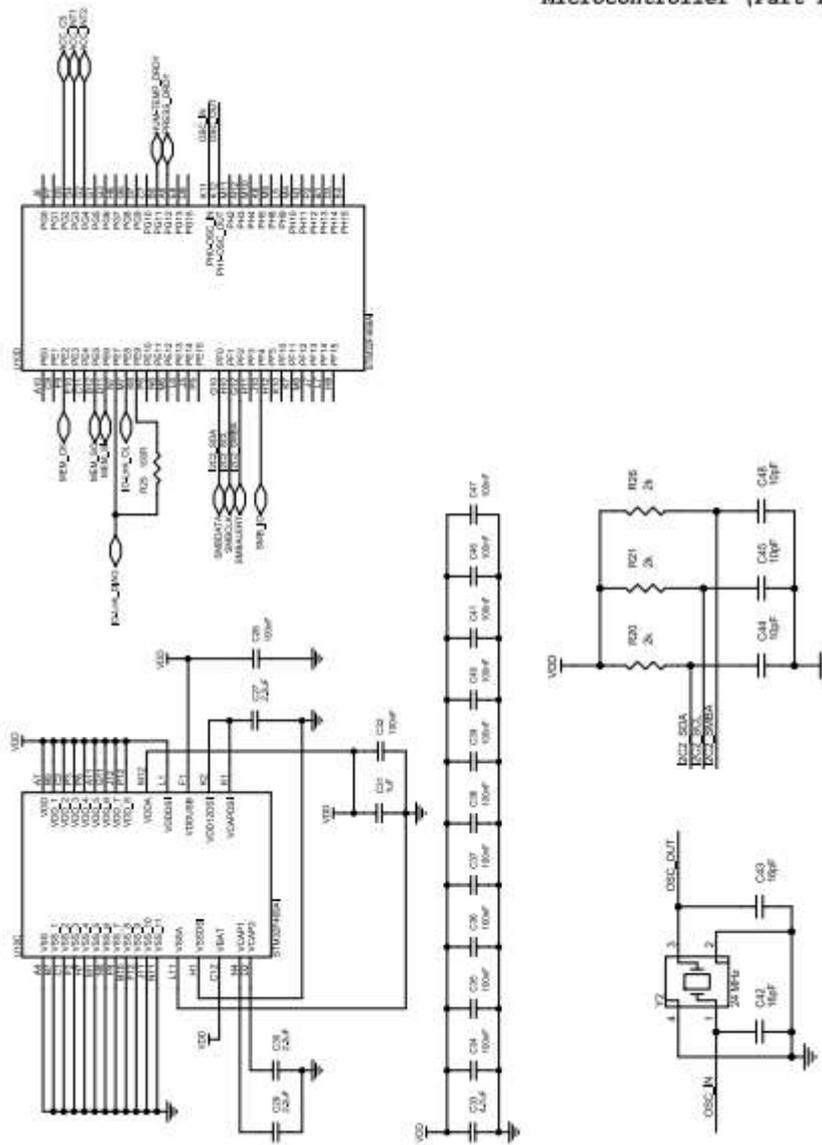


Figure 8. Schematic - STEVAL-IDP005V1 (7 of 7)

Microcontroller (Part B)

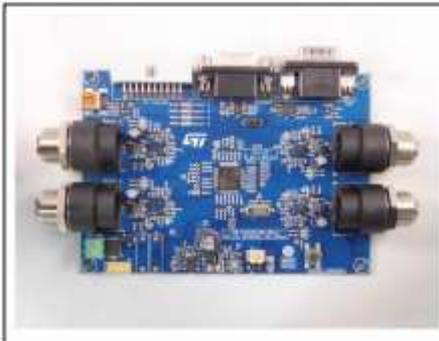




STEVAL-IDP004V1

IO-Link master multi-port evaluation board based on L6360

Data brief



Description

The STEVAL-IDP004V1 evaluation board with STM32 microcontroller has four separate L6360 ICs.

Communication with the ICs is via I²C in master mode and is managed by the STM32F205RBT MCU; each L6360 has its own address and shares the bus with the other devices.

The STEVAL-IDP004V1 is developed to create a multi-port master d based on serial asynchronous communication to support the IO-Link protocol. Each node is equipped with an industrial M12 connector (as required by the standard) for connection with a single slave node using a cable 20 meter long; the wire is a normal three-pole: one for the IO-Link bus, one for the L+ line (positive supply voltage pole) and one for the L- line (negative supply voltage pole).

Beyond the IO-Link connection, the board includes RS485 bus, CAN bus and USB hardware interfaces.

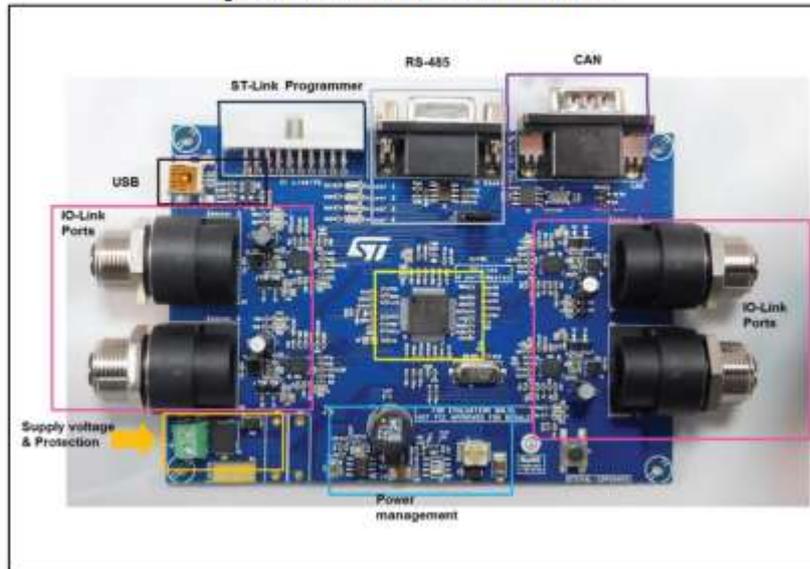
The layout is designed to meet the requirements for IEC61000-4-2/4/5 for industrial segment.

Features

- Main supply voltage 32 V maximum
- 4 L6360 IO-Link master device
- RS-485 serial interface
- CAN serial interface
- USB interface
- DC/DC converter
- On-board reverse polarity protection
- Designed to meet IEC requirement for industrial standards
- RoHS compliant

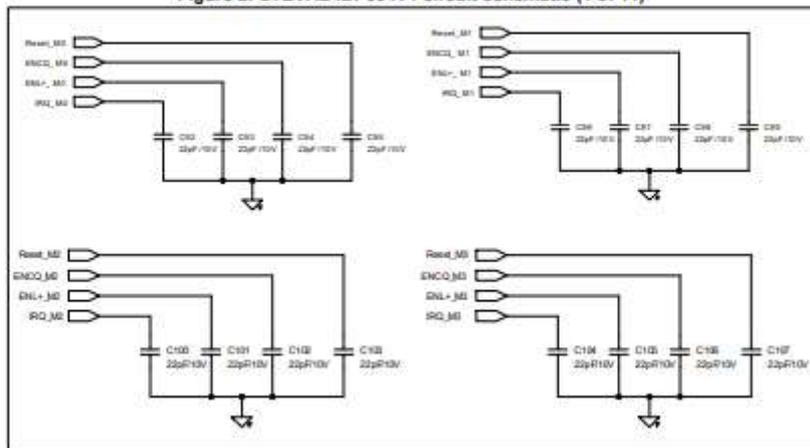
1 Block identification

Figure 1: STEVAL-IDP004V1 block identification



2 Schematic diagrams

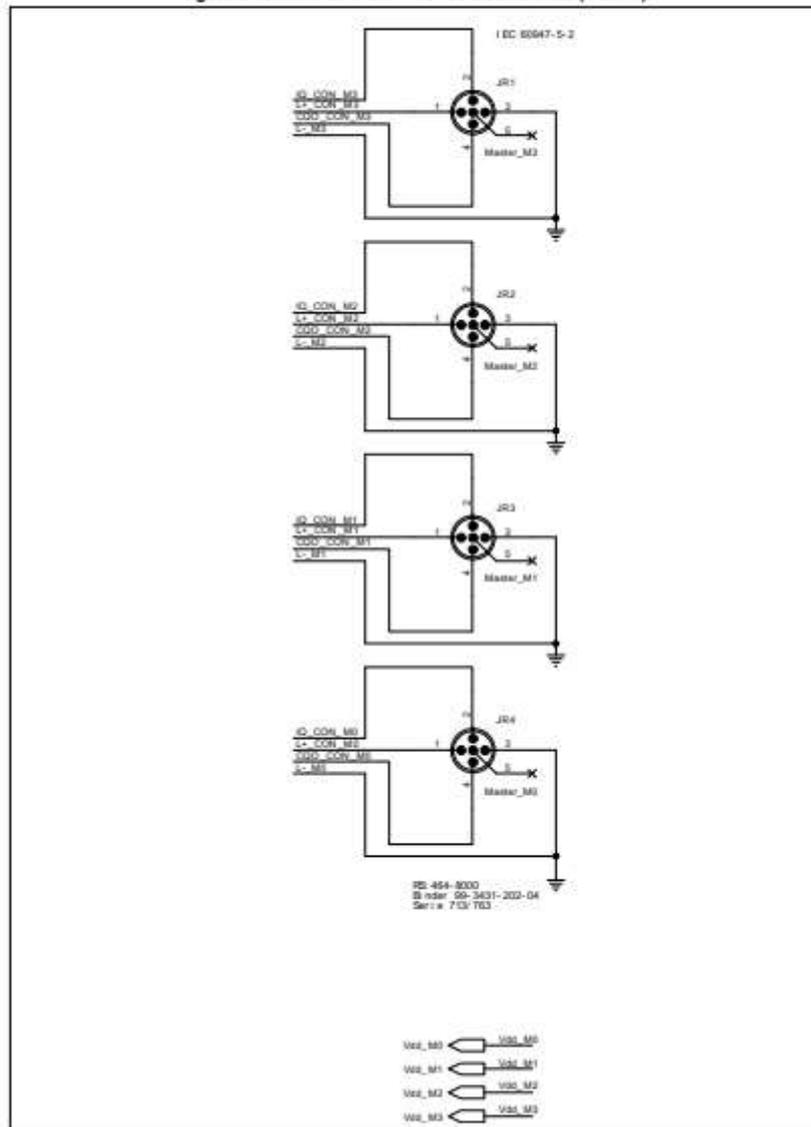
Figure 2: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (1 of 11)



Schematic diagrams

STEVAL-IDP004V1

Figure 3: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (2 of 11)



STEVAL-IDP004V1

Schematic diagrams

Figure 4: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (3 of 11)

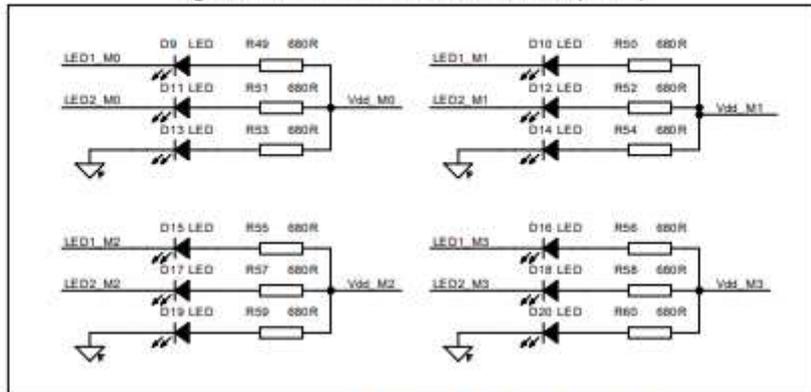
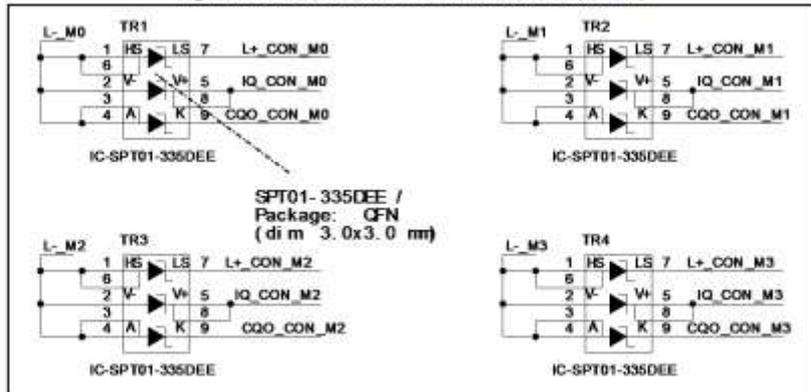


Figure 5: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (4 of 11)



Schematic diagrams

STEVAL-IDP004V1

Figure 6: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (5 of 11)

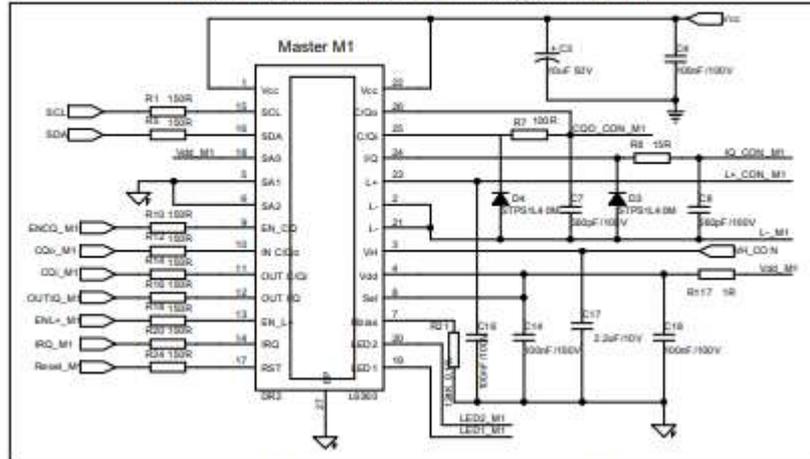
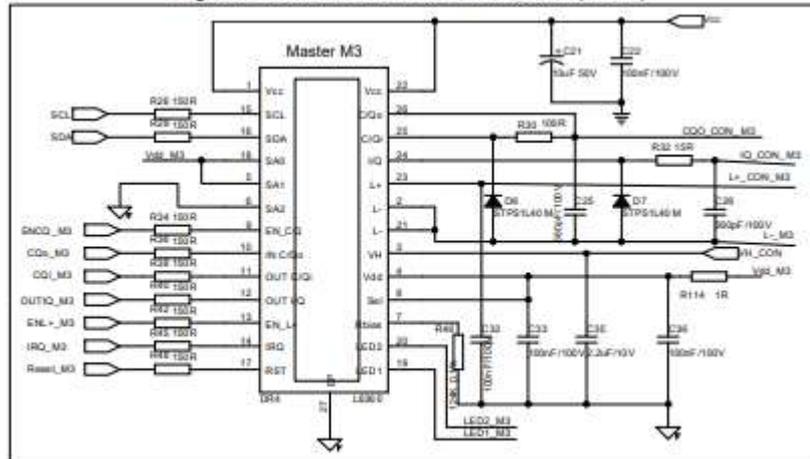


Figure 7: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (6 of 11)



STEVAL-IDP004V1

Schematic diagrams

Figure 8: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (7 of 11)

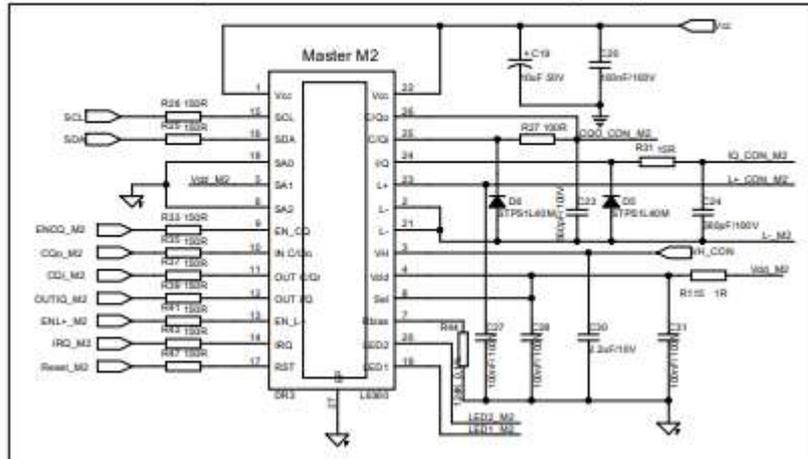
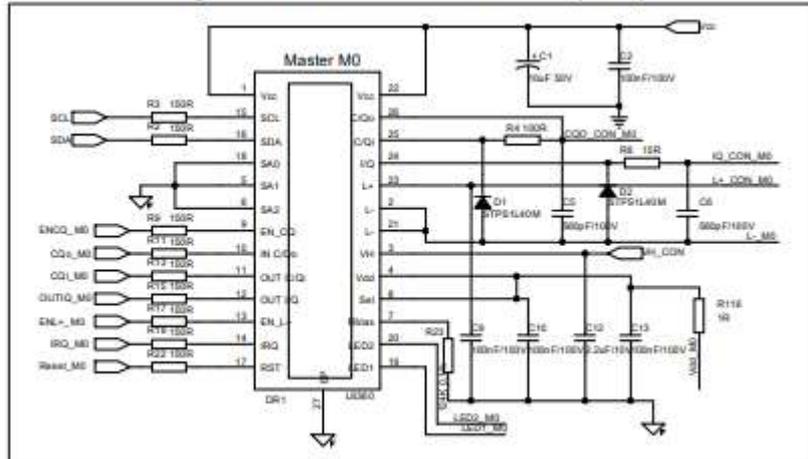


Figure 9: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (8 of 11)



STEVAL-IDP004V1

Schematic diagrams

Figure 8: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (7 of 11)

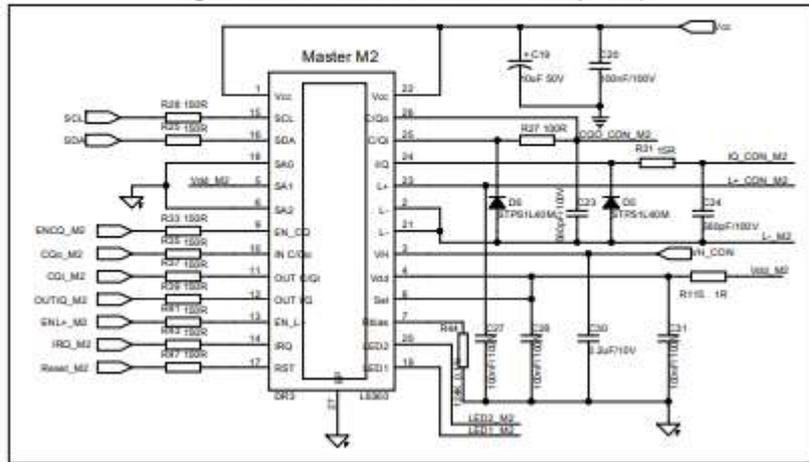


Figure 9: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (8 of 11)

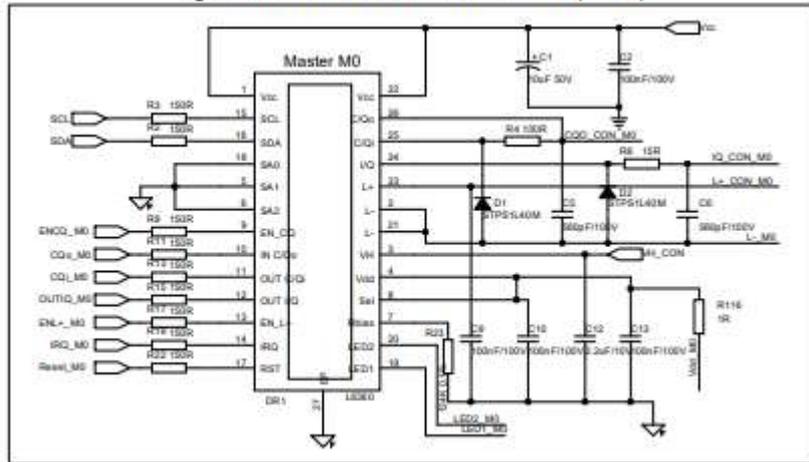
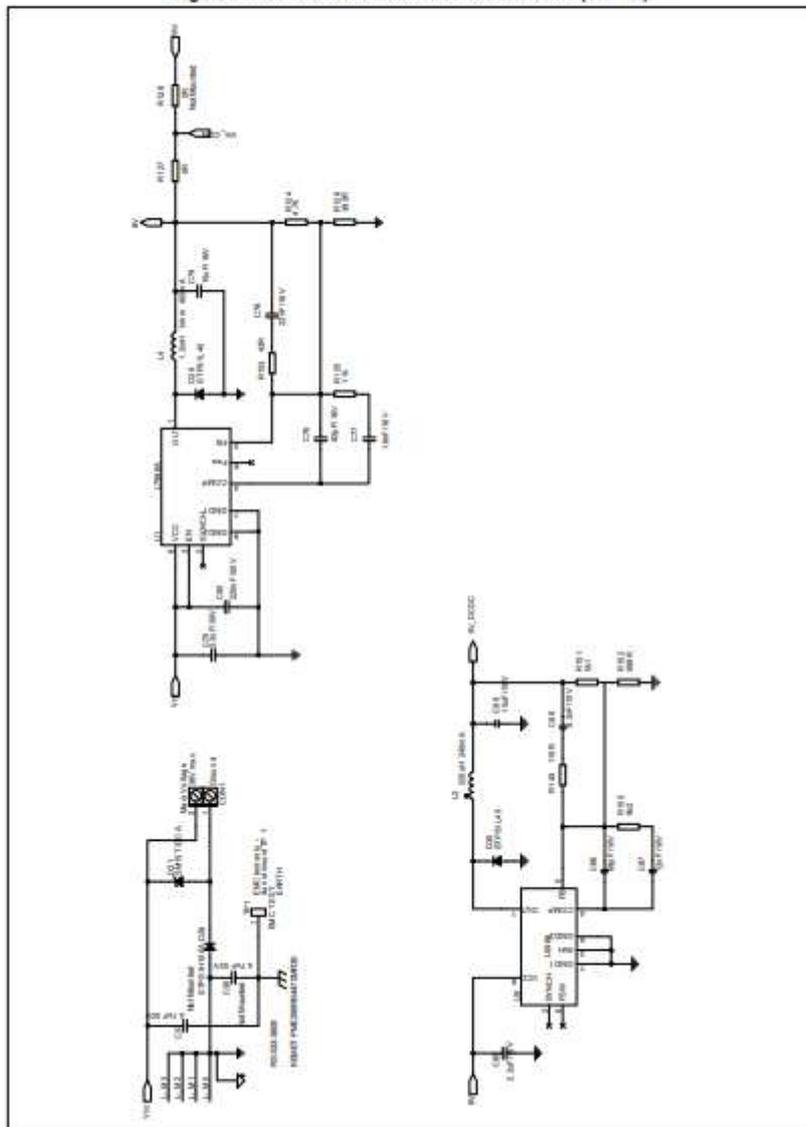
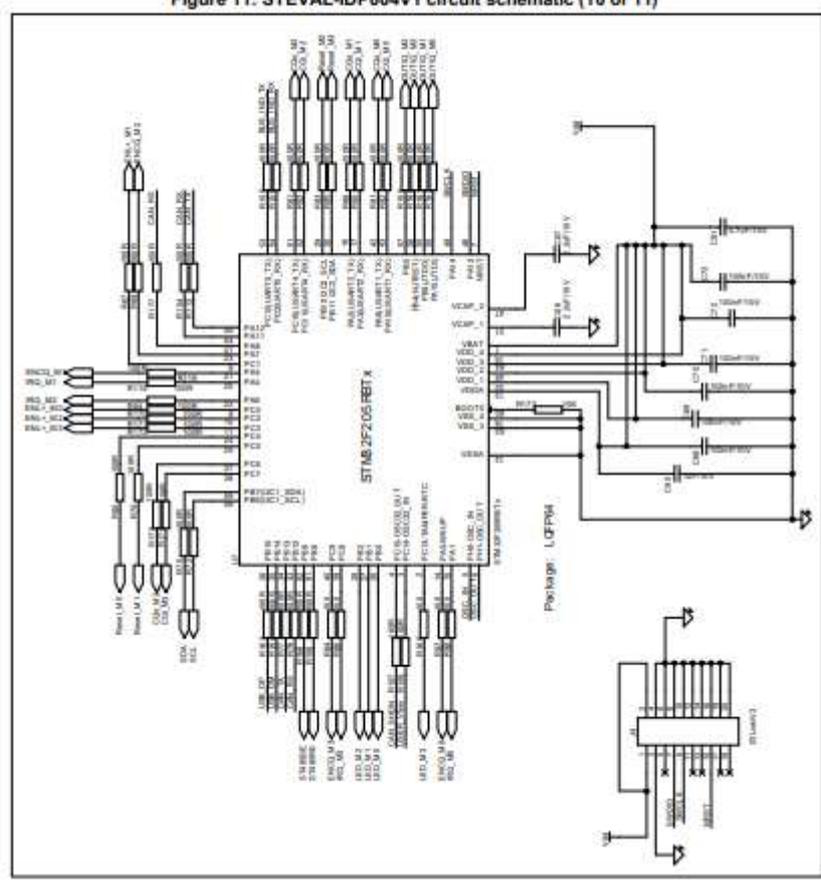


Figure 10: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (9 of 11)



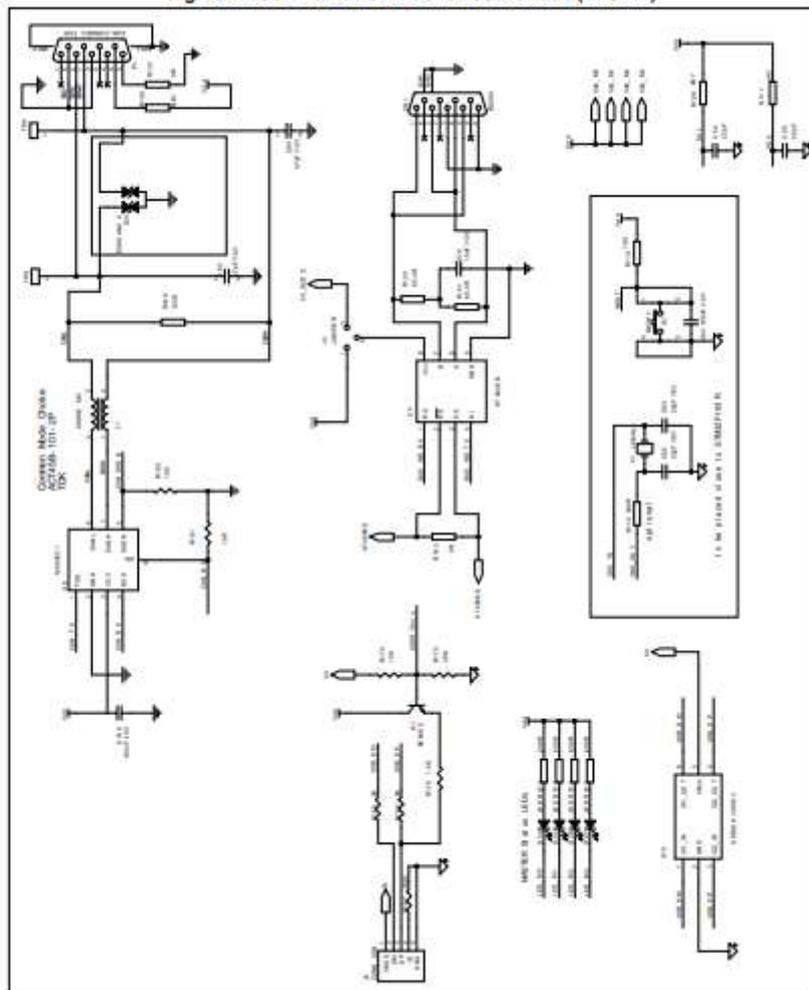
STEVAL-IDP004V1 Schematic diagrams Figure 11: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (10 of 11)



Schematic diagrams

STEVAL-IDP004V1

Figure 12: STEVAL-IDP004V1 circuit schematic (11 of 11)



Anexo B – Ensaio de testes de validação do equipamento de medição

SETUP 1: 17-04-2019 11:00:32

Ambient vibration; Total duration of time series: 2000 sec; Dt= 0,0005 sec
 Spectrum frequency range: 1kHz; Df=0,01 Hz
 Spectrum averages: 20

SETUP 2: 17-04-2019 11:54:53

Ambient vibration; Total duration of time series: 2000 sec; Dt= 0,0005 sec
 Spectrum frequency range: 1kHz; Df=0,01 Hz
 Spectrum averages: 20

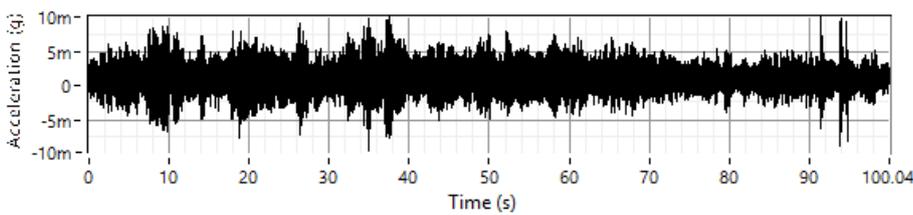
SETUP 3: 17-04-2019 12:35:11

Forced vibration; Total duration of time series: 40 sec; Dt= 0,0005 sec
 Spectrum frequency range: 1kHz; Df=0,025 Hz
 Spectrum averages: 1

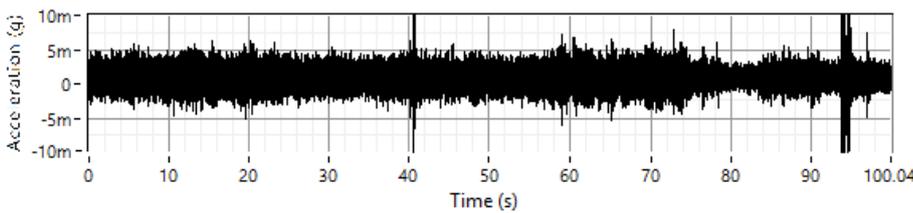
SETUP 3-a: 17-04-2019 12:35:11

Forced vibration; Total duration of time series: 40 sec; Dt= 0,0005 sec
 Spectrum frequency range: 1kHz; Df=0,025 Hz
 Spectrum averages: 1 Zoom: 26 – 30 segundos

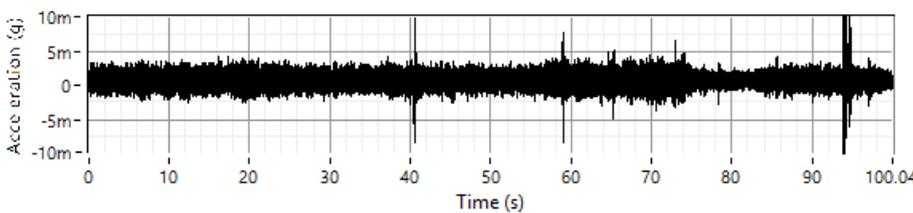
Configuração 1:



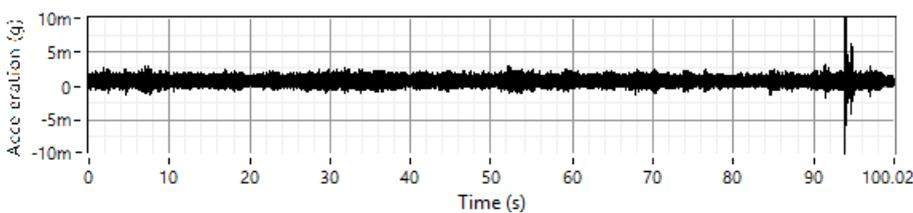
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:00:32
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai0 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



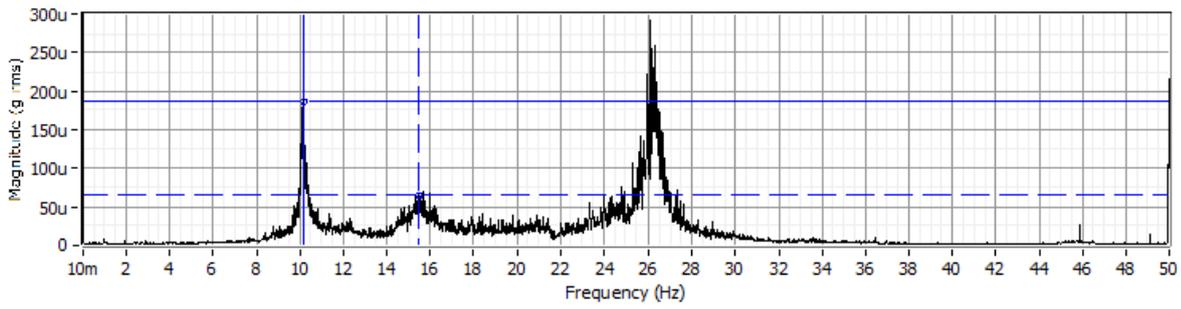
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:00:32
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai1 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



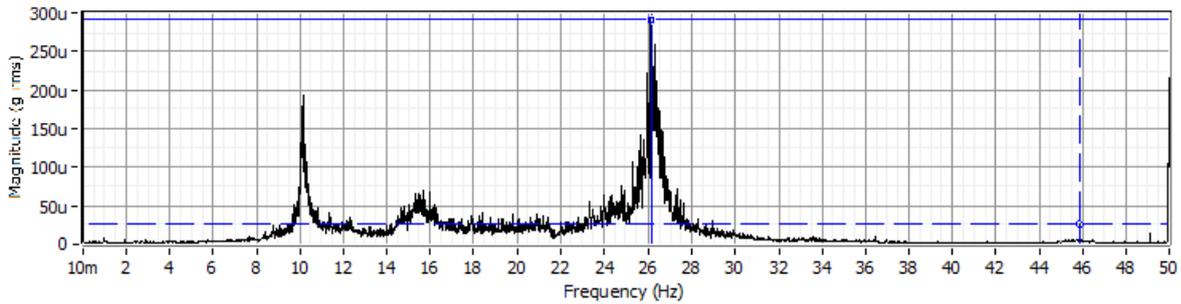
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:00:32
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai2 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



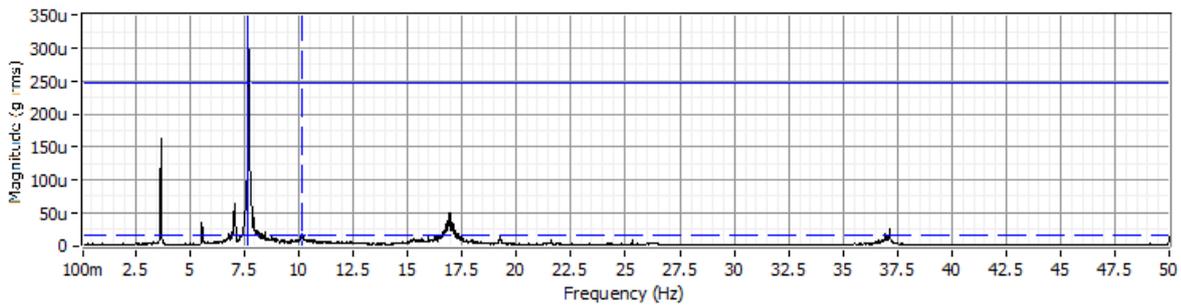
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:00:32
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai3 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



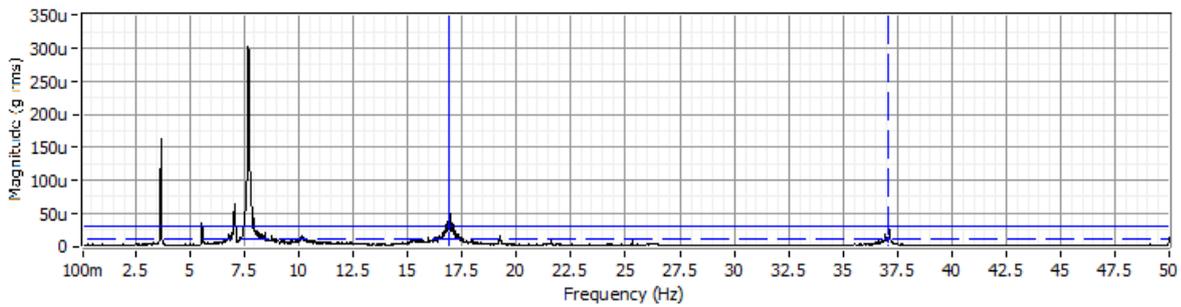
spectrum - Dev2_ai0	x1: 10.17	y1: 187.4u	Dx: 5.3	1/Dx: 188.7m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 15.47	y2: 64.69u	Dy: -122.7u	Dy/Dx: -23.16u



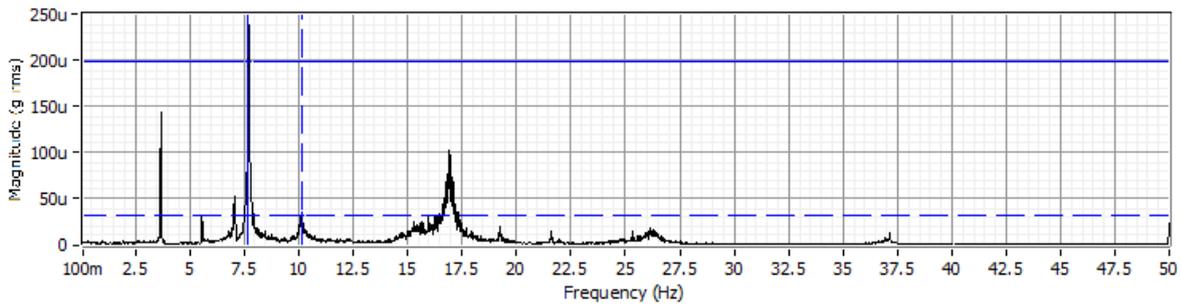
spectrum - Dev2_ai0	x1: 26.14	y1: 292.1u	Dx: 19.77	1/Dx: 50.58m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 45.91	y2: 25.45u	Dy: -266.6u	Dy/Dx: -13.49u



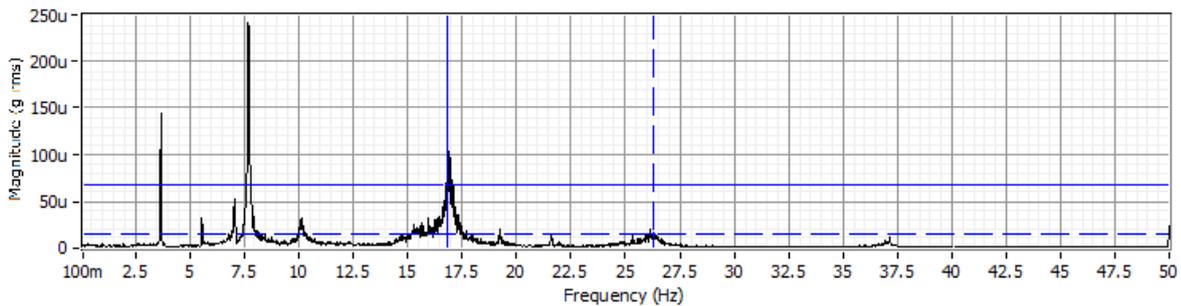
spectrum - Dev2_ai1	x1: 7.67	y1: 246.4u	Dx: 2.5	1/Dx: 400m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 10.17	y2: 14.92u	Dy: -231.5u	Dy/Dx: -92.58u



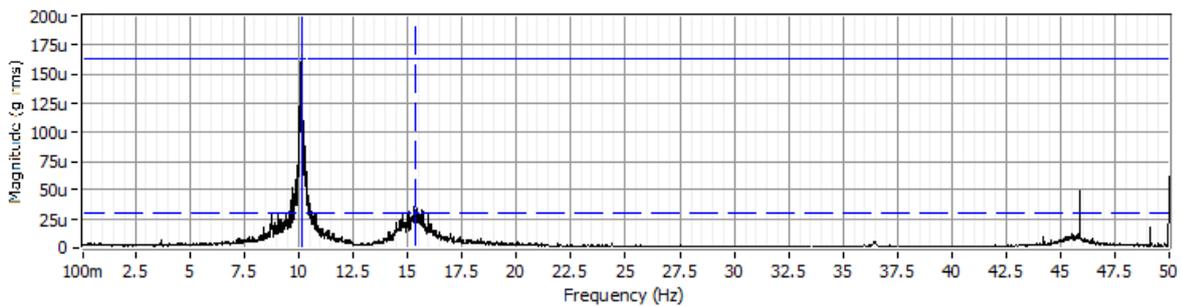
spectrum - Dev2_ai1	x1: 16.93	y1: 30.18u	Dx: 20.14	1/Dx: 49.65m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 37.07	y2: 8.989u	Dy: -21.19u	Dy/Dx: -1.052u



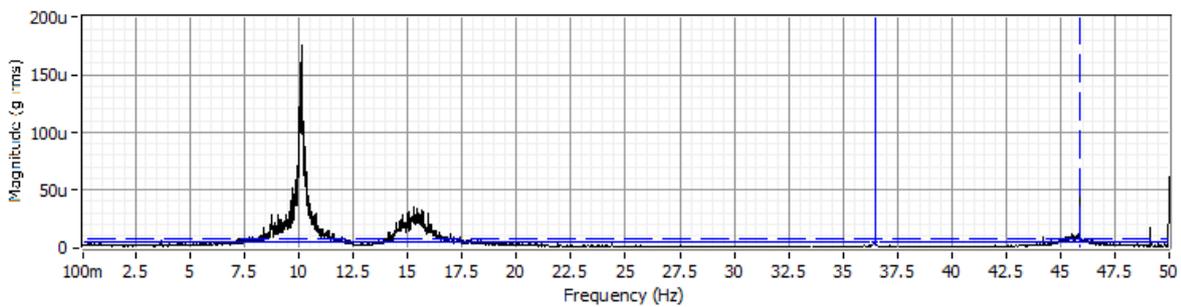
spectrum - Dev2_ai2	x1: 7.67	y1: 197.7u	Dx: 2.5	1/Dx: 400m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 10.17	y2: 32.01u	Dy: -165.7u	Dy/Dx: -66.28u



spectrum - Dev2_ai2	x1: 16.86	y1: 67.03u	Dx: 9.4	1/Dx: 106.4m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 26.26	y2: 14.02u	Dy: -53u	Dy/Dx: -5.639u

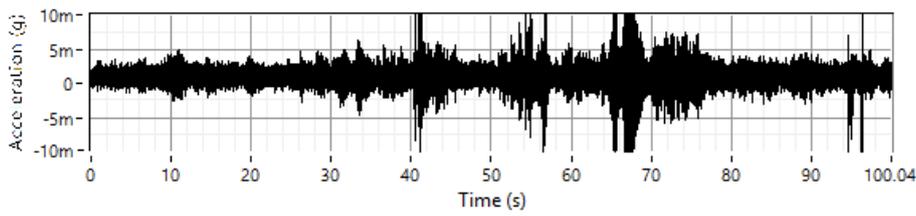


spectrum - Dev2_ai3	x1: 10.17	y1: 163.1u	Dx: 5.22	1/Dx: 191.6m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 15.39	y2: 29.33u	Dy: -133.8u	Dy/Dx: -25.62u

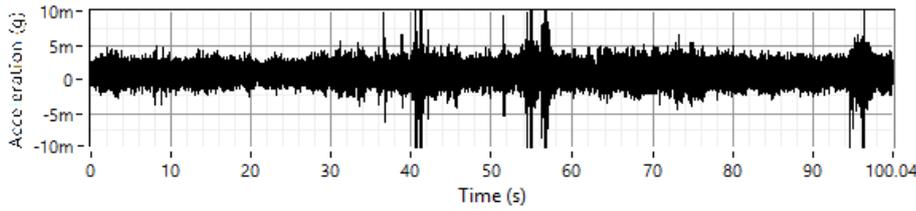


spectrum - Dev2_ai3	x1: 36.48	y1: 4.682u	Dx: 9.4	1/Dx: 106.4m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 45.88	y2: 7.324u	Dy: 2.642u	Dy/Dx: 281.1n

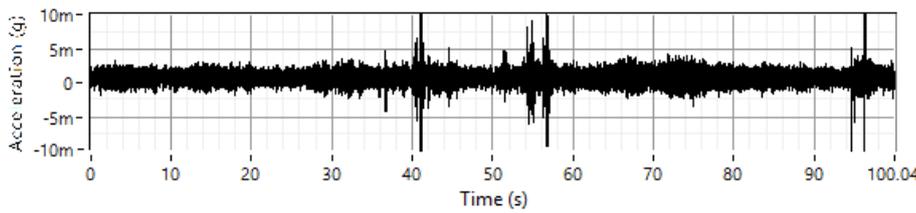
Configuração 2:



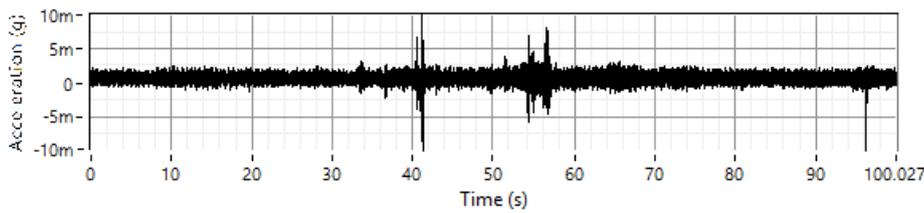
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:54:53
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai0 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



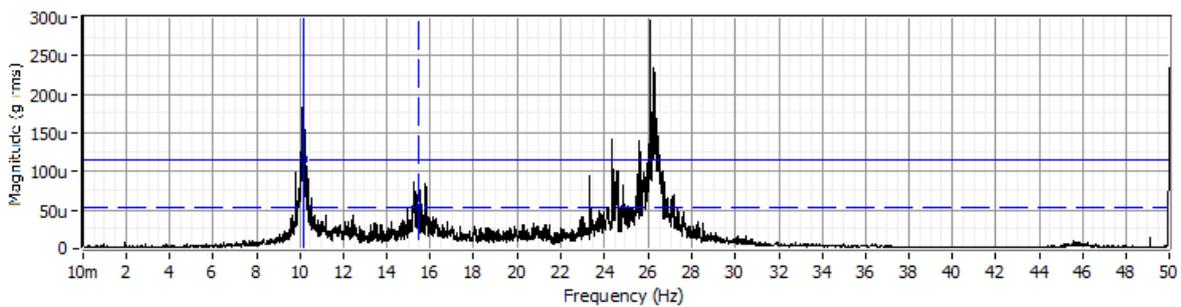
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:54:53
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai1 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



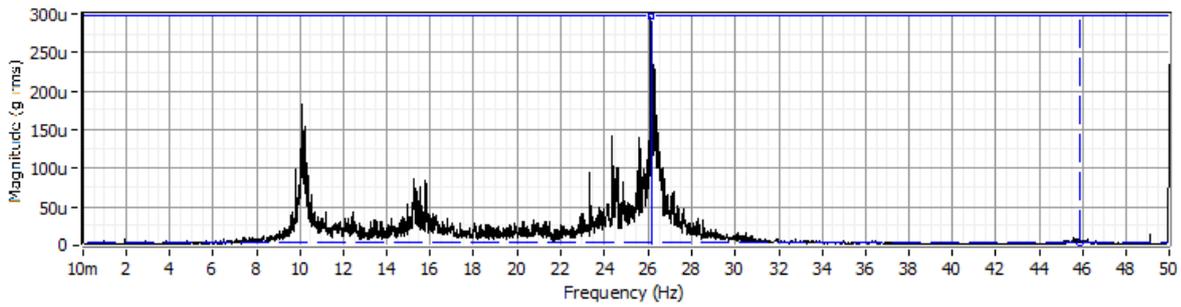
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:54:53
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai2 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



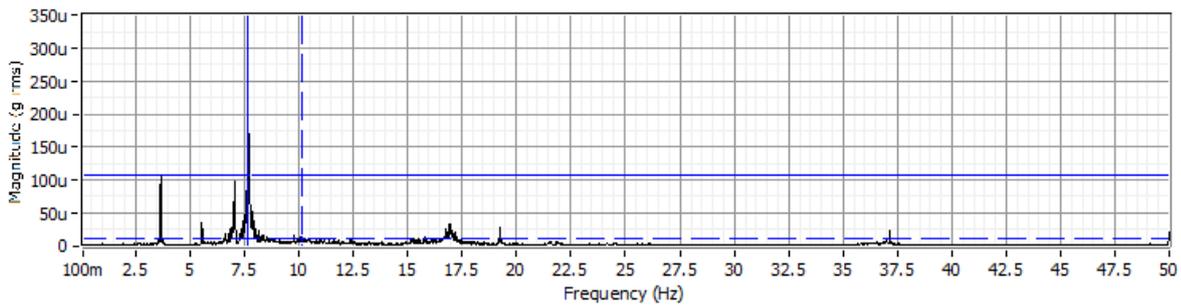
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 11:54:53
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai3 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



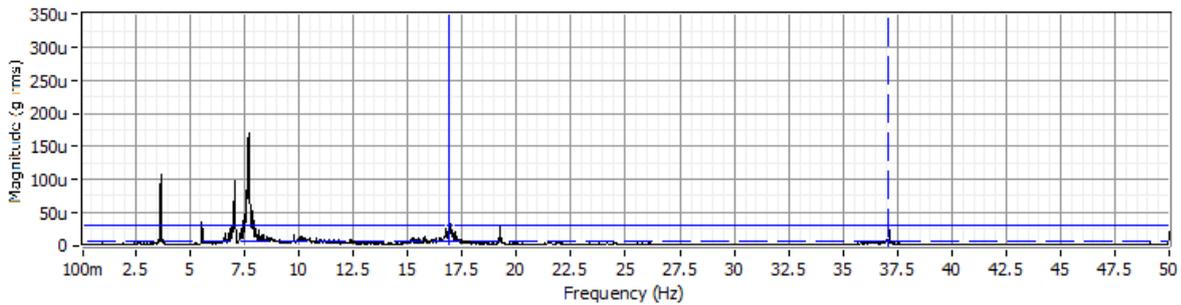
spectrum - Dev2_ai0	x1: 10.17	y1: 116.2u	Dx: 5.3	1/Dx: 188.7m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 15.47	y2: 54.39u	Dy: -61.77u	Dy/Dx: -11.66u



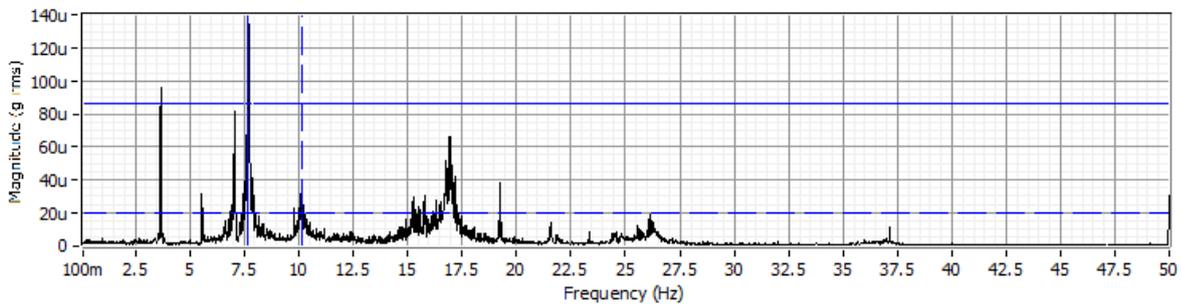
spectrum - Dev2_ai0	x1: 26.14	y1: 297.5u	Dx: 19.77	1/Dx: 50.58m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 45.91	y2: 3.129u	Dy: -294.4u	Dy/Dx: -14.89u



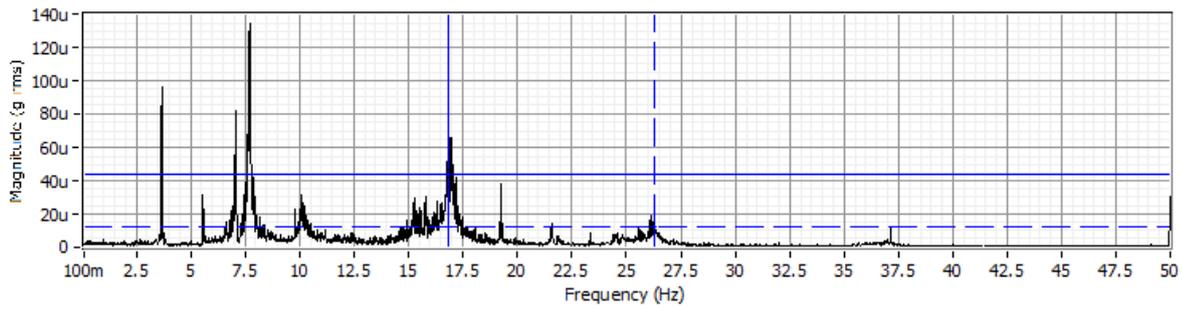
spectrum - Dev2_ai1	x1: 7.67	y1: 106.8u	Dx: 2.5	1/Dx: 400m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 10.17	y2: 9.43u	Dy: -97.33u	Dy/Dx: -38.93u



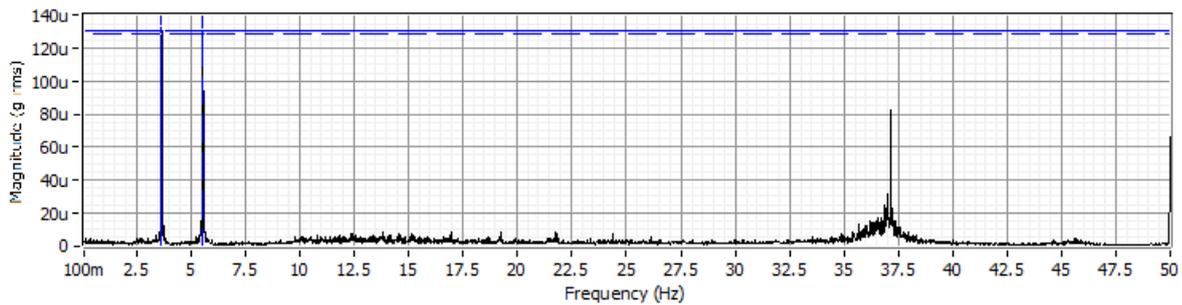
spectrum - Dev2_ai1	x1: 16.93	y1: 30.57u	Dx: 20.14	1/Dx: 49.65m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 37.07	y2: 4.038u	Dy: -26.53u	Dy/Dx: -1.317u



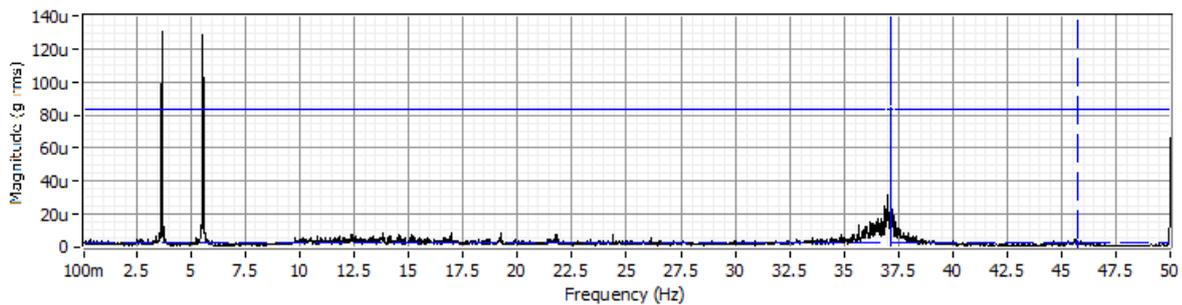
spectrum - Dev2_ai2	x1: 7.67	y1: 85.57u	Dx: 2.5	1/Dx: 400m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 10.17	y2: 20.07u	Dy: -65.5u	Dy/Dx: -26.2u



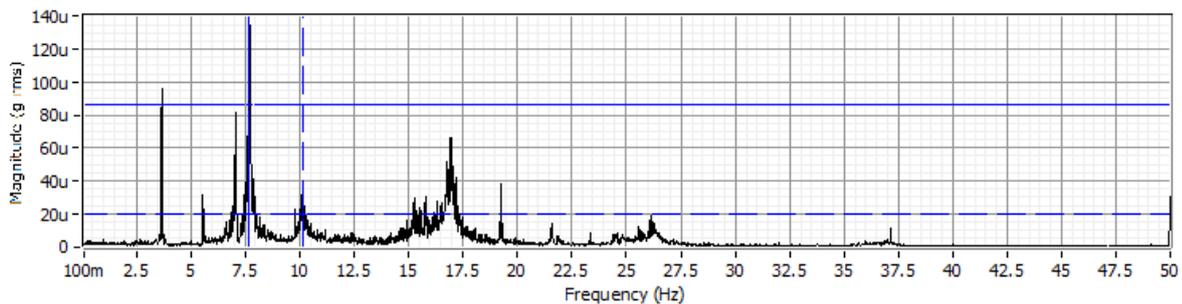
spectrum - Dev2_ai2	x1: 16.86	y1: 43.56u	Dx: 9.4	1/Dx: 106.4m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 26.26	y2: 11.66u	Dy: -31.9u	Dy/Dx: -3.393u



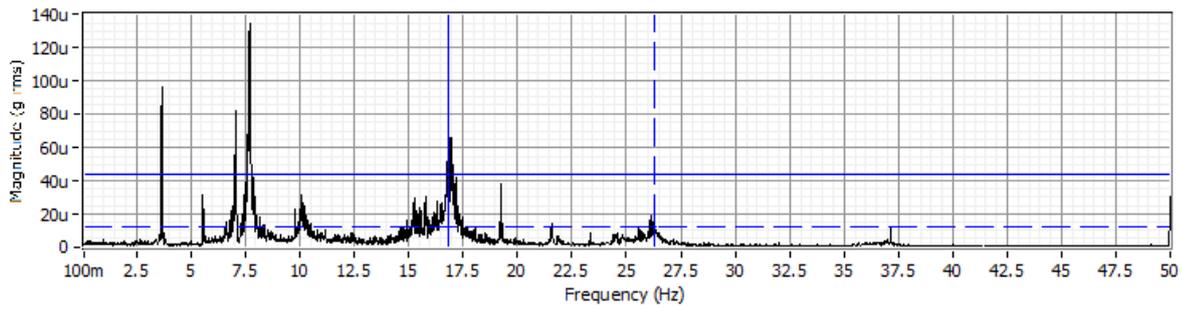
spectrum - Dev2_ai3	x1: 3.66	y1: 131.1u	Dx: 1.9	1/Dx: 526.3m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 5.56	y2: 129.3u	Dy: -1.751u	Dy/Dx: -921.7n



spectrum - Dev2_ai3	x1: 37.17	y1: 82.88u	Dx: 8.57	1/Dx: 116.7m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 45.74	y2: 1.856u	Dy: -81.02u	Dy/Dx: -9.454u

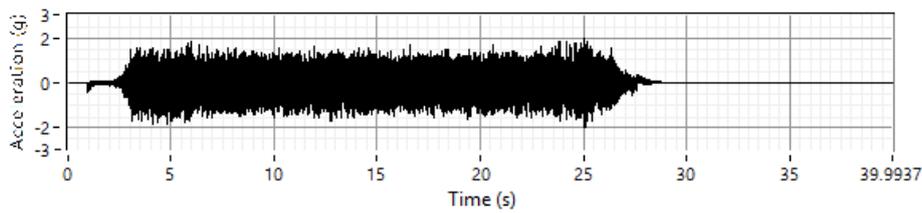


spectrum - Dev2_ai2	x1: 7.67	y1: 85.57u	Dx: 2.5	1/Dx: 400m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 10.17	y2: 20.07u	Dy: -65.5u	Dy/Dx: -26.2u

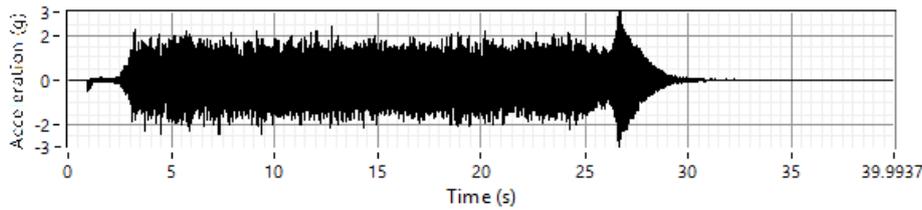


spectrum - Dev2_ai2	x1: 16.86	y1: 43.56u	Dx: 9.4	1/Dx: 106.4m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 26.26	y2: 11.66u	Dy: -31.9u	Dy/Dx: -3.393u

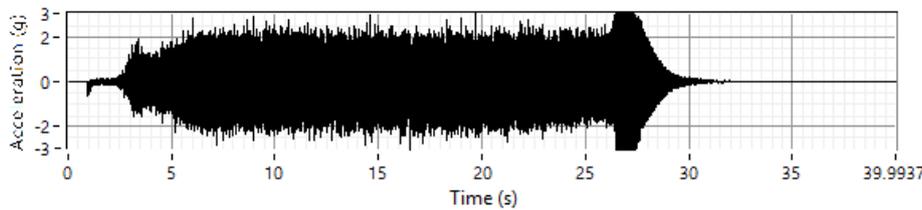
Configuração 3:



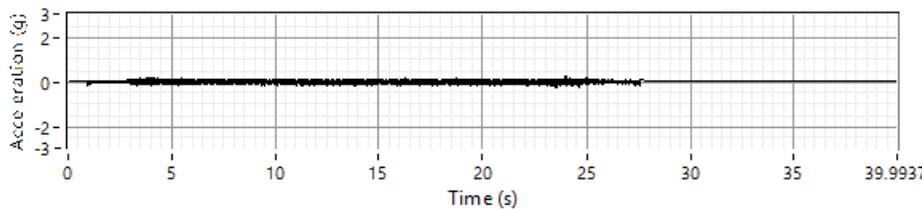
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai0 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



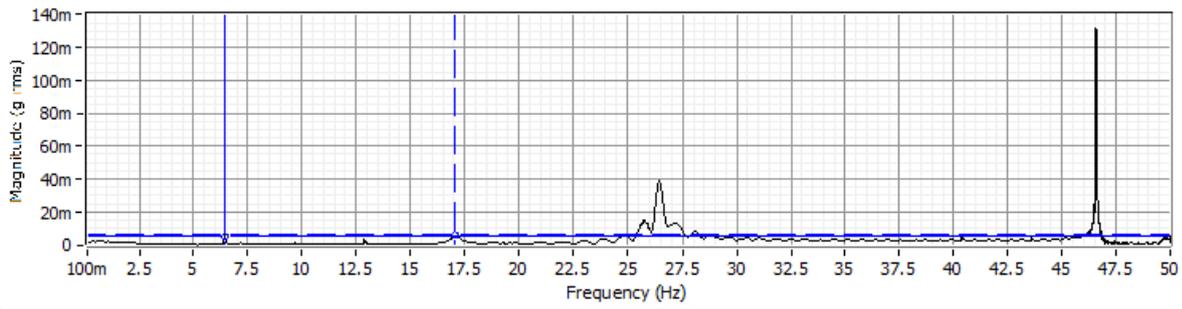
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai1 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



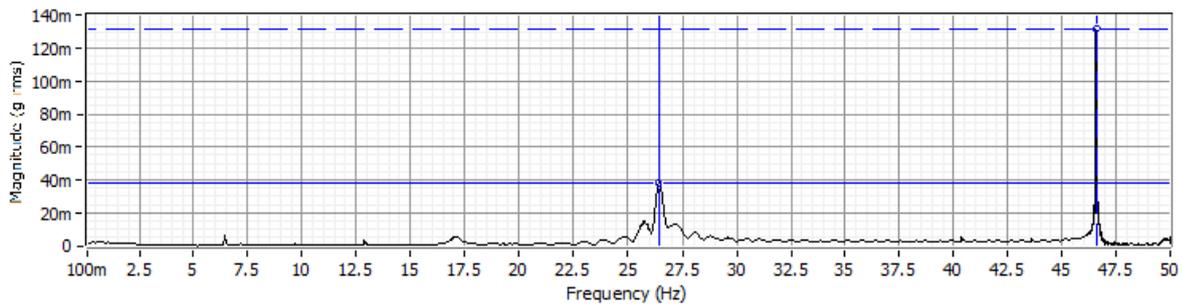
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai2 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



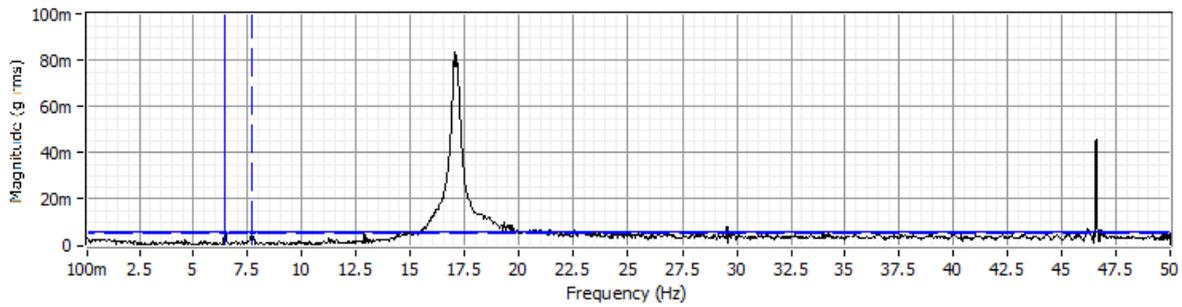
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai3 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



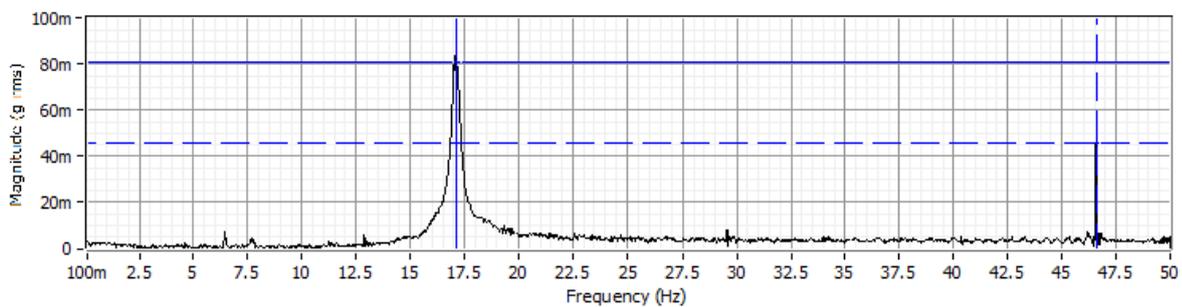
spectrum - Dev2_ai0	x1: 6.45	y1: 4.845m	Dx: 10.6	1/Dx: 94.34m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 17.05	y2: 5.872m	Dy: 1.027m	Dy/Dx: 96.89u



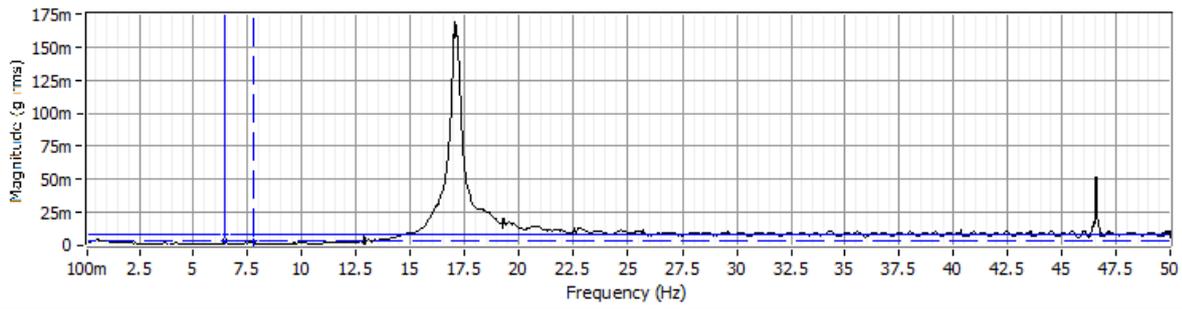
spectrum - Dev2_ai0	x1: 26.425	y1: 38.23m	Dx: 20.15	1/Dx: 49.63m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 46.575	y2: 131.8m	Dy: 93.6m	Dy/Dx: 4.645m



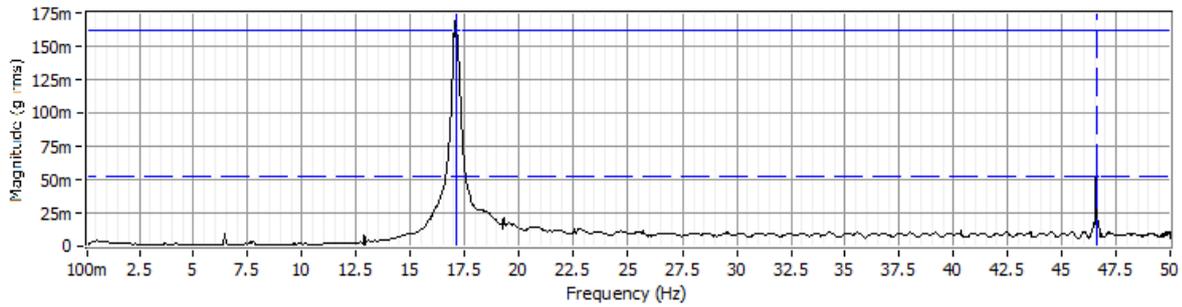
spectrum - Dev2_ai1	x1: 6.45	y1: 5.63m	Dx: 1.25	1/Dx: 800m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 7.7	y2: 4.682m	Dy: -947.9u	Dy/Dx: -758.3u



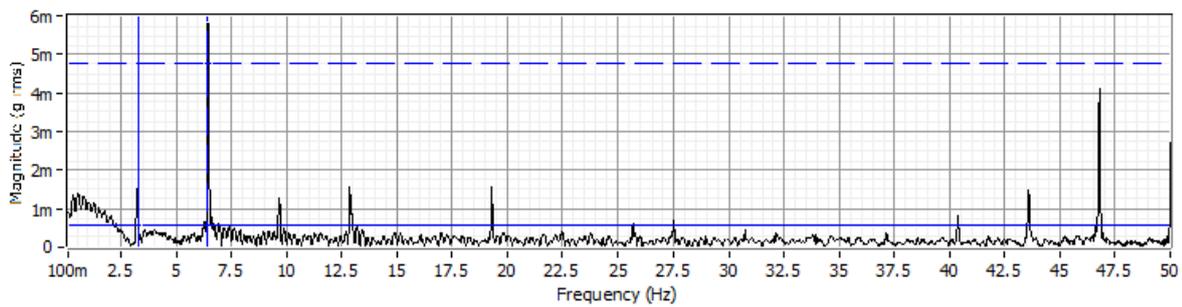
spectrum - Dev2_ai1	x1: 17.125	y1: 80.52m	Dx: 29.47	1/Dx: 33.93m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 46.6	y2: 45.78m	Dy: -34.74m	Dy/Dx: -1.179m



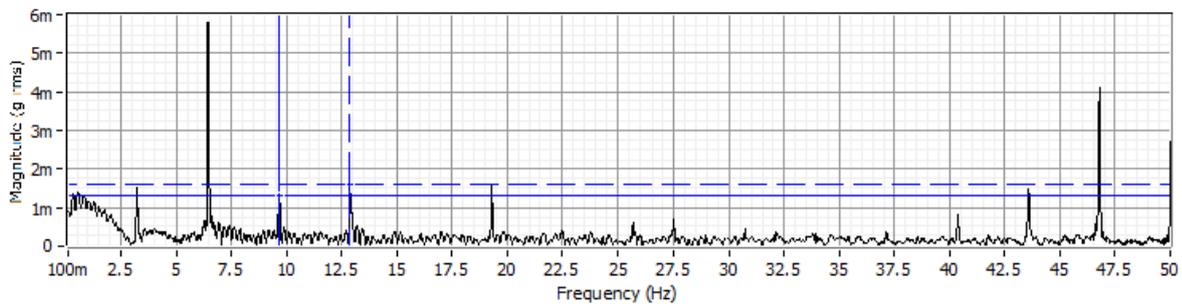
spectrum - Dev2_ai2	x1: 6.45	y1: 7.002m	Dx: 1.325	1/Dx: 754.7m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 7.775	y2: 2.184m	Dy: -4.818m	Dy/Dx: -3.636m



spectrum - Dev2_ai2	x1: 17.125	y1: 162.4m	Dx: 29.47	1/Dx: 33.93m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 46.6	y2: 51.66m	Dy: -110.7m	Dy/Dx: -3.756m

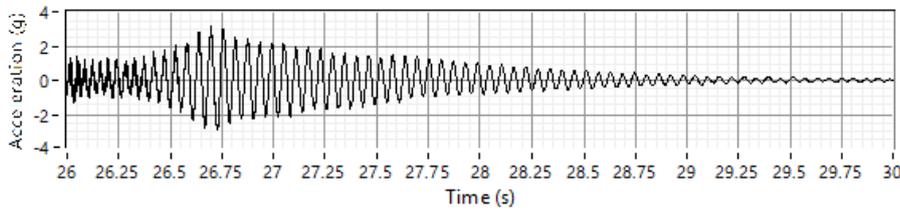


spectrum - Dev2_ai3	x1: 3.275	y1: 547.8u	Dx: 3.125	1/Dx: 320m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 6.4	y2: 4.755m	Dy: 4.207m	Dy/Dx: 1.346m

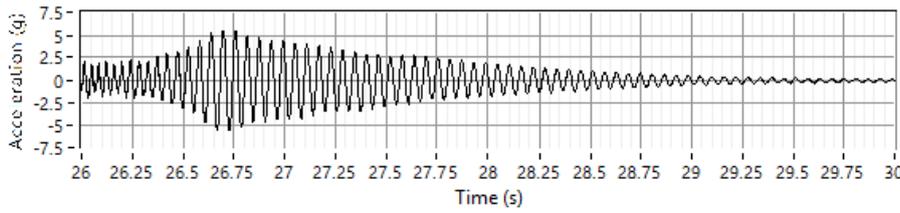


spectrum - Dev2_ai3	x1: 9.65	y1: 1.282m	Dx: 3.2	1/Dx: 312.5m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 12.85	y2: 1.57m	Dy: 288u	Dy/Dx: 90u

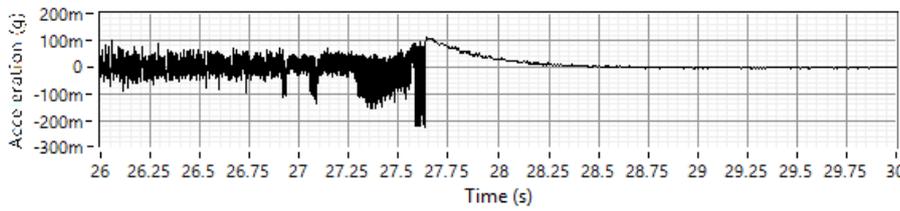
Configuração 4:



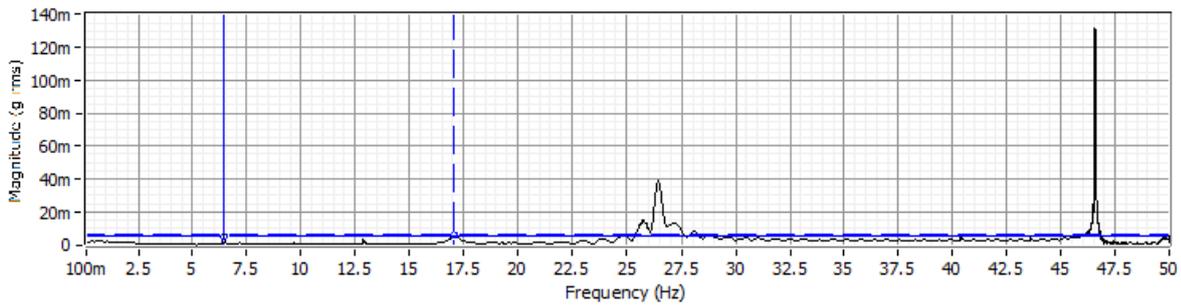
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai1 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



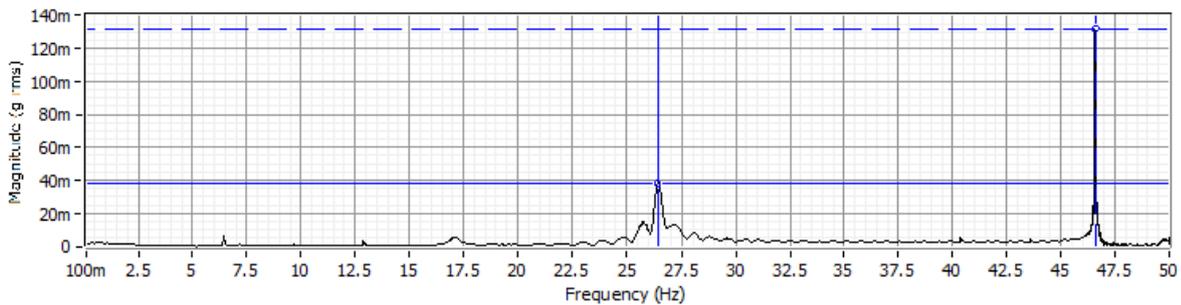
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai2 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



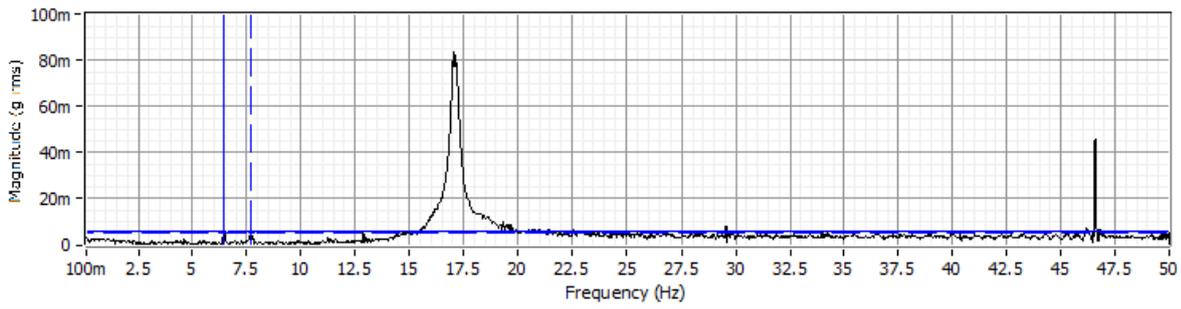
Legend	
<input type="checkbox"/>	17-04-2019 12:35:11
<input type="checkbox"/>	Acceleration
<input checked="" type="checkbox"/>	Dev2_ai3 (g)
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	



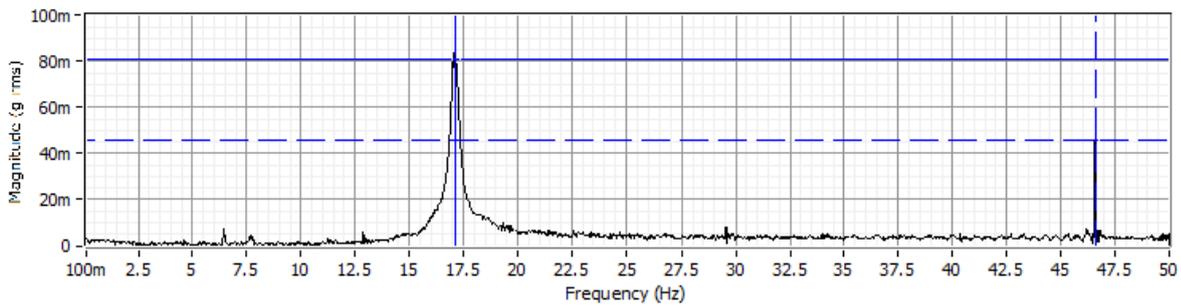
spectrum - Dev2_ai0	x1: 6.45	y1: 4.845m	Dx: 10.6	1/Dx: 94.34m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 17.05	y2: 5.872m	Dy: 1.027m	Dy/Dx: 96.89u



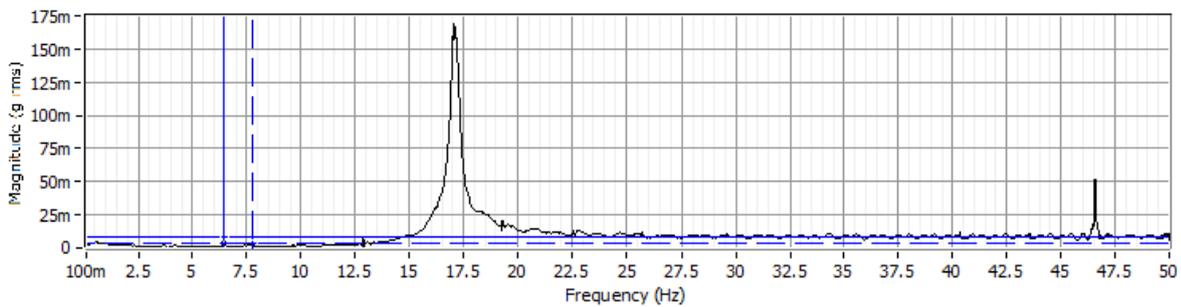
spectrum - Dev2_ai0	x1: 26.425	y1: 38.23m	Dx: 20.15	1/Dx: 49.63m
spectrum - Dev2_ai0	x2: 46.575	y2: 131.8m	Dy: 93.6m	Dy/Dx: 4.645m



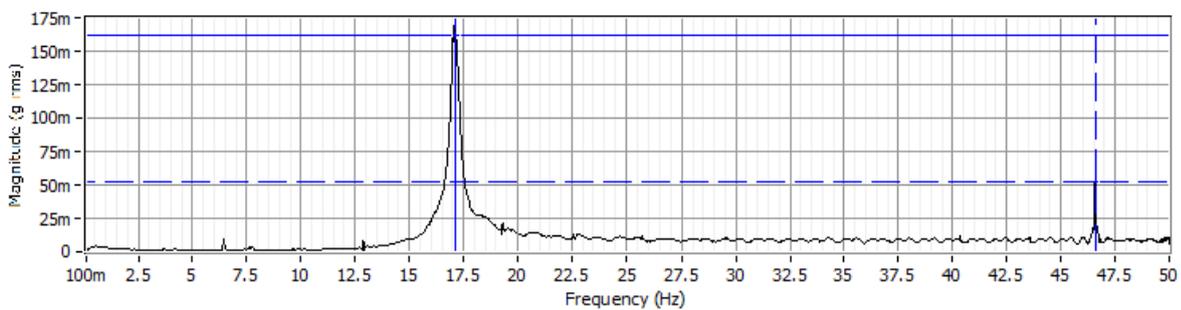
spectrum - Dev2_ai1	x1: 6.45	y1: 5.63m	Dx: 1.25	1/Dx: 800m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 7.7	y2: 4.682m	Dy: -947.9u	Dy/Dx: -758.3u



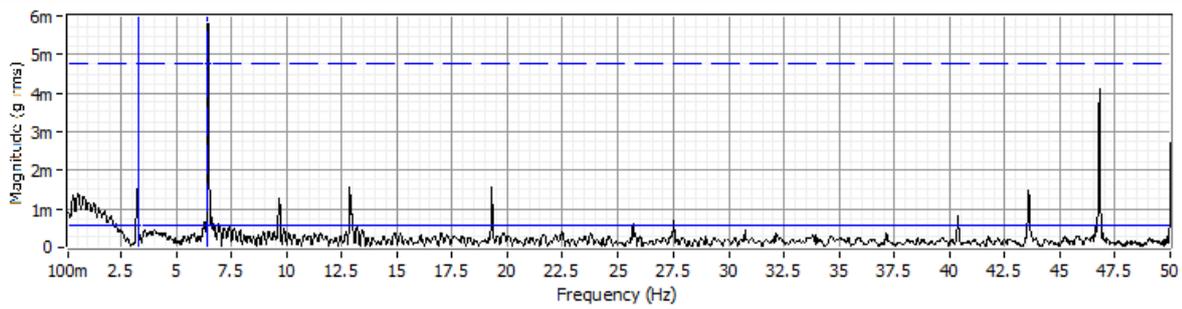
spectrum - Dev2_ai1	x1: 17.125	y1: 80.52m	Dx: 29.47	1/Dx: 33.93m
spectrum - Dev2_ai1	x2: 46.6	y2: 45.78m	Dy: -34.74m	Dy/Dx: -1.179m



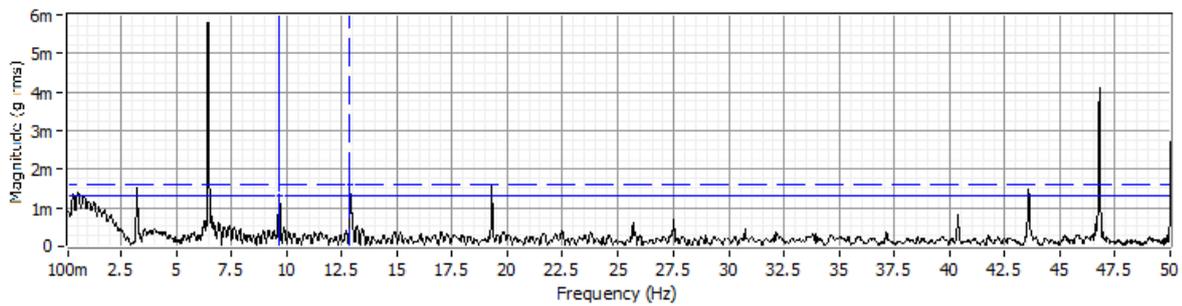
spectrum - Dev2_ai2	x1: 6.45	y1: 7.002m	Dx: 1.325	1/Dx: 754.7m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 7.775	y2: 2.184m	Dy: -4.818m	Dy/Dx: -3.636m



spectrum - Dev2_ai2	x1: 17.125	y1: 162.4m	Dx: 29.47	1/Dx: 33.93m
spectrum - Dev2_ai2	x2: 46.6	y2: 51.66m	Dy: -110.7m	Dy/Dx: -3.756m

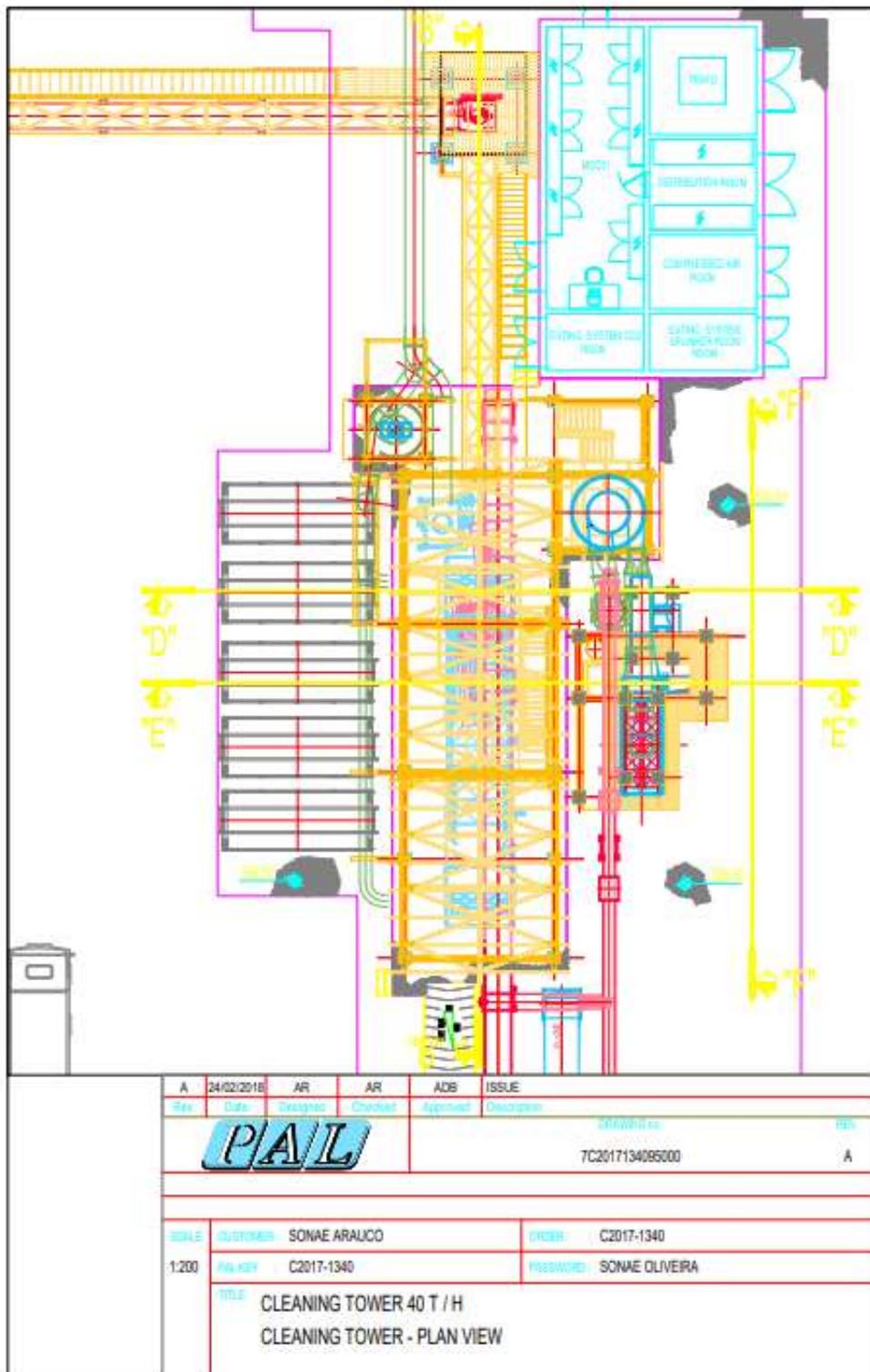


spectrum - Dev2_ai3	x1: 3.275	y1: 547.8u	Dx: 3.125	1/Dx: 320m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 6.4	y2: 4.755m	Dy: 4.207m	Dy/Dx: 1.346m

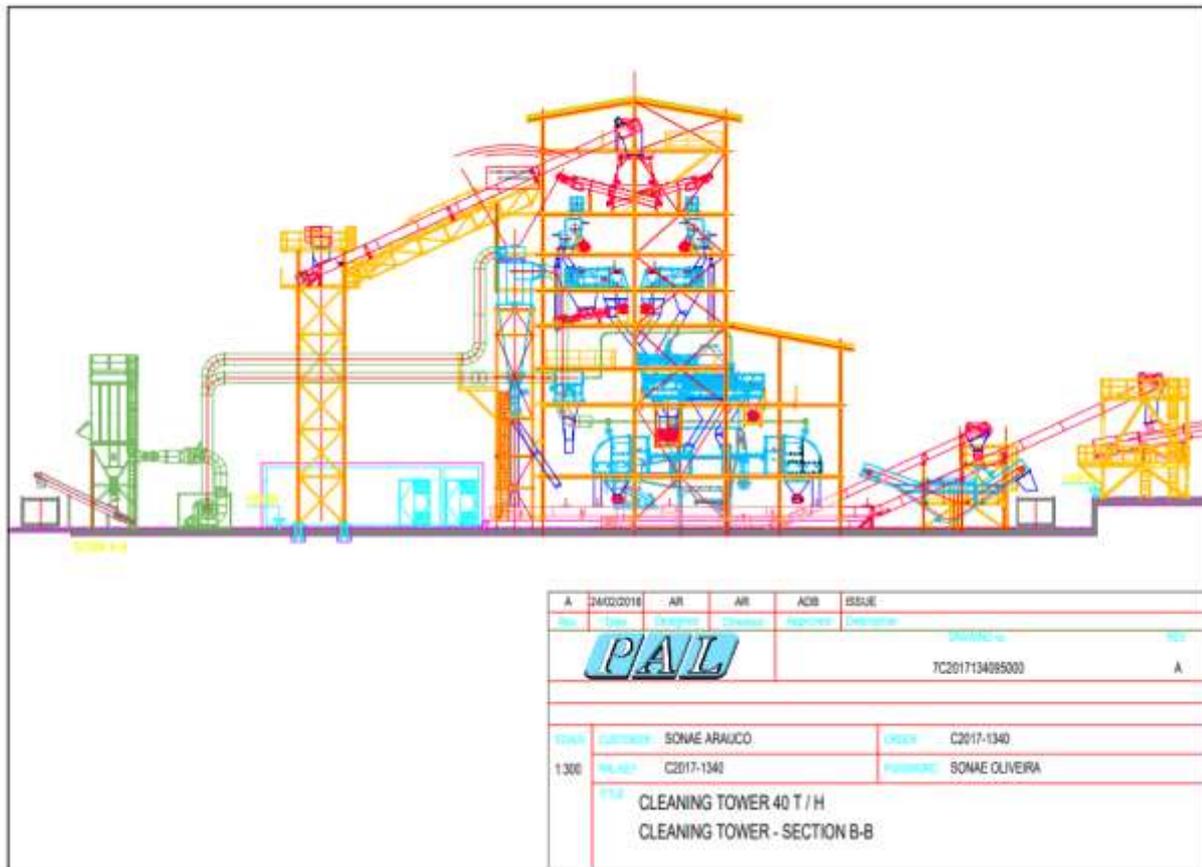


spectrum - Dev2_ai3	x1: 9.65	y1: 1.282m	Dx: 3.2	1/Dx: 312.5m
spectrum - Dev2_ai3	x2: 12.85	y2: 1.57m	Dy: 288u	Dy/Dx: 90u

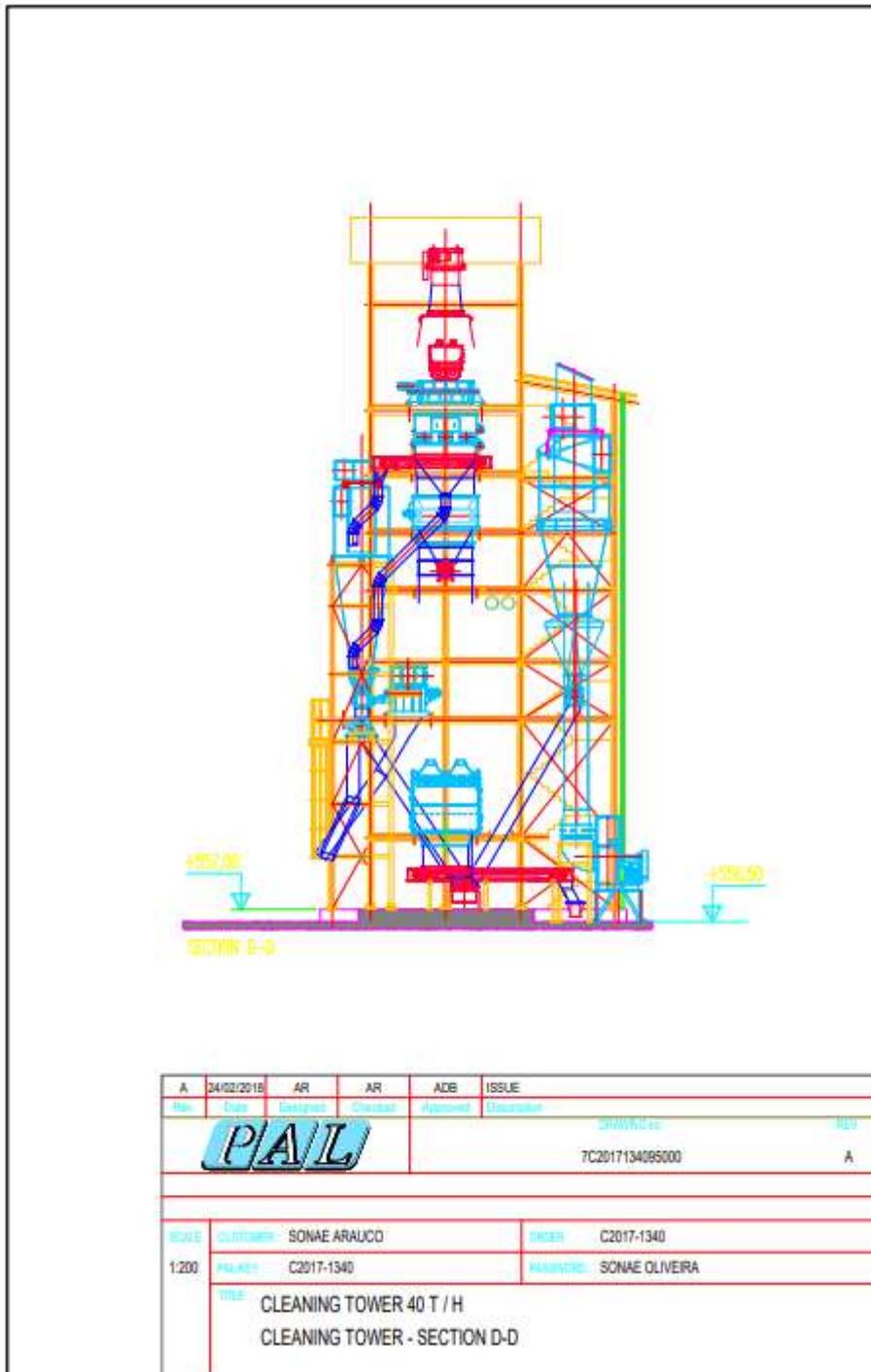
Anexo C.1 – Peça Desenhada: Torre de reciclados - Planta



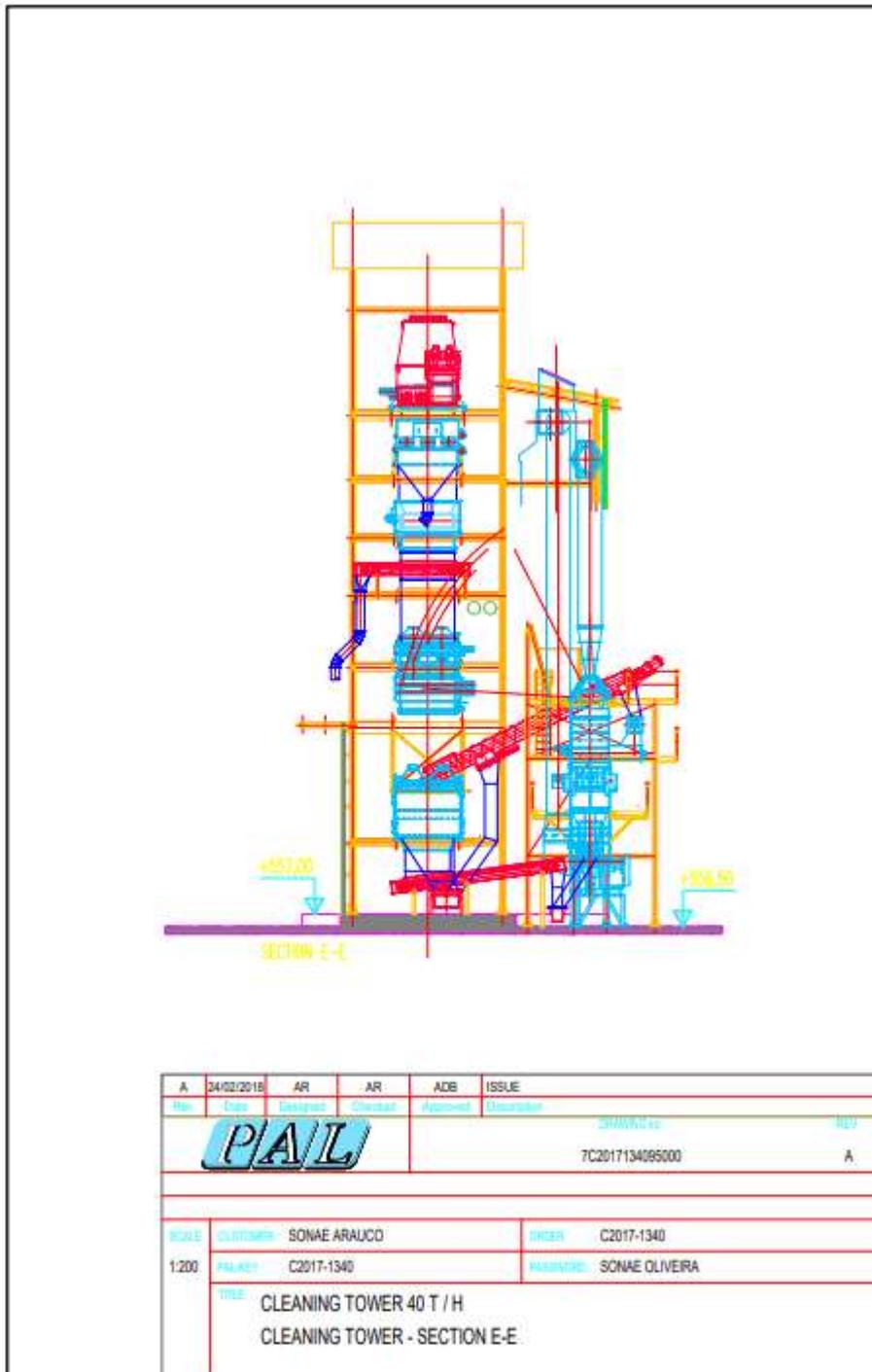
Anexo C.2 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção B



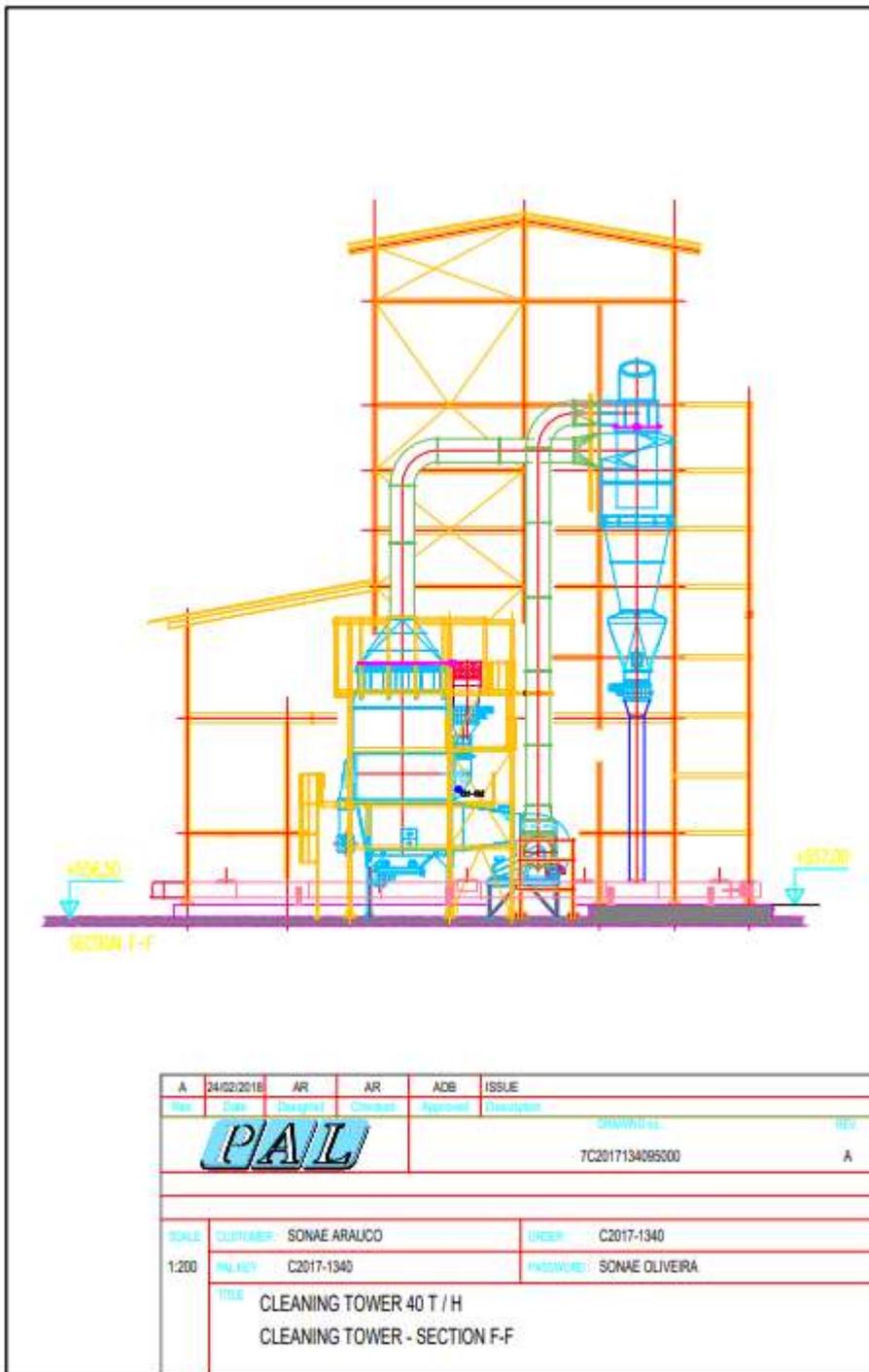
Anexo C.3 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção D



Anexo C.4 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção E

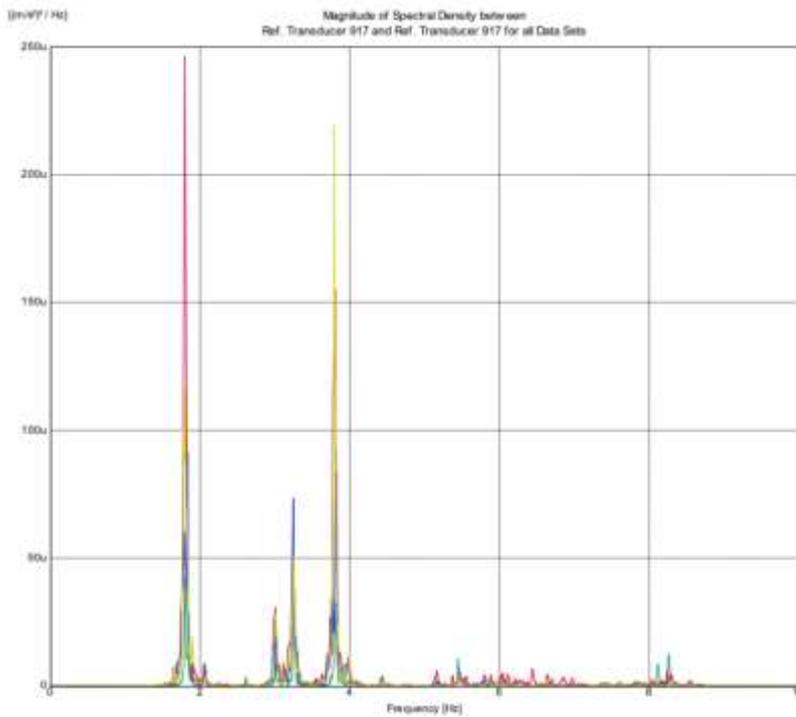


Anexo C.5 – Peça Desenhada: Torre de reciclados – Secção F

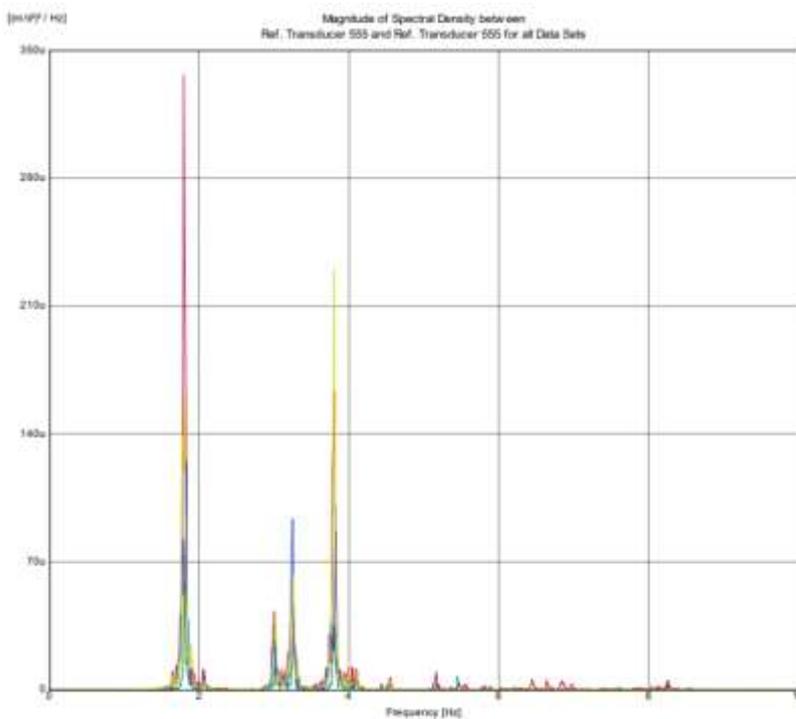


Anexo D – Densidades espectrais das acelerações medidas: sistema ISISE-UC

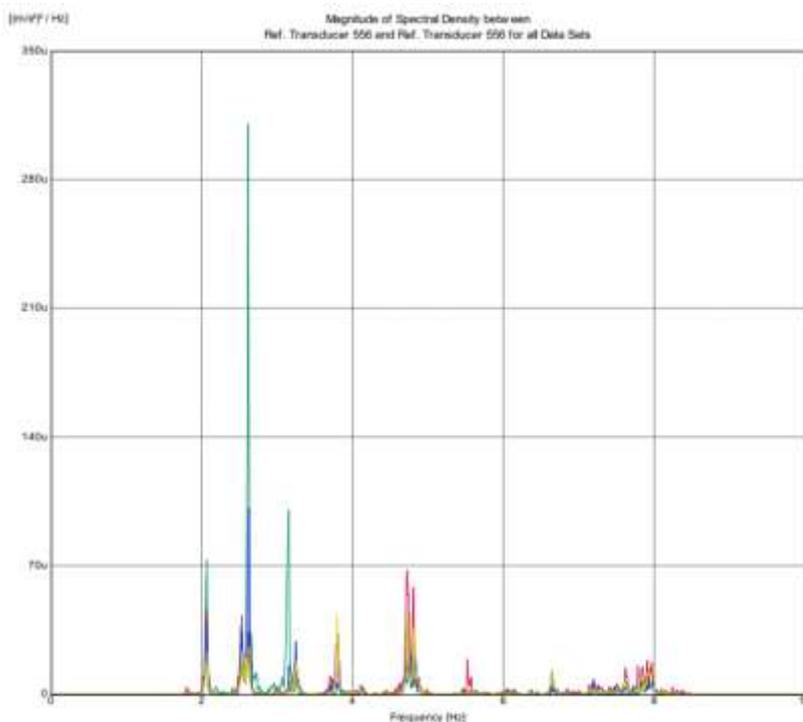
Transdutor 917: direção xx.



Transdutor 955: direção -xx.



Transdutor 556: direção yy.



Para cada configuração são mostradas as séries temporais, apenas 100 segundos, dos quatro pontos de medição e o respetivo espectro de potencia até 50 Hz.

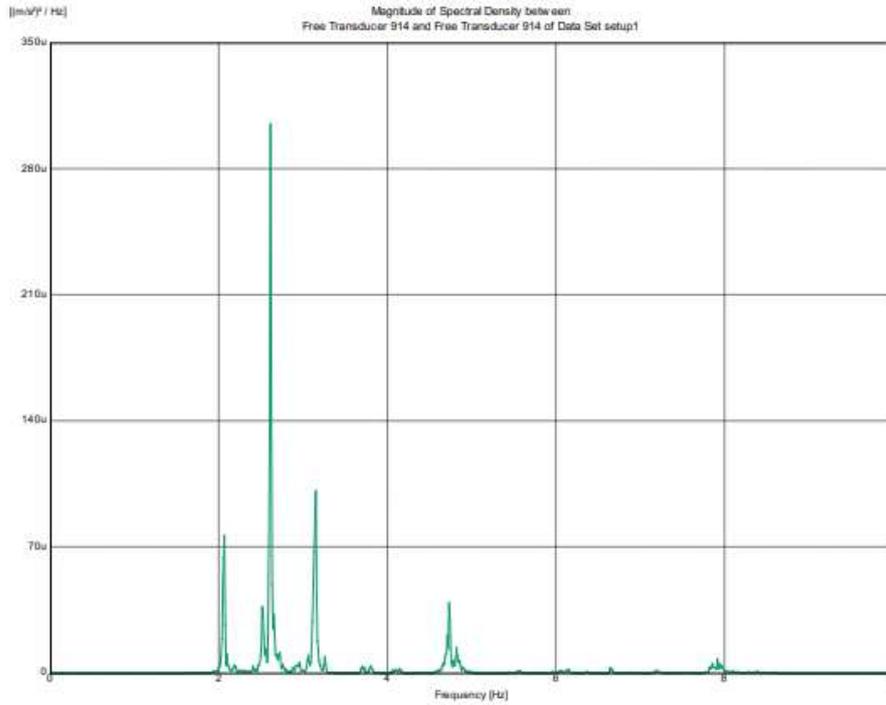
Configuração 1: Vibração ambiente; Duração série: 300s; Dt=0,0005s; Faixa de frequência do espectro: 1kHz; Df=0,01Hz; Média de espectro: 10.

Configuração 2: Vibração ambiente; Duração série: 300s; Dt=0,0005s; Faixa de frequência do espectro: 1kHz; Df=0,01Hz; Média de espectro: 10.

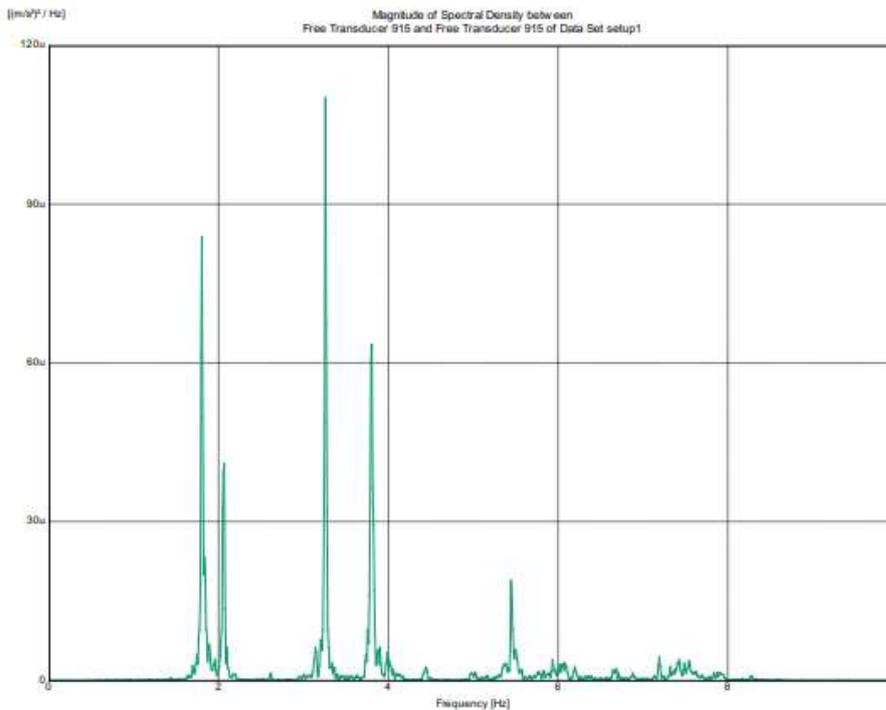
Configuração 3: Vibração forçada; Duração série: 300s; Dt=0,0005s; Faixa de frequência do espectro: 1kHz; Df=0,01Hz; Média de espectro: 10.

Configuração 4: Vibração forçada; Duração série: 300s; Dt=0,0005s; Faixa de frequência do espectro: 1kHz; Df=0,01Hz; Média de espectro: 10.

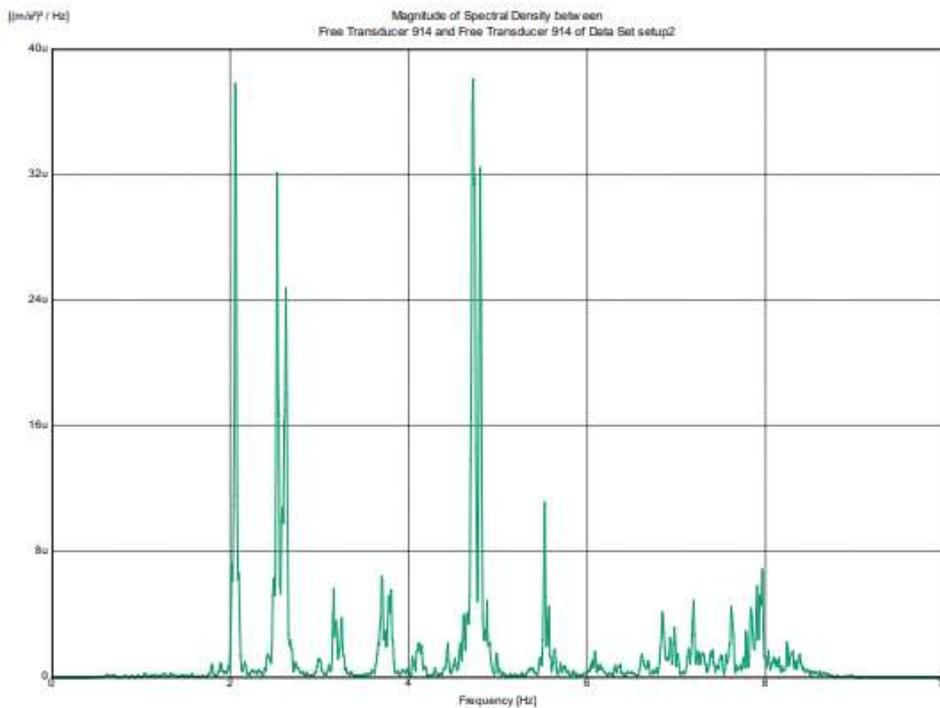
Transdutor 914: direção -yy, configuração 1.



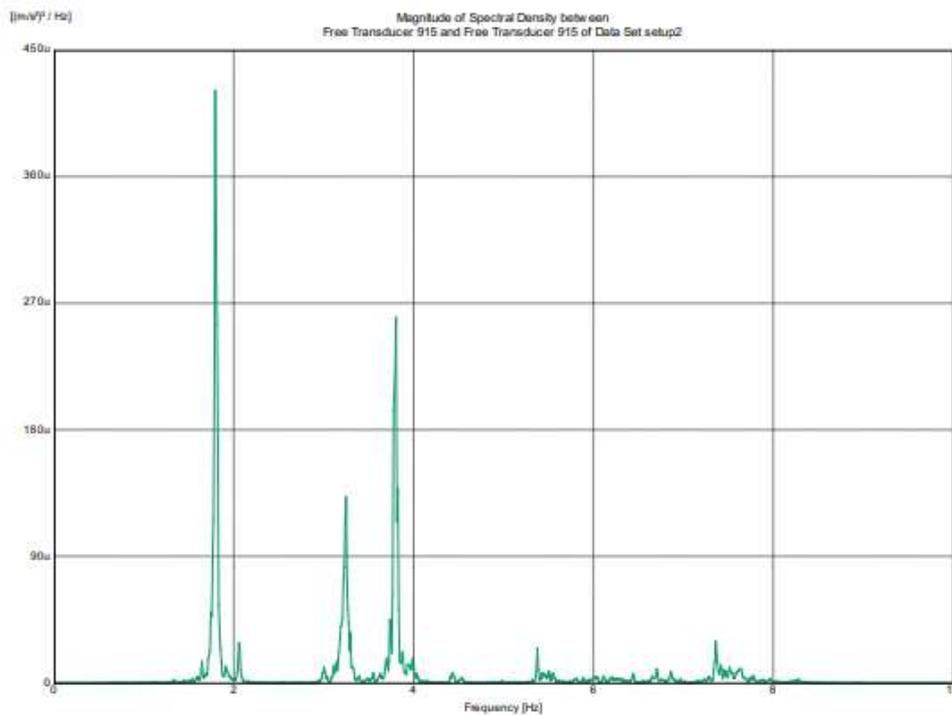
Transdutor 915: direção -xx, configuração 1.



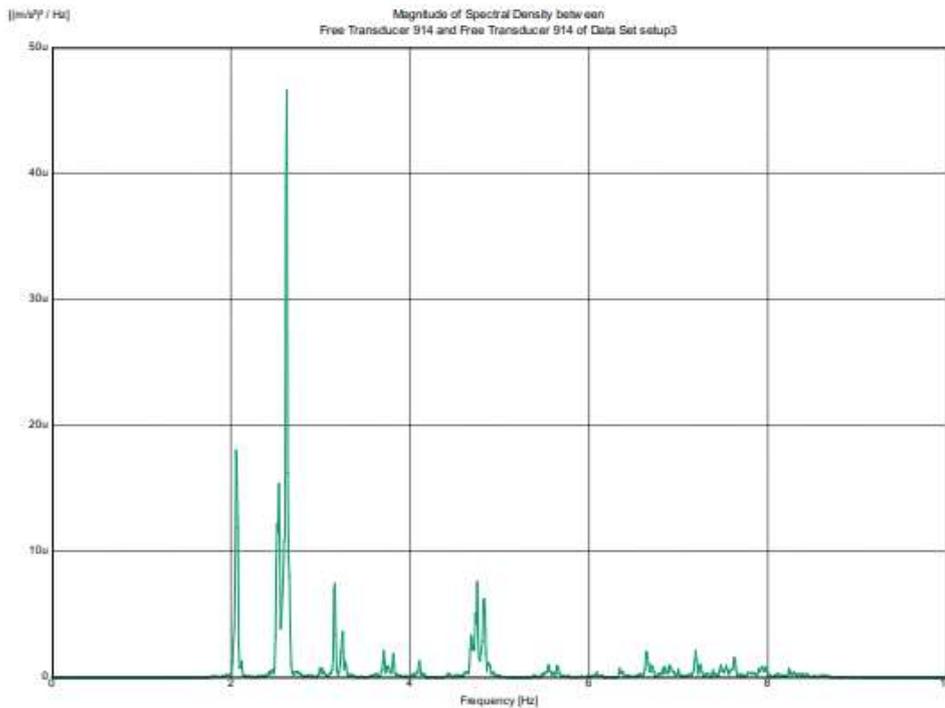
Transdutor 914: direção -yy, configuração 2.



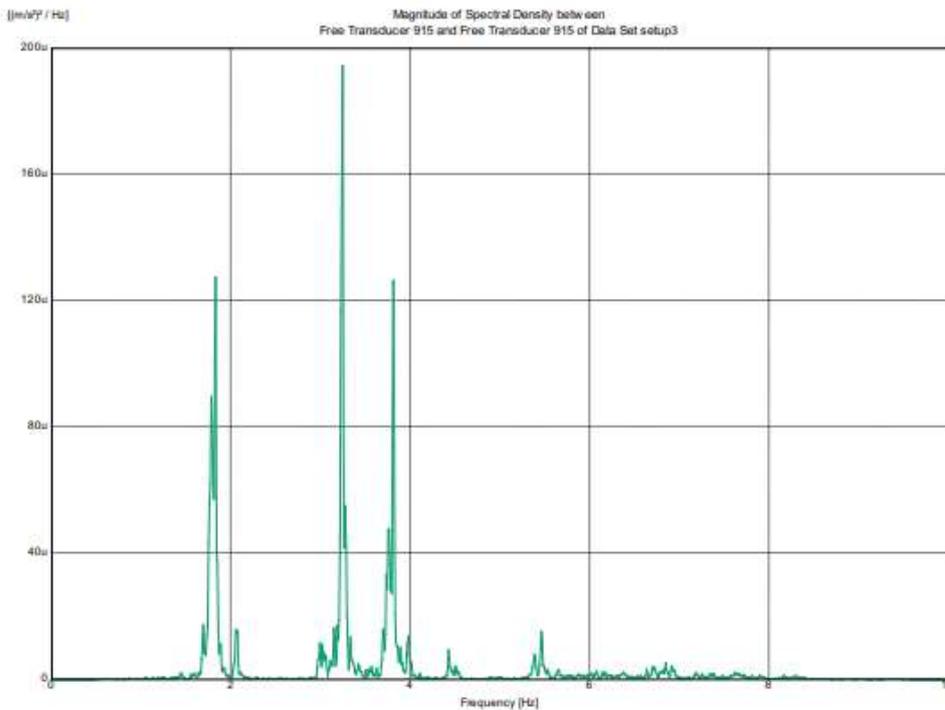
Transdutor 915: direção -xx, configuração 2.



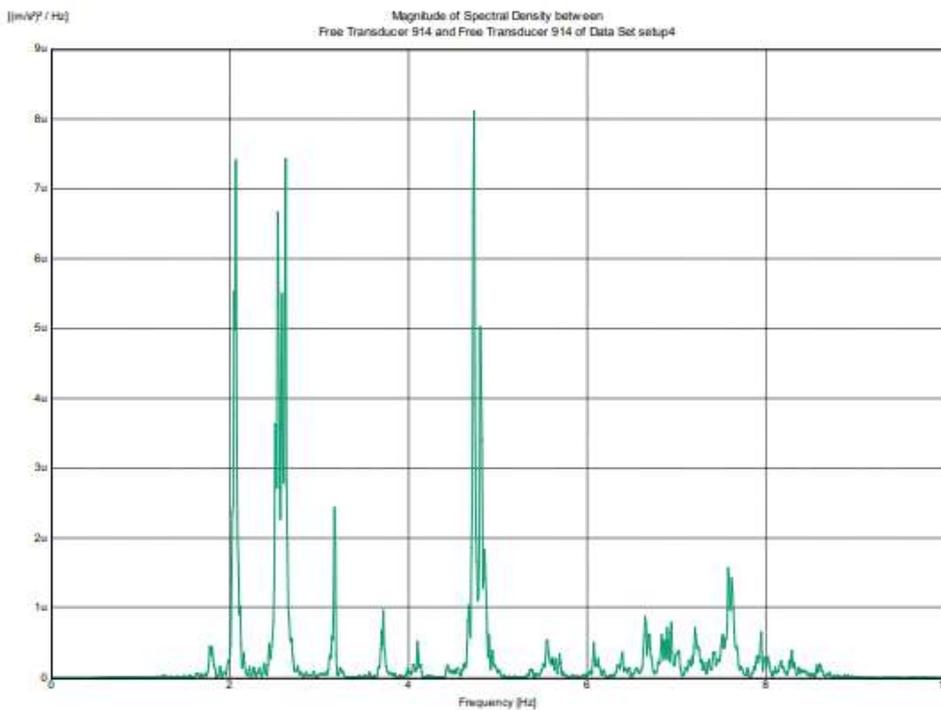
Transdutor 914: direção -yy, configuração 3.



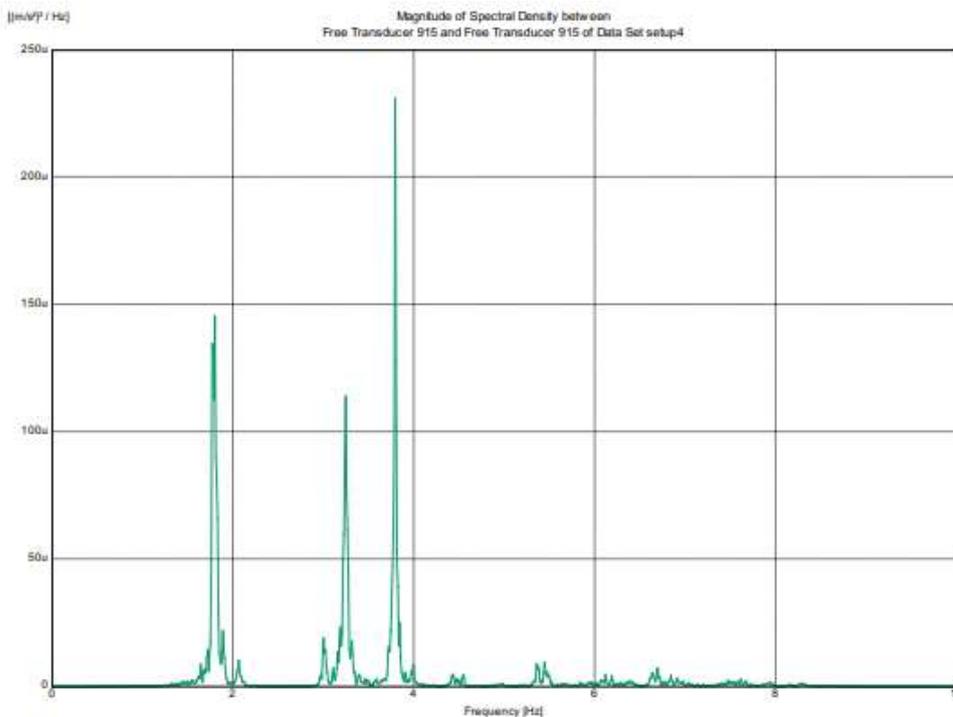
Transdutor 915: direção -xx, configuração 3.



Transdutor 914: direção -yy, configuração 4.

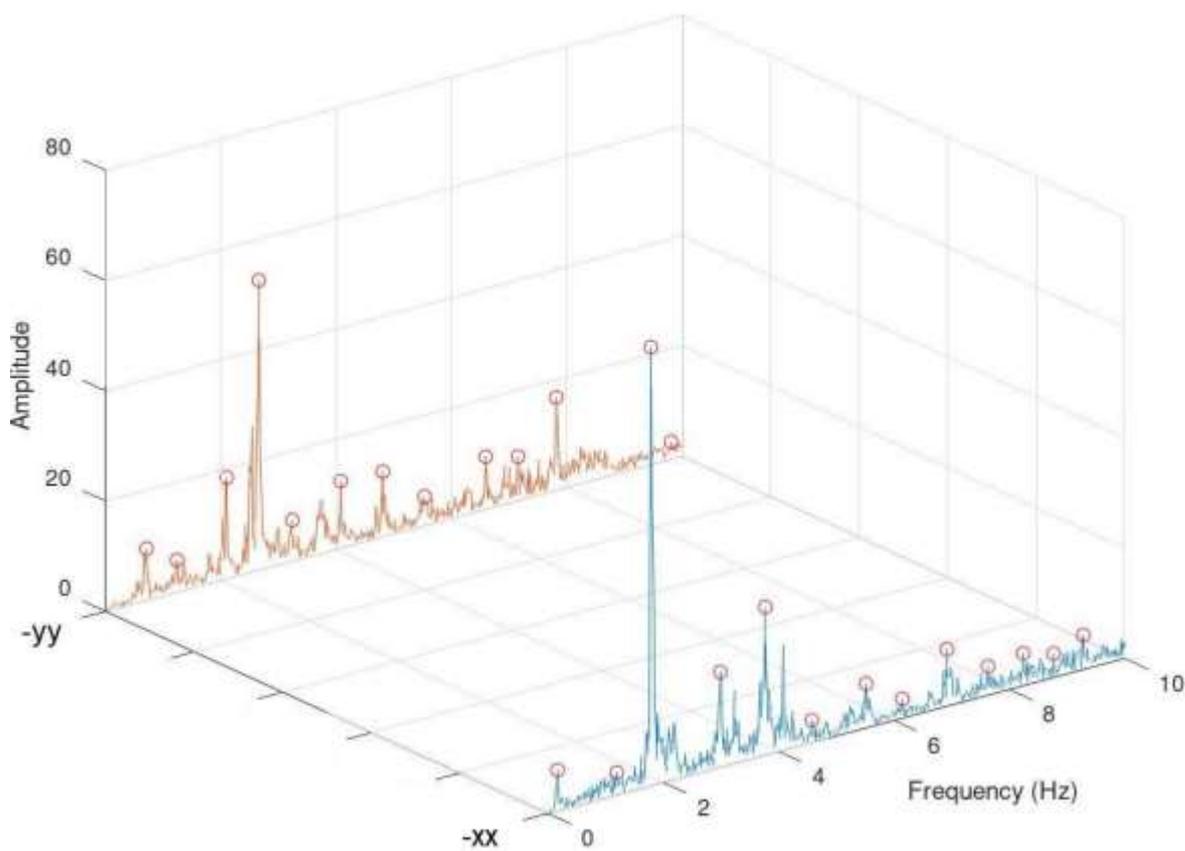


Transdutor 915: direção -xx, configuração 4.



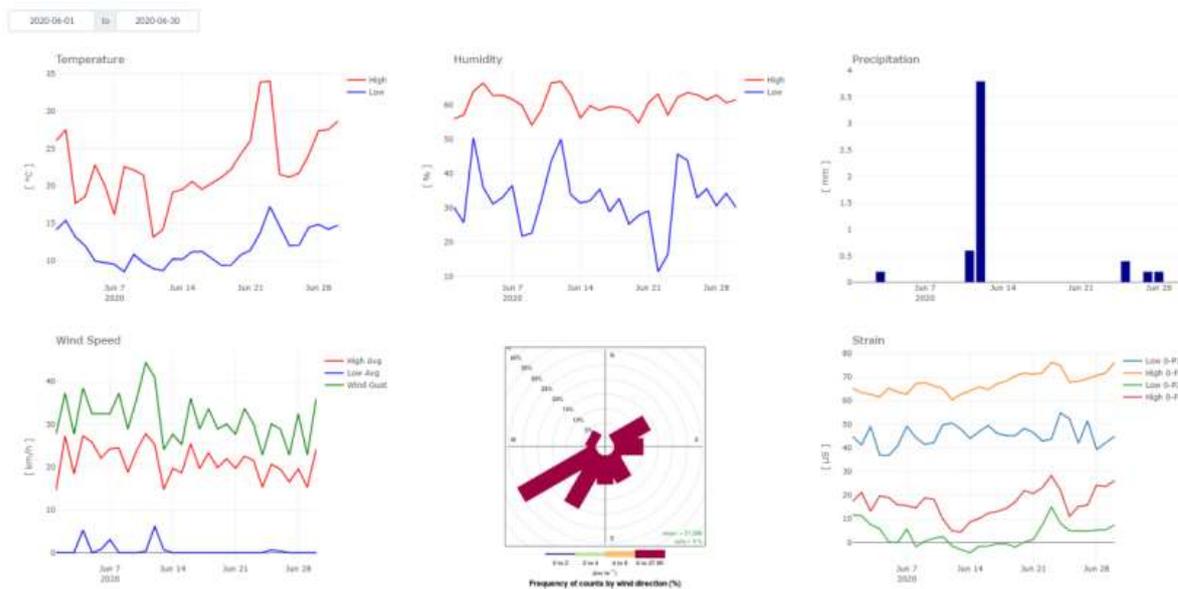
Anexo E – Densidades espectrais das acelerações medidas: sistema *OneSensor*

Valores medidos pelos acelerómetros constituintes do *OneSensor*.



Anexo F – Monitorização *OneSensor* a longo prazo

Valores de monitorização de longo prazo – junho 2020.



Valores de monitorização de longo prazo a nível diário – 12 de junho

