



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS DA AÇÃO DO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

ANDRÉ FILIPE FONSECA DA SILVA

Junho de 2019

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS DA AÇÃO DO VENTO
NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM**

ANDRÉ FILIPE FONSECA DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

Co-Orientador: Jorge Aníbal de Andrade Leite

JULHO DE 2019

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice de Texto	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xv
CAPÍTULO 1 Introdução.....	1
CAPÍTULO 2 Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem.....	13
CAPÍTULO 3 Investigações anteriores na Torre do Monte da Virgem	17
CAPÍTULO 4 Sistema de monitorização contínua.....	27
CAPÍTULO 5 Análise dos resultados do sistema de monitorização contínua.....	37
CAPÍTULO 6 Considerações finais	53
Referências Bibliográficas	55
Anexo I – Rotina para identificação de eventos.....	57
ANEXO II – Rotina para representação do movimento da torre.....	61

RESUMO

O presente trabalho insere-se no âmbito da avaliação da resposta dinâmica da torre de telecomunicações do Monte da Virgem sob ação do vento. Pretende-se com este trabalho caracterizar a resposta da estrutura em termos de acelerações, identificando as situações em que esta resposta surge amplificada, e, associando aos regimes de vento que provocam este efeito.

Inicialmente serão apresentadas algumas investigações de âmbito internacional, de forma a adequadamente contextualizar a investigação realizada, sendo posteriormente detalhados alguns dos estudos realizados na torre do Monte da Virgem, em particular os relacionados com o desenvolvimento de um modelo numérico calibrado da torre, com base nos resultados experimentais a partir de um ensaio de vibração ambiental e os referentes à instalação de um sistema de monitorização contínua.

A análise das informações do sistema de monitorização contínua, motivou o desenvolvimento de ferramentas computacionais em ambiente Matlab que automatizaram a caracterização de eventos em a resposta dinâmica da torre surge significativamente amplificada, denominados de eventos críticos, em termos da sua frequência, duração e amplitude. A ocorrência destes eventos é devida ao contributo de modo local de vibração da estrutura do palito metálico, que demonstrou a ser particularmente sensível a regimes de vento específicos de direção este e com velocidades na ordem dos 20-30 km/h.

Palavras-chave: torre de telecomunicações; resposta dinâmica; acelerações; regimes de vento; ensaio de vibração ambiental; calibração; modelo numérico; eventos críticos; ferramentas computacionais.

ABSTRACT

This paperwork falls within the scope of the study of the wind effects on the dynamic response of Monte da Virgem telecommunications tower. This work consists on the characterization of the response in terms of accelerations and the identification of the moments when its response is amplified and identifying the wind behaviour that ignite these effects.

Initially will be referred some international studies, in order to properly contextualize the investigation that is being conducted, which will be later detailed some of the studies done on Monte da Virgem telecommunications tower, in particular the ones related to the development of calibrated numerical model of the tower, based on the experimental results of one ambient vibration test and regarded the installation of a permanent monitoring system.

The analysis of the information withdrawn of the permanent monitoring system motivated the development of programmed routines with the software Matlab which automatized the characterization of events in which the tower's response is significantly amplified, classified as critical events, in terms of frequency, duration and its extent. The occurrence of these events is due to the contribute of a local vibration mode of the metal structure, which has showed to be sensitive to specific wind behaviours from east, with velocities around 20-30 km/h.

Keywords: telecommunications tower; dynamic response; accelerations; wind behaviour; ambient vibration test, calibration; numerical model; critical events; programmed routines.

ÍNDICE DE TEXTO

CAPÍTULO 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais.....	1
1.2	Investigações no âmbito do comportamento dinâmico de torres de telecomunicações e construções de elevada altura.....	2
1.3	Objetivos e conteúdos.....	11
CAPÍTULO 2	Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem.....	13
CAPÍTULO 3	Investigações anteriores na Torre do Monte da Virgem.....	17
3.1	Modelo numérico.....	17
3.2	Ensaio de vibração ambiental.....	20
3.3	Calibração experimental do modelo numérico.....	23
CAPÍTULO 4	Sistema de monitorização contínua.....	27
4.1	Descrição do Sistema.....	27
4.2	Componentes do sistema de monitorização.....	29
4.2.1	Anemómetros.....	29
4.2.2	Acelerómetros.....	31
4.2.3	Estação meteorológica.....	34
4.2.4	Sistema de aquisição de dados.....	35
CAPÍTULO 5	Análise dos resultados do sistema de monitorização contínua.....	37
5.1	Metodologia de caracterização dos eventos.....	37
5.2	Identificação dos eventos.....	42
5.2.1	Eventos críticos.....	42
5.2.2	Eventos esporádicos.....	47

ÍNDICE DE TEXTO

5.2.3	Eventos não críticos	48
5.3	Análise estatística da distribuição dos eventos críticos.....	50
CAPÍTULO 6	Considerações finais.....	53
6.1	Conclusões	53
6.2	Desenvolvimentos futuros	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema de monitorização da Torre de Cottbus.....	2
Figura 1.2 - Resposta dinâmica da torre devido a um evento de vento forte	3
Figura 1.3 - Resultados da análise modal (experimental e numérica)	4
Figura 1.4 – Torre de transmissão de Bengbu, China.....	4
Figura 1.5 - Frequências naturais e modos de vibração da torre de transmissão: a) 1º modo de vibração; b) 2º modo de vibração; c) 3º modo de vibração	5
Figura 1.6 - – Relação entre o deslocamento e a frequência de vibração da Torre de Bengbu	5
Figura 1.7 - Torre de Guangzhou, na China.....	6
Figura 1.8 - Modelo numérico da Torre de Guangzhou, China	7
Figura 1.9 - Republic Plaza, Singapura.....	8
Figura 1.10 - Variação das frequências de vibração ao longo do tempo na Torre de Guangzhou	8
Figura 1.11 - <i>World Financial Centre, Xangai, China</i>	9
Figura 1.12 - Anemómetros utilizados no <i>World Financial Center, Xangai</i>	10
Figura 1.13 - Modelo numérico do <i>World Financial Centre, Xangai</i>	10
Figura 2.1 – Torre do Monte da Virgem, em Vila Nova de Gaia.....	13
Figura 2.2 - Pisos técnicos da torre do Monte da Virgem	14
Figura 2.3 - Pormenor da ligação da estrutura da escada ao fuste de betão	14
Figura 2.4 - Dimensão em altura da torre metálica	15
Figura 2.5 - Pormenor da ligação da torre metálica ao fuste de betão	15
Figura 3.1 - Modelo numérico da Torre do Monte da Virgem	17
Figura 3.2 – Perfis metálicos de apoio das escadas da torre do Monte da Virgem	18
Figura 3.3 - Exemplo de um dos módulos da torre de betão.....	18

Figura 3.4 - Painéis dos pisos técnicos.....	19
Figura 3.5 - Modos de vibração da torre do Monte da Virgem.....	19
Figura 3.6 - Sismógrafo utilizado no ensaio de vibração ambiental.....	20
Figura 3.7 - Localização dos pontos de medição	21
Figura 3.8 - Espectro dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros na direção y22	
Figura 3.9 - Espectro dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros na direção x22	
Figura 3.10 – Frequências e modos de vibração obtidos através do ensaio de vibração ambiental.....	23
Figura 3.11 - Resultados da análise de sensibilidade	24
Figura 3.12 - Frequências de vibração numéricas e experimentais da torre do Monte da Virgem.....	24
Figura 3.13 - Comparação das configurações modais da torre experimental e numérica após a calibração	25
Figura 4.1 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização contínua (Leite et. al, 2017).....	28
Figura 4.2 - Ambiente de trabalho LabView	28
Figura 4.3 – Anemómetros; a) Localização dos anemómetros; b) instalação do anemómetro 1.....	30
Figura 4.4 - Pormenor de instalação dos anemómetros: a) vista lateral; b) vista frontal.....	30
Figura 4.5 – Proteção dos acelerómetros.....	32
Figura 4.6 - Posicionamento ótimo dos acelerómetros com base no modelo numérico calibrado da torre (Leite et al, 2017).....	33
Figura 4.7 - Instalação dos acelerómetros: a) acelerómetro instalado na viga travamento; b) acelerómetro instalado no piso técnico.....	33
Figura 4.8 - Sensores integrantes da estação meteorológica: a) sensor de temperatura e humidade; b) sensor pluviométrico; c) sensor para a medição da velocidade do vento; d) sensor para a medição da direção do vento	34
Figura 4.9 – Sistema de aquisição de dados Compact DAQ-9172, da National Instruments.....	35
Figura 4.10 - Esquema da implantação do sistema de monitorização contínua.....	36
Figura 5.1 – Exemplo de um registo de acelerações	37
Figura 5.2 - Introdução da condução da aceleração mínima para validação dos registos.....	38

Figura 5.3 - Início do ciclo da execução de gráficos representativos do movimento da Torre do Monte da Virgem	39
Figura 5.4 - Escala do eixo horizontal e vertical da representação gráfica dos acelerómetros	39
Figura 5.5 - Gráfico obtido através da rotina desenvolvida em MatLab para a caracterização de eventos	40
Figura 5.6 – Determinação da posição da torre do Monte da Virgem em coordenadas polares.....	40
Figura 5.7 - Filtragem dos 15 segundos anteriores e posteriores ao evento crítico atingir o valor máximo	41
Figura 5.8 - Representação da posição da Torre do Monte da Virgem, no dia 26 de agosto de 2017, às 11:00	41
Figura 5.9 - Representação do registo no dia 22 de novembro de 2017, entre as 16:26 e 17:26	42
Figura 5.10 – Resposta do acelerómetro 3, no sentido este – oeste, da Torre do Monte da Virgem no dia 25 de novembro de 2017, às 17:30.....	42
Figura 5.11 - Representação gráfica da aceleração máxima, registada no acelerómetro 3, às 18:12, no dia 25 de novembro de 2017	43
Figura 5.12 - Representação gráfica da resposta da Torre do Monte da Virgem no sentido N-S e O-E, no dia 25 de novembro de 2017, às 17:30.....	43
Figura 5.13 - Representação da resposta da torre, nas direções O-E e N-S, no dia 25 de novembro de 2017, às 17.30	44
Figura 5.14 - Medição da velocidade e direção do vento às 17:30, no dia 25 de novembro de 2017	44
Figura 5.15 - Medição da velocidade e direção do vento, anemómetro 2, às 17:30, no dia 25 de novembro de 2017	45
Figura 5.16 - Representação gráfica da aceleração máxima no acelerómetro 3, com a velocidade e direção do vento	45
Figura 5.17 - Movimento da torre do Monte da Virgem, no dia 25/11/2017, às 17:30	46
Figura 5.18 - Movimento da torre do Monte da Virgem, no dia 23/01/2018, às 21:00	47
Figura 5.19 – Evento esporádico	48
Figura 5.20 - Evento não crítico.....	49
Figura 5.21 - Representação das oscilações de um evento não crítico.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.22 - Representação dos eventos críticos que ocorreram desde 1 de agosto de 2017 até 31 de outubro de 2018..... 50

Figura 5.23 - Representação dos eventos críticos que ocorreram desde 1 de novembro de 2017 até 31 de janeiro de 2018 50

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do anemómetro.....	29
Tabela 4.2 - Especificações do acelerómetro.....	32

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a descoberta das ondas eletromagnéticas e da distância que estas podiam alcançar foi possível desenvolver meios que facilitaram as comunicações rádio e audiovisuais, de tal forma, que, atualmente, uma mensagem chega ao recetor de forma praticamente instantânea. Um dos meios de transmissão e receção dos dados contidos nestas ondas são as torres de telecomunicações que, com o objetivo de aumentarem o seu alcance, têm grandes dimensões em altura.

As torres de telecomunicações, devido à sua elevada altura, tendem a provocar um impacto visual na paisagem em que se inserem. A necessidade de alocar no topo destas torres os equipamentos indispensáveis à sua função, fazem com que aí estejam localizadas massas de elevada grandeza. Esta situação condiciona o dimensionamento estrutural das torres de telecomunicações, as quais, na sua grande maioria, são construídas com recurso a secções ocas de betão armado ou metálicas de elevada esbelteza.

As torres de telecomunicações são estruturas que se encontram espalhadas por todo o mundo e têm sido alvo de estudos com o objetivo de avaliar o seu comportamento dinâmico sob a ação do vento, em particular na ocorrência de eventos extraordinários associados a ventos fortes, ciclones, entre outros.

Em Portugal esses estudos estão a ser realizados na Torre de telecomunicações do Monte da Virgem, em Vila Nova de Gaia, no âmbito de uma parceria de investigação e desenvolvimento estabelecida entre o ISEP e a Altice, e que decorre desde o ano 2016, com o objetivo de caracterizar a resposta dinâmica da estrutura sob ação do vento. Este estudo é baseado nos dados recolhidos por um sistema de monitorização contínua constituído por acelerómetros, anemómetros e uma estação meteorológica.

Na torre do Monte da Virgem, de acordo com estudos anteriores, têm-se registado com alguma regularidade eventos de vibração excessiva que têm requerido várias operações de inspeção e manutenção da torre. Este comportamento encontra-se associado à atuação de regimes de vento específicos.

Além disso as vibrações excessivas da estrutura impõem limitações no que toca a usos alternativos da estrutura, nomeadamente, quando essa nova utilização requer maiores exigências em relação ao conforto dos utilizadores, como é o caso do seu reaproveitamento turístico.

1.2 INVESTIGAÇÕES NO ÂMBITO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES E CONSTRUÇÕES DE ELEVADA ALTURA

Beirow e Osterreider (2001) desenvolveram um estudo na Torre de Telecomunicações de Cottbus, na Alemanha. O estudo envolveu a instalação de um sistema de monitorização (figura 1.1) que permitiu a caracterização das vibrações da estrutura de betão e da velocidade e direção do vento por intermédio de geofones e anemómetros, que foram instalados do longo da altura da torre.

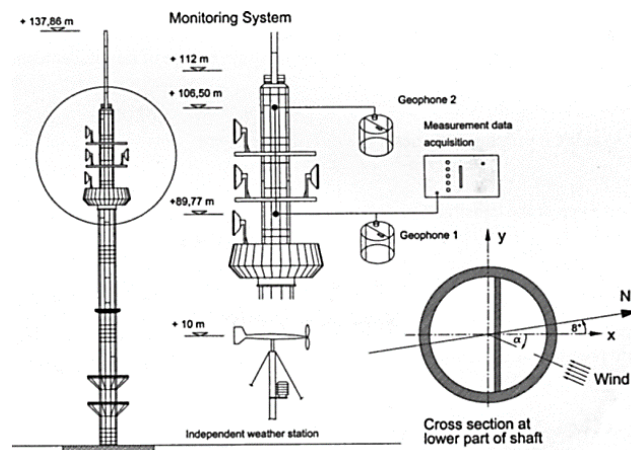


Figura 1.1 - Sistema de monitorização da Torre de Cottbus

O estudo contribuiu para um melhor conhecimento acerca dos fenómenos de vibrações excessivas induzidas pelo vento, e a sua influência na manutenção da estrutura. As vibrações excessivas da torre, em algumas situações da ordem de 3 m/s^2 , e detetadas pelos vários geofones posicionados ao longo do fuste em betão, foram associadas ao desprendimento de vórtices na antena metálica localizada na parte superior da torre. O estudo permitiu ainda a avaliação do conforto do pessoal técnico durante os eventos de vibração da torre, classificado de satisfatório, e viabilizou o aumento da sua capacidade de transmissão, por intermédio do aumento do número de plataformas externas, mesmo durante ocorrência de fenómenos de vibração excessiva. Concluiu-se ainda que a torre de telecomunicações não apresentava danos estruturais significativos.

Breuer et al. (2008) realizaram ensaios dinâmicos na torre de televisão de Estugarda, na Alemanha, que possibilitaram a medição dos deslocamentos no topo da torre causados pela ação do vento e pela influência combinada da radiação solar e da variação diária da temperatura do ar, durante diferentes

estações do ano e condições climáticas. Os resultados dos ensaios demonstraram que os valores do deslocamento, assim como o valor frequência fundamental da torre (0,19 Hz), eram idênticos aos valores estimados experimentalmente 50 anos antes, revelando que a condição estrutural permanece inalterada.

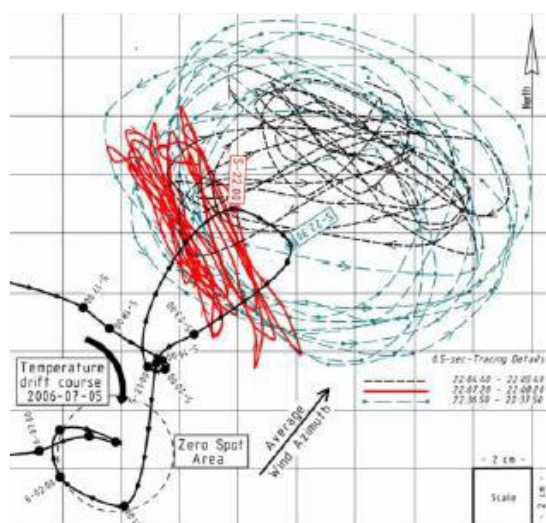


Figura 1.2 - Resposta dinâmica da torre devido a um evento de vento forte

A título exemplificativo ilustra-se na figura 1.2 a resposta dinâmica da estrutura no decorrer de um evento de ventos fortes. Através da análise do diagrama constata-se que um evento de ventos fortes com velocidade de 61.2 Km/h, vindo de sudoeste, provocou um deslocamento no topo da torre de 6 cm na direção nordeste.

Em 2011 foram analisadas, em Portugal, duas torres de telecomunicações (Antunes et al., 2012) construídas em secções de aço e com fundações em sapatas de betão. Esta investigação consistiu em realizar vários ensaios de vibração ambiental baseados em acelerómetros de fibra ótica. Os resultados das frequências obtidas experimentalmente sob ações ambientais do vento, permitiram concluir que o primeiro modo de vibração era o preponderante na resposta dinâmica da estrutura. A comparação dos resultados de uma análise modal numérica, através de um modelo numérico de Elementos Finitos e experimental permitiu obter uma razoável/ boa aproximação das frequências e modos de vibração das torres (figura 1.3).



Figura 1.3 - Resultados da análise modal (experimental e numérica)

As frequências numéricas e experimentais apresentam diferenças relativas na ordem dos 10%. Tais diferenças foram justificadas com uma distribuição de massas inadequada, uma estimativa exagerada da rigidez da estrutura e a provável deterioração das ligações da estrutura.

Fei et al. (2011) estudaram uma torre de transmissão de eletricidade localizada na cidade chinesa de Bengbu, com o objetivo de avaliar a sua deterioração estrutural ao longo do tempo e quantificar os deslocamentos da estrutura sob a ação do vento. Esta torre, representada na figura 1.4, foi construída em 2017, com uma altura de 131 m, uma base quadrada de 26 m de lado sendo constituída por perfis tubulares de aço.

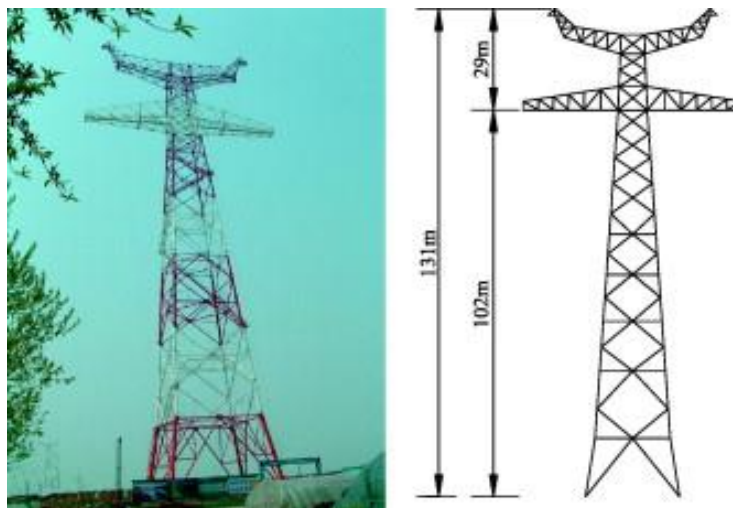


Figura 1.4 – Torre de transmissão de Bengbu, China

O estudo consistiu na elaboração de um modelo numérico da estrutura, que permitiu a determinação dos principais modos de vibração e correspondentes frequências. Este modelo serviu de base para implementação de um sistema de monitorização do estado de conservação da torre. O modelo numérico e os três primeiros modos de vibração encontram-se representados na figura 1.5.

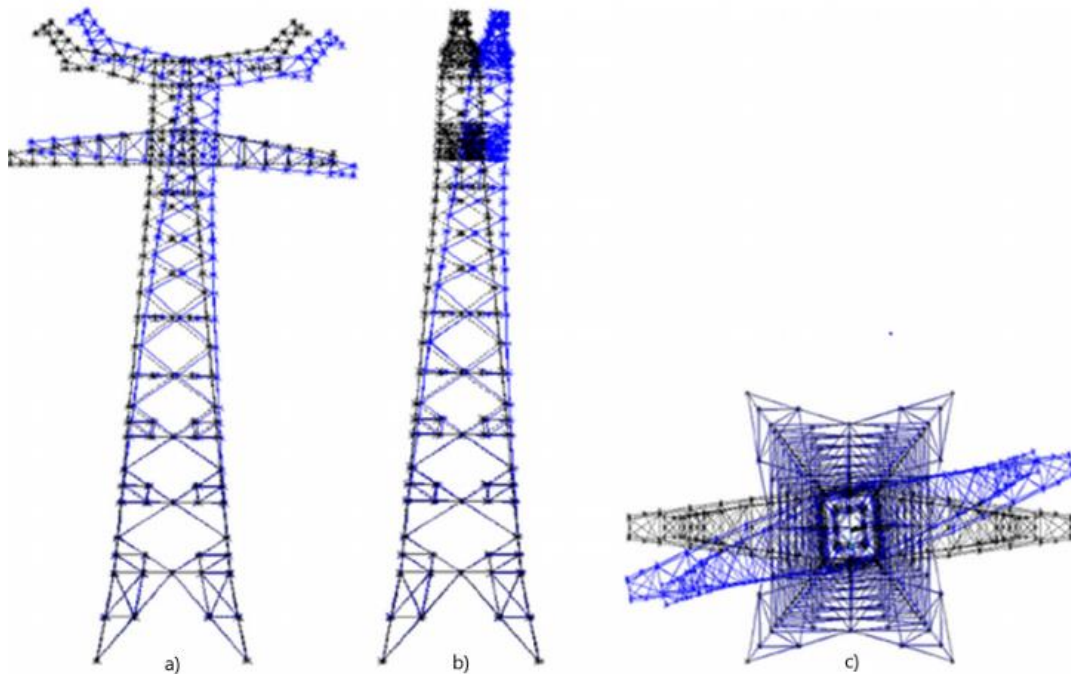


Figura 1.5 - Frequências naturais e modos de vibração da torre de transmissão: a) 1º modo de vibração; b) 2º modo de vibração; c) 3º modo de vibração

O estudo permitiu verificar que para um regime específico de vento, neste caso com velocidades compreendidas entre os 144 km/h a 162 km/h, existe uma forte redução da frequência de vibração associado além de um aumento significativo do deslocamento da torre, sobretudo devidos à significativa interação aerodinâmica entre a estrutura e o fluido (vento). Esta relação encontra-se demonstrada nos gráficos da figura 1.6.

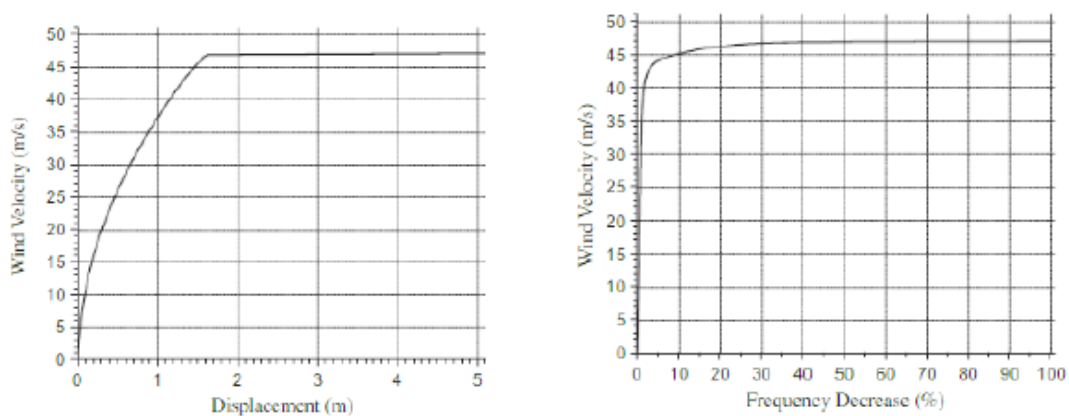


Figura 1.6 -- Relação entre o deslocamento e a frequência de vibração da Torre de Bengbu

Outra estrutura de referência é a Torre de Guangzhou, na China, representada na figura 1.7. Este edifício possui uma altura de 600 m, dos quais 454 m são em betão armado e os restantes 166 m em estrutura metálica. A secção da torre é tubular com uma estrutura metálica pelo exterior.



Figura 1.7 - Torre de Guangzhou, na China

Nesta torre foi instalado um sistema de monitorização que teve como objetivo avaliar a integridade estrutural da torre (Chen et al., 2011). Trata-se de um sistema complexo constituído por mais de 800 sensores incluindo estações meteorológicas, anemómetros, teodolitos, sensores de nível, termómetros, GPS, acelerómetros, sismógrafos, entre outros. No total encontram-se instalados 16 tipos de sensores.

A principal diferença deste sistema de monitorização em relação aos anteriormente enumerados, baseia-se no facto do sistema ter acompanhado a construção da estrutura que foi concluída em agosto de 2010. Isto permitiu obter um histórico alargado da resposta da torre e desenvolver um modelo numérico calibrado da estrutura, cuja configuração final é representada na figura 1.8.



Figura 1.8 - Modelo numérico da Torre de Guangzhou, China

O modelo numérico possibilitou a comparação dos parâmetros modais numéricos e experimentais, durante a construção, tendo-se uma boa aproximação.

Na figura 1.9, encontra-se representada a variação das frequências dos primeiros quatro modos de vibração em função do período de construção do edifício, resultantes da análise numérica e experimental, onde se pode verificar a diminuição das frequências ao longo do tempo e a aproximação dos resultados numéricos e experimentais

Com base nas acelerações medidas em diferentes locais ao longo da altura da torre, o sistema de monitorização detetou ainda com sucesso vários tipos de eventos extraordinários nomeadamente relacionados com a ocorrência de sismos, ventos fortes e tufões. O desempenho da torre sob a ação de tufões foi considerado satisfatório considerando um intervalo de confiança de 90% em relação ao limite regulamentar.

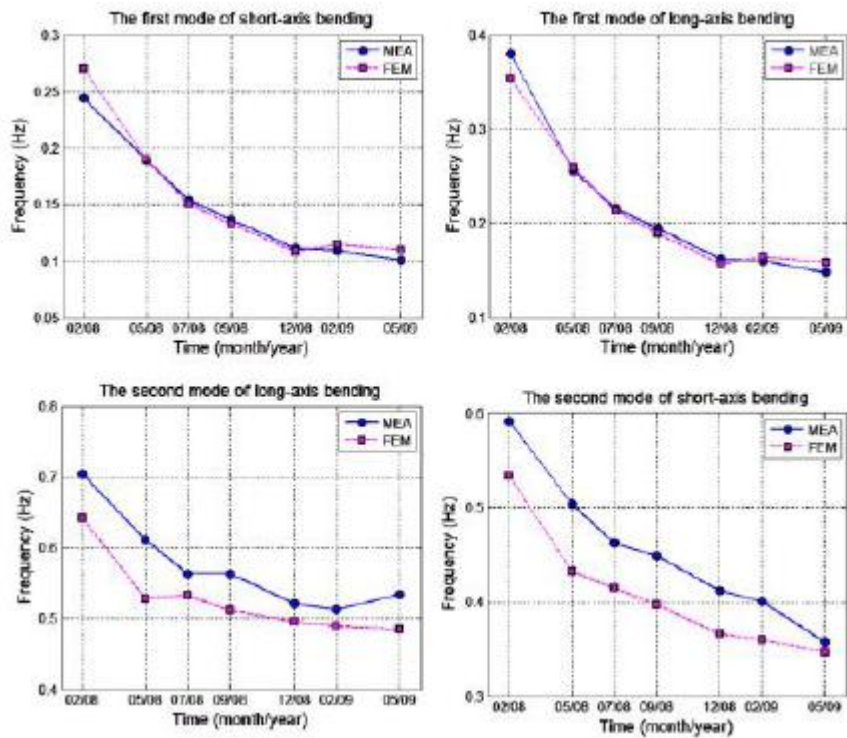


Figura 1.10 - Variação das frequências de vibração ao longo do tempo na Torre de Guangzhou

Brownjohn e Pan (2001), estudaram dois edifícios de grande altura localizados em Singapura, com o objetivo de detetarem a ocorrência de sismos e permitirem a atualização das normas em vigor para o dimensionamento de estruturas sismo-resistentes. O primeiro edifício onde se realizou o estudo foi uma estrutura habitacional de 26 andares, construída em betão armado e o segundo, o edifício Republic Plaza, constituído por paredes resistentes de betão armado e uma estrutura de aço, representado na figura 1.10.



Figura 1.9 - Republic Plaza, Singapura

Este estudo foi dividido em duas fases distintas. Inicialmente, foi instalado no primeiro edifício um sistema de monitorização continua constituído por dois acelerómetros, um anemómetro e um computador ligado a um sistema de aquisição de dados. O sistema registou as acelerações, velocidades e direções do vento, durante um período de, aproximadamente 3 anos. Na segunda fase o sistema de monitorização foi melhorado, tendo-se acrescentado mais dois acelerómetros, anemómetros em todas as faces do edifício, além de se ter utilizado uma frequência de aquisição mais elevada.

No final do estudo os investigadores concluíram que os sistemas de monitorização instalados nos edifícios forneceram dados limitados em relação à caracterização da ação sísmica, no entanto foram obtidos dados relevantes sobre a ação do vento.

Um outro estudo realizado para avaliar a influência do vento em estruturas de grande altura foi conduzido por Quan et al., no *World Financial Center*, um de edifício de 492m de altura, localizado em Xangai, na China, representado na figura 1.11.



Figura 1.11 - *World Financial Centre*, Xangai, China

Neste edifício foi instalado um sistema de monitorização da velocidade do vento e a das vibrações da estrutura. Os anemómetros, ilustrados na figura 1.12, utilizados para medir a velocidade e direção do

vento, foram instalados no topo do edifício e posicionados a nordeste e a sudoeste. Os acelerómetros, usados para medição da aceleração da torre, foram instalados a uma altura de 475 m, no 98º andar.



Figura 1.12 - Anemómetros utilizados no *World Financial Center*, Xangai

A análise dos dados recolhidos permitiu a avaliação da velocidade média, e, sobretudo a identificação de regimes de vento esporádicos e fenómenos turbulentos.

Os registos das acelerações permitiram ainda identificar por via experimental as frequências e os modos de vibração da estrutura que foram também comparados com um modelo numérico do edifício, representado na figura 1.13a). Nesta figura pode-se ainda um modo de flexão global (figura 1.13b)) e um modo de torção (figura 1.13c)).

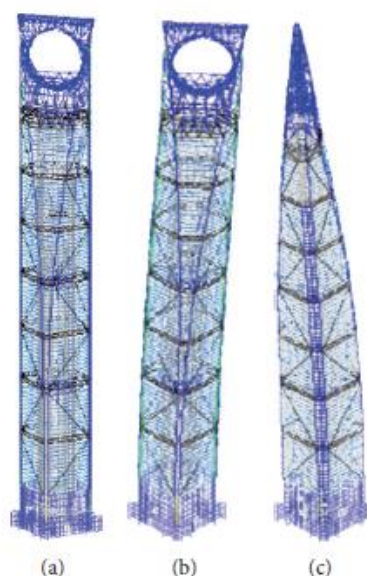


Figura 1.13 - Modelo numérico do *World Financial Centre*, Xangai

Ainda no âmbito deste estudo foram obtidas respostas dinâmicas experimentais para casos específicos de direção e velocidade do vento, e com as respostas obtidas por intermédio de uma simulação numérica em túnel de vento, recorrendo ao método CFD (*Computational Fluid Dynamics*), o que permitiu a validação do modelo numérico, uma vez que os resultados medidos e os previstos foram muito idênticos.

1.3 OBJETIVOS E CONTEÚDOS

A presente dissertação tem como principal objetivo a caracterização do comportamento dinâmico da torre de telecomunicações do Monte da Virgem sob a ação do vento.

Esta caracterização envolve a análise dos registos de acelerações, velocidades e direção de vento medidos por um sistema de monitorização contínua durante um período de tempo alargado.

Durante esta análise pretende-se identificar situações onde a resposta da estrutura surge amplificada devida à atuação de regimes específicos de ventos, denominados de eventos críticos.

Neste contexto, será apresentado o desenvolvimento de ferramentas computacionais que possibilitam a caracterização automática do número, amplitude e duração dos eventos críticos e a sua relação com a velocidade e direção do vento.

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No Capítulo 1 foi realizada a contextualização do assunto, onde se apresentaram estudos realizados no âmbito de investigações ao comportamento dinâmico de torres de telecomunicações e edifícios altos.

No Capítulo 2 é apresentada a torre e descritos os principais elementos estruturais.

Nos Capítulos 3 e 4 é realizada a descrição de investigações anteriores na torre do Monte da Virgem. No Capítulo 3 é descrita a correlação entre resultados modais obtidos por via numérica e experimental, tendo em vista a caracterização das frequências e os modos de vibração da estrutura. No Capítulo 4 é descrito sistema de monitorização contínua, fazendo referência aos seus constituintes e à forma como estes foram instalados e ligados entre si.

No Capítulo 5 é realizada a análise dos registos do sistema de monitorização contínua, com base nas ferramentas desenvolvidas para identificação e caracterização dos eventos críticos.

Por último, no Capítulo 6 serão apresentadas as principais conclusões e desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

A Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem localiza-se em Vila Nova de Gaia e a sua construção foi concluída em 1995. A torre é utilizada como transmissor de sinais de rádio e televisão para a zona centro e norte de Portugal, e, é uma das estruturas mais altas de Portugal. A figura 2.1 representa uma fotografia aérea da estrutura.



Figura 2.1 – Torre do Monte da Virgem, em Vila Nova de Gaia

A estrutura da torre é constituída por um fuste de betão de 126 m de altura e por uma torre metálica com 51 m, perfazendo uma altura total de 177 m.

O fuste de betão armado apresenta a forma de um hiperboloide, com uma secção circular, que possui diâmetro variável, 14.3 m na base e 7.7m no topo. A espessura da parede é variável, entre 40 cm, na base, e 30 cm no topo. O fuste apresenta 5 pisos técnicos, formados por uma laje em consola em betão armado, apresentados na figura 2.2



Figura 2.2 - Pisos técnicos da torre do Monte da Virgem

No interior do fuste existe uma caixa de elevador e uma escada metálica que se encontram apoiados na parede do fuste por intermédio de vigas metálicas de travamento em perfis do tipo HEA. A ligação da estrutura metálica ao fuste de betão encontra-se representada na figura 2.3.



Figura 2.3 - Pormenor da ligação da estrutura da escada ao fuste de betão

A torre metálica apresenta uma estrutura metálica em treliça, constituída por três troços distintos. Cada troço serve para transmissão de ondas FM, VHF e UHF. O primeiro corresponde ao sistema de transmissão FM, com secção transversal de quadrada 2.20 m de lado e uma altura de 23 m. O segundo serve de suporte ao sistema VHF, tem uma altura de 17 m e secção transversal quadrada de 1.20 m de lado. O último troço está reservado para o sistema UHF, com secção transversal de 0.64 m de lado, conforme representado na figura 2.4.

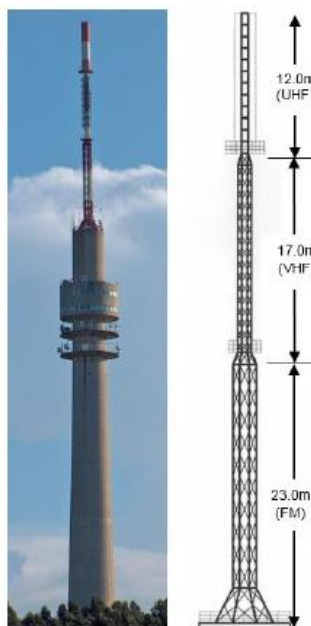


Figura 2.4 - Dimensão em altura da torre metálica

A torre metálica encontra-se ligada ao fuste de betão através de uma base octogonal, e por intermedio de chumbadouros. A transição entre estas duas estruturas é realizada por meio de uma laje de betão. O pormenor da ligação da estrutura metálica ao fuste de betão, encontra-se representada na figura 2.5.



Figura 2.5 - Pormenor da ligação da torre metálica ao fuste de betão

CAPÍTULO 3

INVESTIGAÇÕES ANTERIORES NA TORRE DO MONTE DA VIRGEM

Neste capítulo são descritos alguns trabalhos anteriormente desenvolvidos no âmbito do projeto de investigação e desenvolvimento ISEP - ALTICE e enquadrados no estudo do comportamento dinâmico da torre de telecomunicações do Monte da Virgem sob ação do vento.

Em particular, é apresentado o desenvolvimento de um modelo numérico de elementos finitos, que permitiu estimar as frequências e modos de vibração da estrutura. complementarmente foi também realizado um ensaio de vibração ambiental com o objetivo de avaliar os parâmetros modais experimentais. O modelo numérico foi calibrado, por aplicação de técnicas de otimização baseadas num algoritmo genético que minimizaram as diferenças entre os resultados numéricos e experimentais (Ribeiro et al., 2017).

3.1 MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi desenvolvido no âmbito da dissertação de mestrado realizada por Pauli (2016), e realizado com recurso ao *software Robot Structural Analysis*, da Autodesk (figura 3.1).

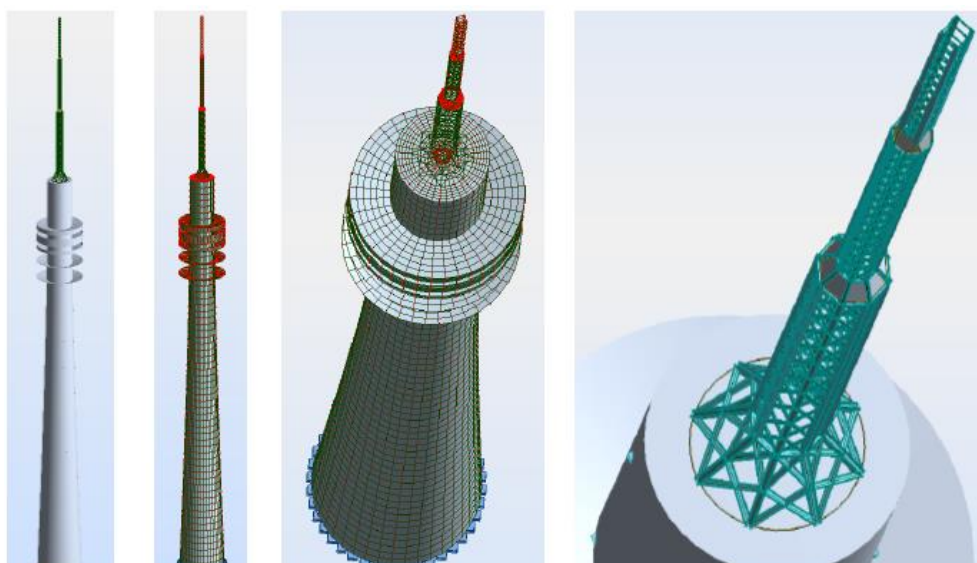


Figura 3.1 - Modelo numérico da Torre do Monte da Virgem

O modelo foi desenvolvido respeitando todas as secções e materiais dos elementos estruturais que constam no projeto (Pauli, 2016). No entanto, medições efetuadas no local demonstraram diferenças nas dimensões de alguns elementos, nomeadamente, os referentes ao fuste de betão e que foram corrigidas no modelo numérico.

No que diz respeito à estrutura metálica no interior do fuste de betão, apenas foram modeladas as vigas de travamento que servem de apoio às escadas, uma vez que estes perfis podem influenciar a rigidez da estrutura devido ao seu efeito de contraventamento do fuste de betão. Foi assumida uma ligação rotulada na ligação dos perfis ao fuste de betão. Na figura 3.2 ilustra-se a representação desses perfis.

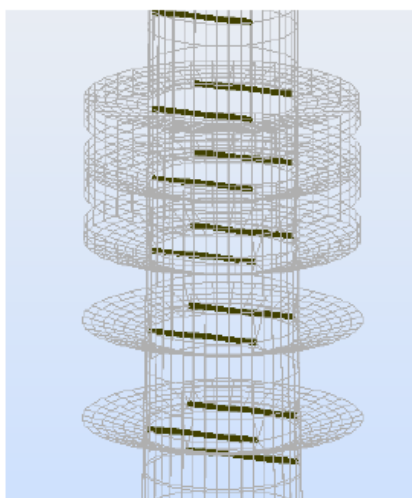


Figura 3.2 – Perfis metálicos de apoio das escadas da torre do Monte da Virgem

A massa associada à estrutura metálica do elevador e das escadas foi posicionada ao nível dos perfis metálicos de travamento e por intermédio de elementos finitos de massa.

O fuste de betão foi modelado através de módulos circulares em elementos finitos de casca, com diferentes características geométricas em altura. Em particular, os módulos variam de espessura desde a base até ao topo da torre. Na figura 3.3 encontra-se representado um desses módulos.

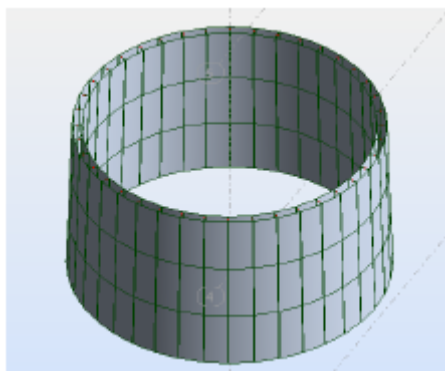


Figura 3.3 - Exemplo de um dos módulos da torre de betão

No que diz respeito aos pisos técnicos a laje foi modelada como um único painel através de elementos finitos de casca. Nos pisos técnicos que se encontram envoltos em parede foi utilizado um painel vertical de contorno em elementos finitos de casca, conforme indicado na figura 3.4.

O modelo numérico da torre do Monte da Virgem é constituído por 5618 nós, 702 barras e 49 painéis. A

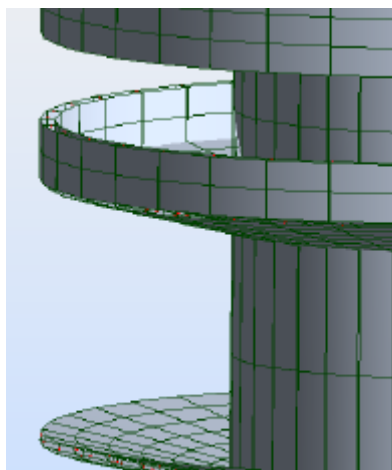


Figura 3.4 - Painéis dos pisos técnicos

malha de elementos finitos foi definida com recurso ao método de Coons e utilizando quadriláteros.

A torre metálica foi modelada por intermédio de elementos finitos de barra e a ligação da torre com o fuste em betão foi assumida monolítica.

Após a conclusão do modelo numérico foi executada uma análise modal, com o objetivo de estimar as frequências e os modos de vibração da estrutura.

Dos diversos modos identificados apenas os quatro primeiros foram considerados no estudo, uma vez que eram estes onde a maior massa era mobilizada (figura 3.5).

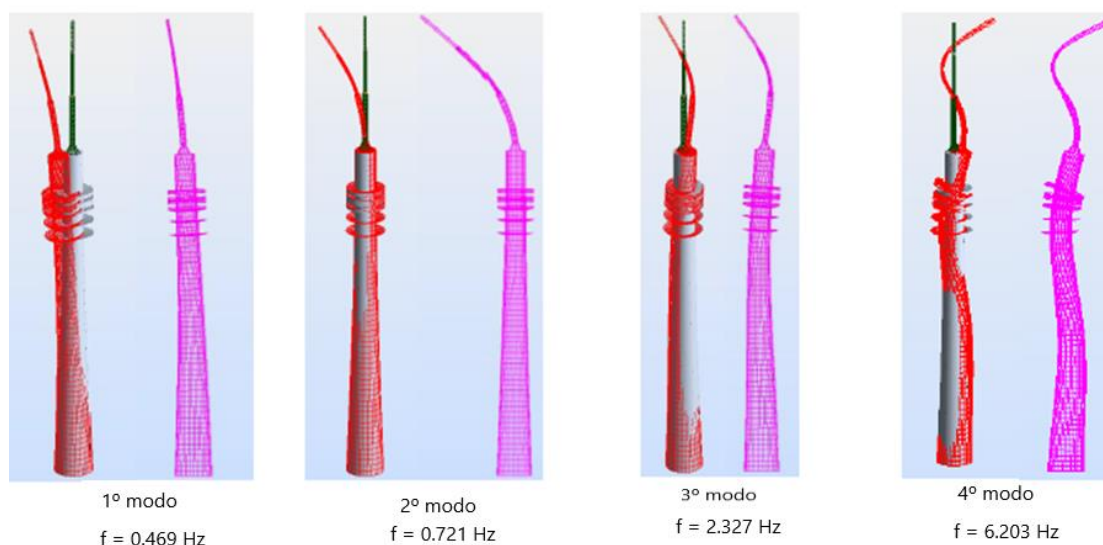


Figura 3.5 - Modos de vibração da torre do Monte da Virgem



3.2 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

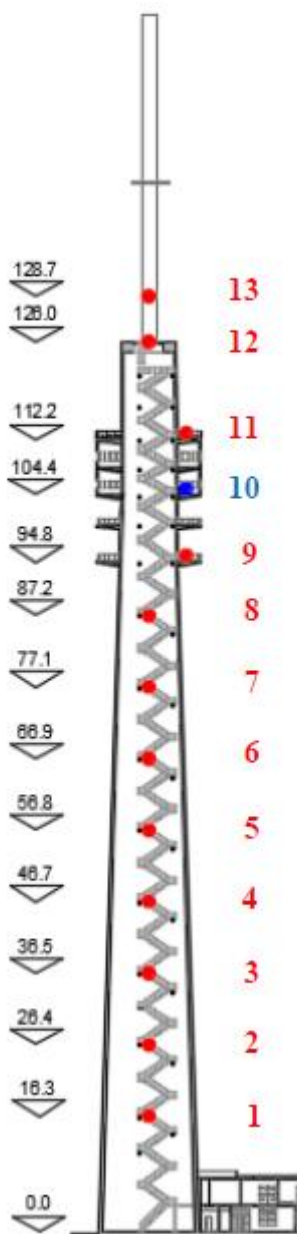
O ensaio de vibração de ambiental teve como objetivo avaliar os parâmetros modais da torre, tendo em vista a calibração do modelo numérico de elementos finitos.

Neste ensaio foram utilizados dois sismógrafos da marca GeoSIG, modelos GMS Plus, do tipo representado na figura 3.6. Estes sismógrafos, estão equipados com sincronização GPS, o que permite que os dois dispositivos estejam sincronizados no mesmo horário, o que viabiliza que os registos das acelerações sejam apresentados no mesmo instante. Além disso possuem uma frequência de aquisição de 200 Hz e uma gama de medição de +/- 0.5g.

As acelerações foram medidas em duas direções ortogonais (x e y), e foram realizados registos em 13 pontos, 12 localizados no fuste betão e 1 na torre metálica, uma vez que o difícil acesso à torre metálica e a interferência das ondas eletromagnéticas limitaram a colocação dos sensores em toda a altura da estrutura.

Neste ensaio foram realizadas 12 configurações experimentais, considerando um ponto de referência fixo, localizado num dos pisos técnicos à cota 312.6m (ponto 10), conforme representado na figura 3.7. Os pontos móveis de medição 1 a 8 foram colocados nas vigas de travamento da escada metálica. Os pontos móveis 9, 11 e 12, foram posicionados no pavimento dos pisos técnicos e, por último o ponto móvel de medição 13, localizado a 2.7m da base da torre metálica (Ribeiro et al, 2017).

Figura 3.6 - Sismógrafo utilizado no ensaio de vibração ambiental



A identificação dos parâmetros modais foi realizada através da aplicação do método avançado da decomposição do domínio da frequência, com recurso ao programa Artemis (Ribeiro et al., 2017).

Os espectros dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros encontram-se representados nas figuras 3.8 e 3.9, para as direções x e y, respetivamente. Da análise dos espectros nas

Figura 3.7 - Localização dos pontos de medição

direções x e y é possível constatar que a identificação dos parâmetros modais na direção y foi dificultada pelo facto do nível de excitação nesta direção ser inferior ao verificado na direção x.

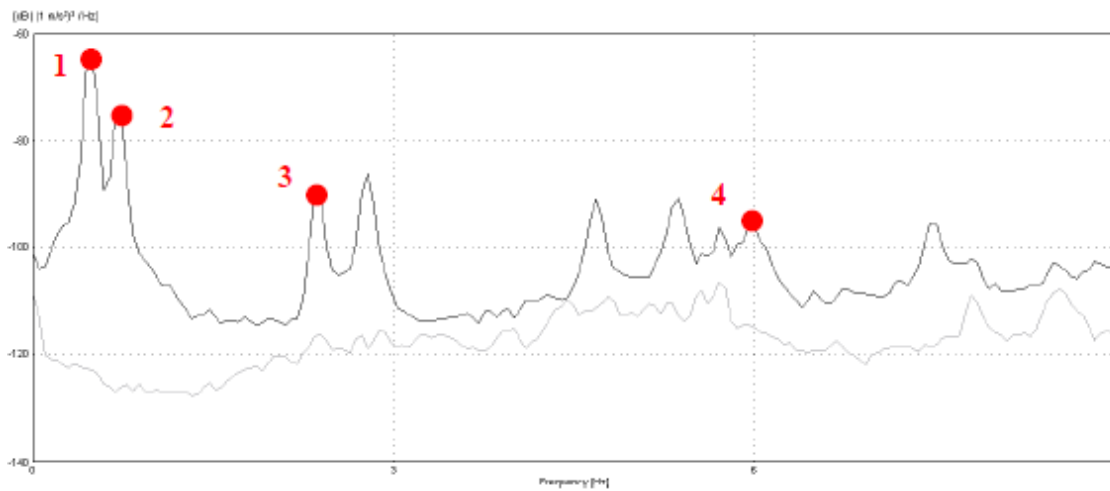


Figura 3.9 - Espectro dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros na direção x

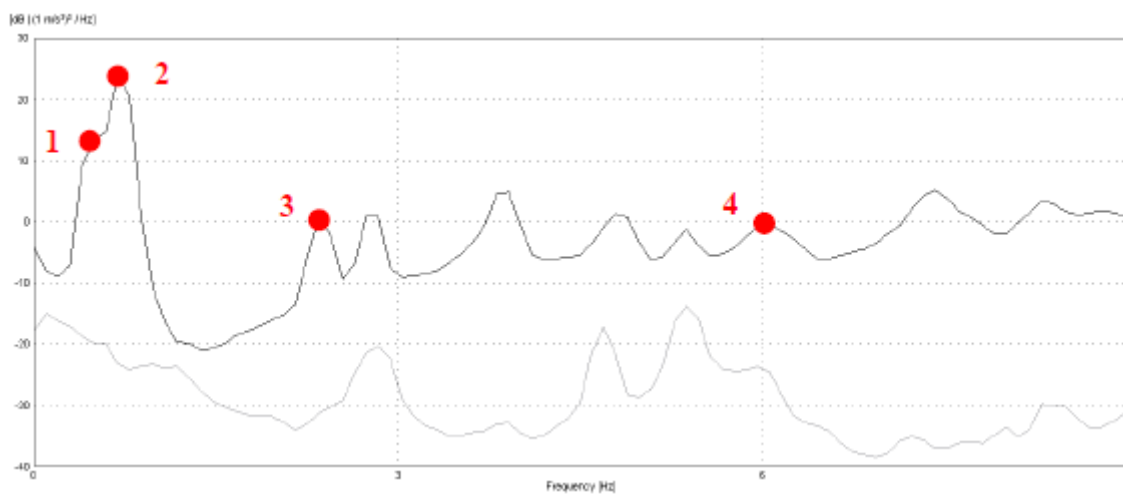


Figura 3.8 - Espectro dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros na direção y

Da aplicação desta técnica de identificação modal, resultou a identificação de 4 modos vibração associados à flexão da estrutura. O 1º modo envolve, maioritariamente, a flexão do fuste de betão, que induz por compatibilidade estrutural o movimento da torre metálica. O 2º modo envolve a flexão local da torre metálica, e os 3º e 4º modos, envolvem a flexão do fuste de betão. A representação dos modos de vibração e os respetivos valores constam da figura 3.10.

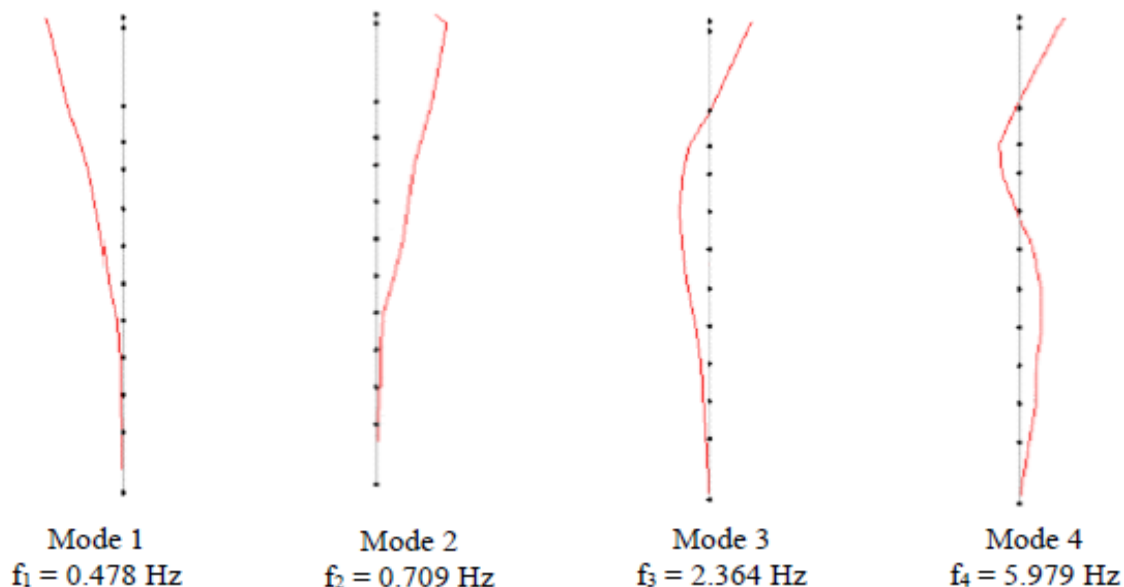


Figura 3.10 – Frequências e modos de vibração obtidos através do ensaio de vibração ambiental

3.3 CALIBRAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO NUMÉRICO

As análises modais realizadas por via experimental e numérica apresentaram diferenças nos resultados, tornando-se necessário minimizar as diferenças entre as respostas modais obtidas através do modelo numérico e as respostas modais experimentais. Esta calibração envolveu a realização de uma análise de sensibilidade e a aplicação de um processo de otimização baseado num algoritmo genético.

Inicialmente, foi executada uma análise de sensibilidade que teve como objetivo identificar os parâmetros modais que mais influenciam a resposta dinâmica da torre do Monte da Virgem.

Da análise realizada foi possível identificar que o módulo de elasticidade ($E_{c,s}$) e a densidade do fuste betão ($\rho_{c,s}$), o módulo de elasticidade da torre metálica (E_s) e a sua respetiva densidade (ρ_s) são os parâmetros que mais influenciam os parâmetros modais da torre. Na figura 3.11, apresentam-se os resultados da análise de sensibilidade sob a forma de uma matriz de correlação de Spearman.

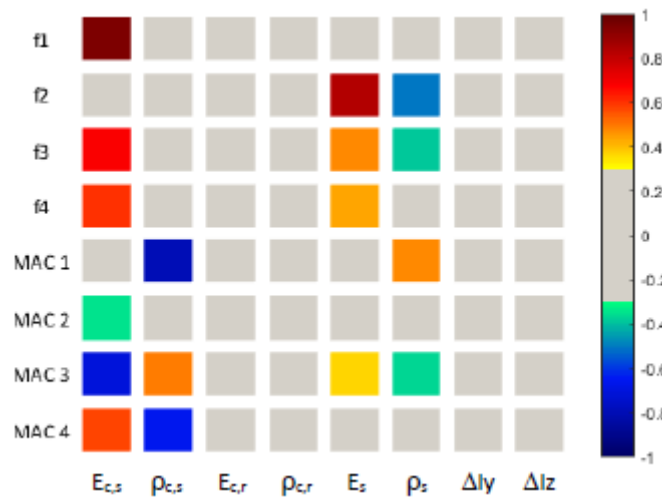
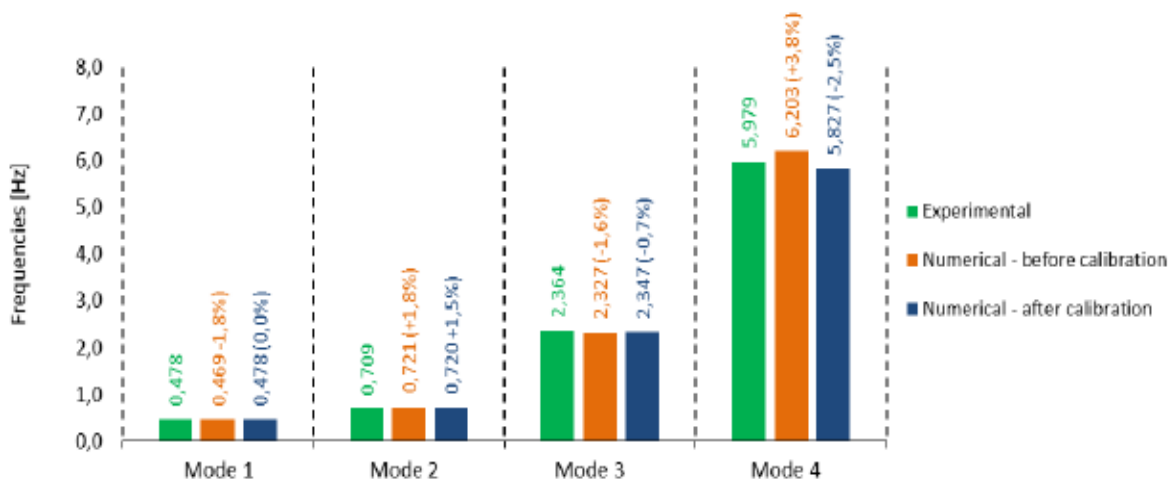


Figura 3.11 - Resultados da análise de sensibilidade

Estes parâmetros foram os utilizados na fase seguinte de otimização que consistiu na alteração dos seus valores com base nas indicações de um algoritmo de otimização e de modo a minimizar as diferenças entre os parâmetros modais numéricos e experimentais. Para o efeito foi definida uma função objetivo onde se incluíram os resíduos associados às frequências e configurações modais.

Com recurso à calibração automática do modelo numérico foi possível aproximar os valores das frequências numéricas aos obtidos no ensaio de vibração ambiental, diminuindo esta diferença de 2.2% para 1.2%, em média. Na figura 3.12, encontra-se representada a variação das frequências do modelo numérico antes da calibração, a laranja e depois da calibração, a azul, em comparação com os resultados



experimentais, a verde.

Figura 3.12 - Frequências de vibração numéricas e experimentais da torre do Monte da Virgem

A representação da deformada dos principais modos de vibração, permite confirmar a fiabilidade e robustez da calibração do modelo numérico, pois como se verifica na figura 3.13, as configurações modais são muito semelhantes.

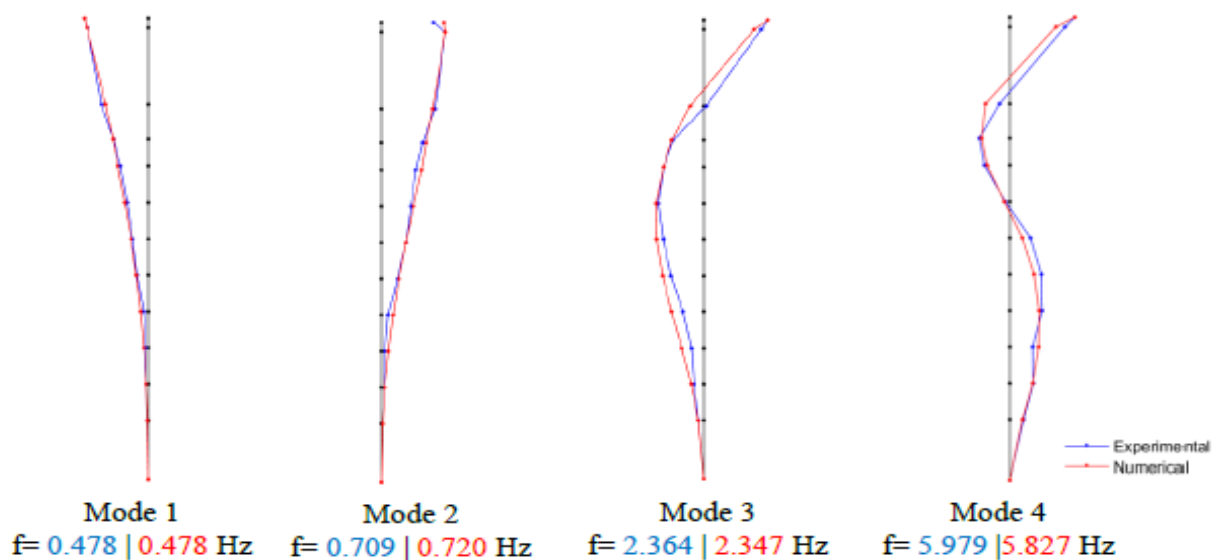


Figura 3.13 - Comparação das configurações modais da torre experimental e numérica após a calibração

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para caracterizar os efeitos dinâmicos da ação do vento na torre do Monte da Virgem foi instalado um sistema de monitorização que regista a velocidade e direção do vento, a aceleração da torre e temperatura

O sistema inclui sensores que captam as respostas da estrutura sob a ação do vento, com base na conversão de sinais analógicos em sinais digitais, que são processados de forma a permitir a análise das respostas em unidades físicas. Por exemplo a medição da aceleração em g. Este processo é designado por aquisição de dados.

Neste contexto foram colocados na torre quatro acelerómetros piezoelétricos, dois anemómetros e uma estação meteorológica.

A aquisição dos sinais provenientes dos acelerómetros e anemómetros foi realizada através de um sistema de aquisição de dados da National Instruments, modelo NI cDAQ-9172. Os sensores estão ligados ao sistema de aquisição, por meios de cabos que transmitem o sinal por analógica, sendo a conversão A/D realizada em módulos do sistema de aquisição. O sistema está conectado por ligação USB a um computador, localizado no piso técnico da torre à cota 312.65 m. Este computador encontra-se ligado à Internet através de um router.

A estação meteorológica encontra-se ligada por USB ao computador. Na figura 4.1 encontra-se representado o esquema de funcionamento do sistema de monitorização contínua.

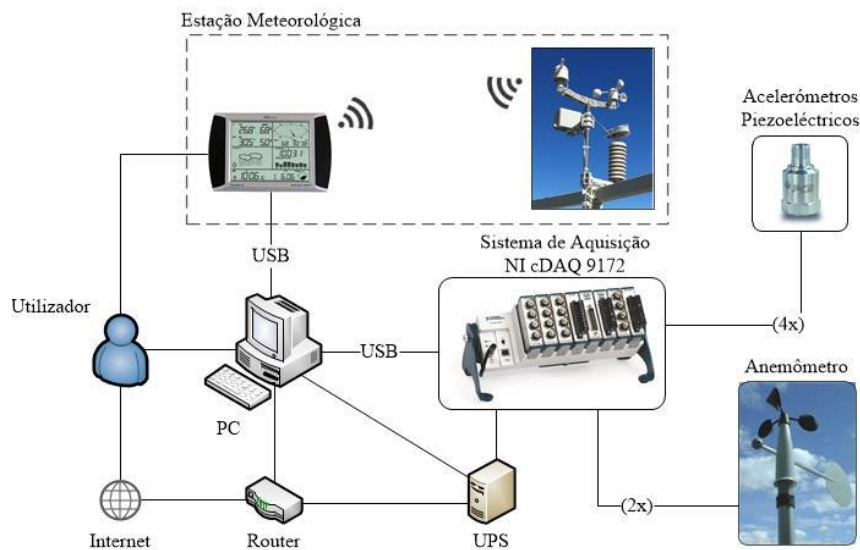


Figura 4.1 - Esquema de funcionamento do sistema de monitorização contínua (Leite et. al, 2017)

A leitura e interpretação dos dados fornecidos pelo sistema de aquisição envolveu o desenvolvimento de um programa com a capacidade de converter o sinal digital do sistema de aquisição em ficheiros de texto. Assim, foi desenvolvido em ambiente LabView (figura 4.2) um programa de aquisição e processamento de dados (Pauli 2016). Desta forma os dados recolhidos pelo sistema de aquisição são guardados em ficheiros de texto, onde são criados dois documentos em separado nos quais ficam armazenados os registos das acelerações, no caso dos acelerómetros, e das velocidades e direcções do vento, no caso dos anemómetros, conforme ilustrado na figura 4.2.

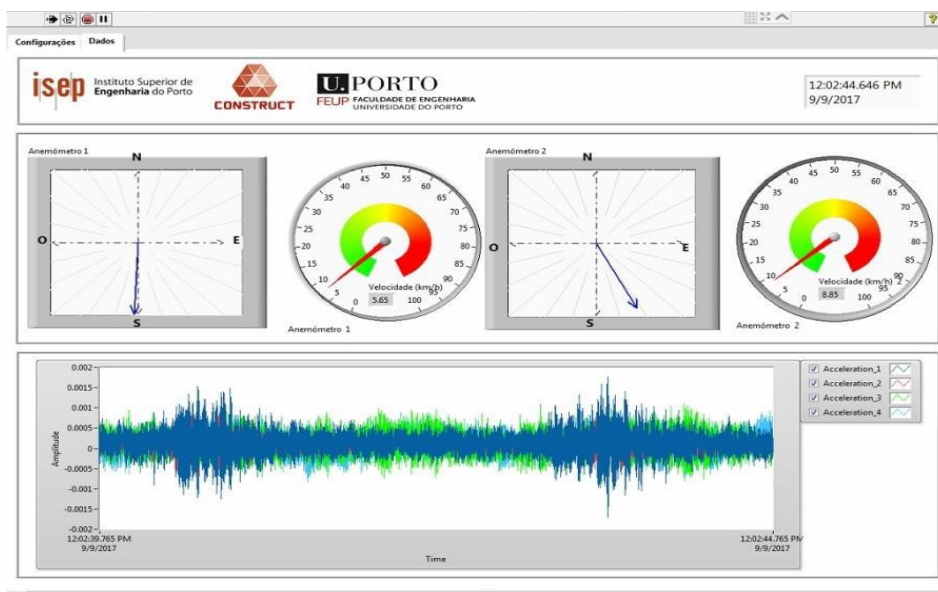


Figura 4.2 - Ambiente de trabalho LabView


4.2 COMPONENTES DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

4.2.1 Anemómetros

O anemómetro instalado na torre foi da marca Vaisala, modelo WM302. Este modelo é constituído por três sensores. O primeiro sensor permite o registo da velocidade do vento, através de impulsos emitidos com uma frequência de 0.5 Hz.

Os restantes dois sensores são potenciómetros e são responsáveis pelo registo da direcção do vento. Cada um dos potenciómetros completa um ciclo de 180°, permitindo obter uma leitura em 360°. Estes são alimentados com corrente eléctrica, tensão 7,5 V, possibilitando a leitura de um ângulo em correspondência com a direcção do vento. As principais características técnicas do anemómetro estão indicadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do anemómetro

ANEMÓMETRO VAISALA WM302						
	Fabricante	Gama de medição	Erro de medição		Frequência de aquisição	Alimentação
			0.5 a 10 m/s	10 a 60 m/s		
	Vaisala	0.5 m/s a 60 m/s	+/- 0,3 m/s	2%	0.5 Hz	3 a 15V CC

No que diz respeito à localização do equipamento, em função de dados obtidos previamente, que indicavam a predominância de regimes de vento de noroeste e de sudoeste, e devido à existência de guardas metálicas que podiam ser utilizadas para a fixação dos equipamentos, foi decidido que seriam instalados dois anemómetros no piso exterior à cota 320 m, de acordo com a figura 4.3. Deste modo, minimizaram-se os efeitos de sombreamento e de turbulência em virtude da presença da torre. Para melhor interpretação e análise dos registos os anemómetros foram numerados: o anemómetro localizado a noroeste é designado por Anemómetro 2, e o que está localizado a sudoeste é designado por Anemómetro 1, de acordo com a figura 4.3.

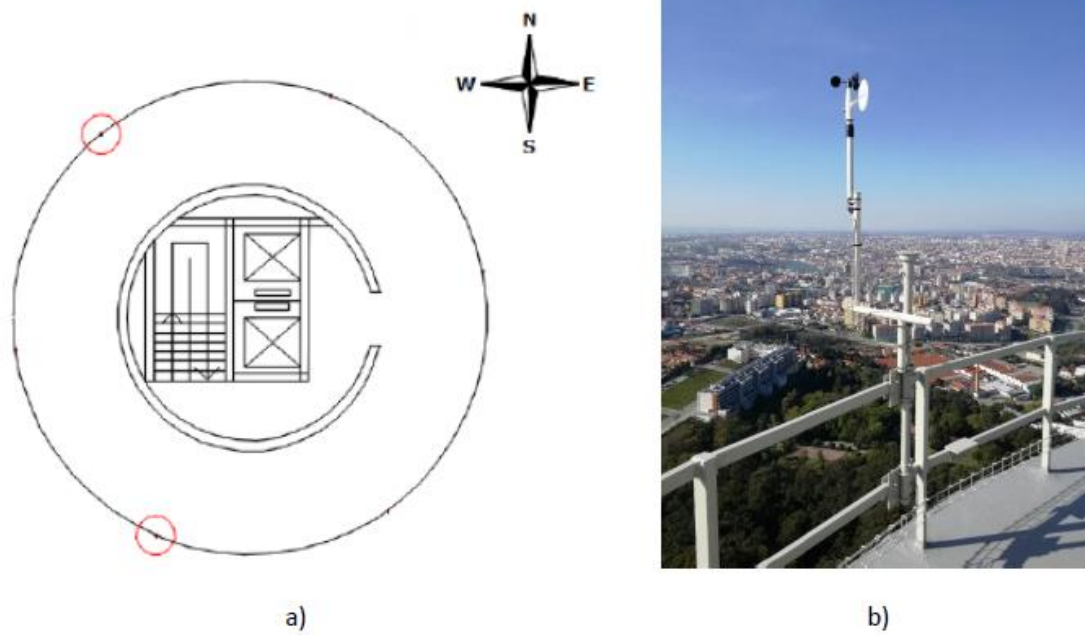


Figura 4.3 – Anemómetros; a) Localização dos anemómetros; b) instalação do anemómetro 1

Para a fixação foi definida uma solução que não interferisse com o funcionamento da estrutura nem que se afastasse horizontalmente dos perfis metálicos aí existentes. Assim os anemómetros foram fixados a um poste iluminação, como indica a figura 4.4a) e 4.4b).

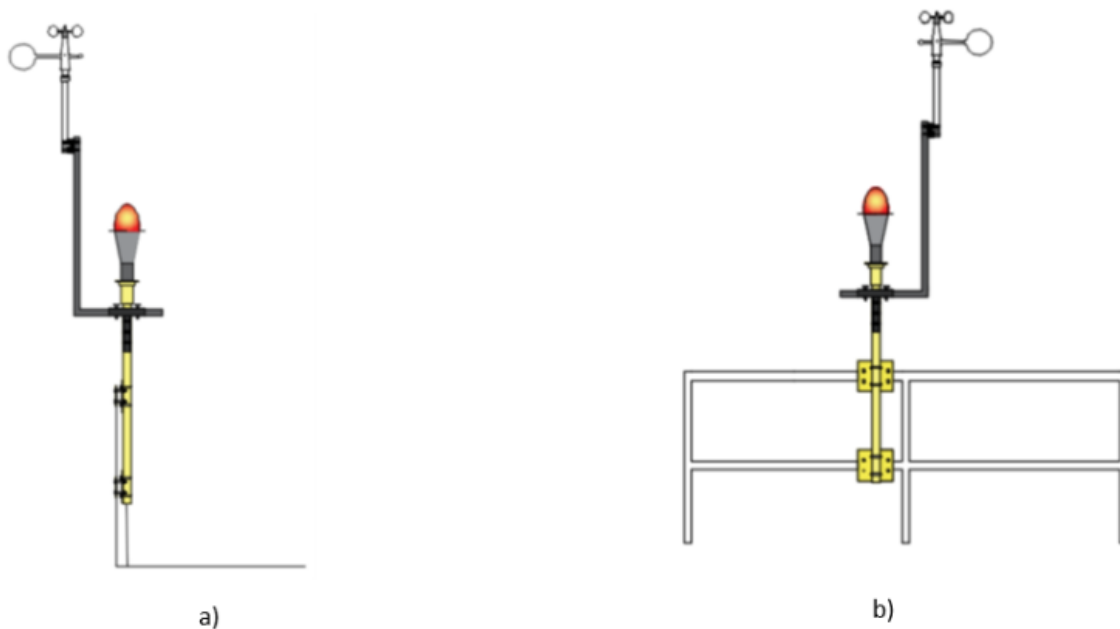


Figura 4.4 - Pormenor de instalação dos anemómetros: a) vista lateral; b) vista frontal

As fixações foram revestidas por uma tinta especial para evitar a corrosão do aço, uma vez que o local está diretamente exposto a condições meteorológicas adversas com ventos marítimos.

No final da instalação os dois anemómetros ficaram prontos a medir direcções de vento de 0° a 360°, onde 0° representa o Este geográfico. A velocidade é registada em km/h. No gráfico 4.1 está representado, a título exemplificativo, um registo horário da velocidade do vento e respetiva direcção.

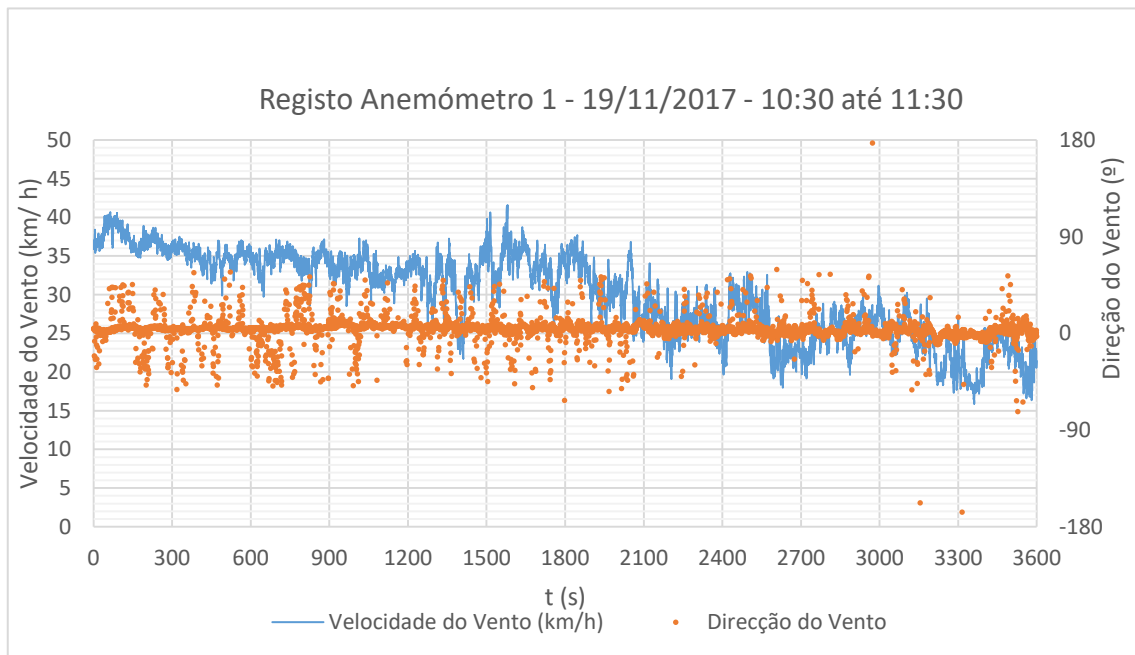


Gráfico 4.1 - Registo Anemómetro 1 no dia 19 de novembro de 2017 das 10:30 até 11:30

4.2.2 Acelerómetros

Os acelerómetros piezoelétricos utilizados possuem no seu interior cristais piezoelétricos, que quando sujeitos à compressão devido às vibrações ambientais geram sinais eléctricos na ordem dos mV. Estes sinais são depois interpretados pelo sistema de aquisição de dados. Os acelerómetros são da marca PCB, modelo 393B12, cujas especificações estão resumidas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Especificações do acelerómetro

Modelo	PCB 393B12
	
Fabricante	PCB
Sensibilidade (+/- 5%)	10 V/ g
Gama de frequências (+/- 5%)	0.15 a 1000 Hz
Gama de medição	+/- 0.5 g
Tensão de excitação	18 a 30 VDC
Material	Cerâmica

Como a torre do Monte da Virgem é utilizada para transmissão de TV e rádio, existe uma grande quantidade de ondas eletromagnéticas que interferem com o funcionamento dos acelerómetros. Assim foi necessário desenvolver uma proteção do tipo gaiola de Faraday, que possibilitou o isolamento dos sensores de interferências externas. Na figura 4.5, ilustra-se a proteção dos acelerómetros, neste caso por meio de uma caixa de plástico, revestida com papel de alumínio, validando, assim, uma construção de uma gaiola de Faraday eficiente e de baixo custo (Pauli, 2016).



Figura 4.5 – Proteção dos acelerómetros

As localizações dos acelerómetros correspondem a pontos onde o somatório, em módulo, dos deslocamentos associados a três das configurações modais da torre apresenta o valor máximo (Leite et al., 2017), tal como indicado na figura 4.6. Este critério conduziu à instalação de dois acelerómetros a meia altura da Torre, mais dois no piso técnico à cota 312.65 m.

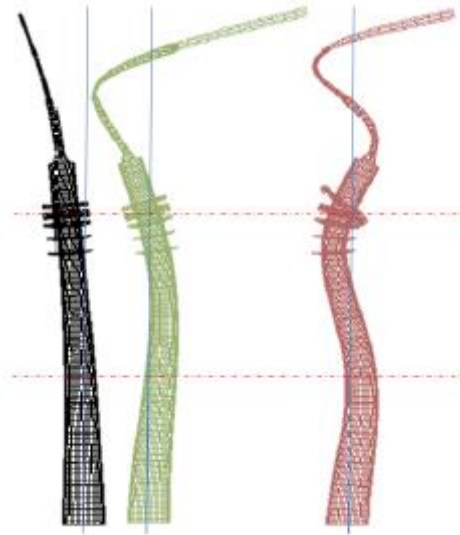


Figura 4.6 - Posicionamento ótimo dos acelerómetros com base no modelo numérico calibrado da torre (Leite et al, 2017)

Os acelerómetros que ficaram posicionados à cota 254.9 m (Acelerómetro 1 e Acelerómetro 2), foram fixados a uma viga de travamento no interior da torre (figura 4.7a)), sendo que os acelerómetros localizados à cota 312.65 m foram fixados diretamente ao pavimento (figura 4.7b)). Os acelerómetros foram fixados com recurso a apoios em cantoneira metálica.



a)



b)

Figura 4.7 - Instalação dos acelerómetros: a) acelerómetro instalado na viga travamento; b) acelerómetro instalado no piso técnico

A possibilidade de instalar acelerómetros na torre metálica não foi possível proceder uma vez que a sua instalação só poderá ser realizada por pessoal especializado e autorizado e quando as antenas estiverem desligadas para manutenção.

4.2.3 Estação meteorológica

A estação meteorológica foi instalada na torre do Monte da Virgem com o objetivo de complementar os dados adquiridos pelo sistema de monitorização contínua.

A estação meteorológica possui quatro sensores (figura 4.8) que são responsáveis pela medição das grandezas físicas, que poderão ser lidas num ecrã portátil, através de WiFi, até uma distância de 100 m. Contudo, apesar de ser possível a leitura de dados em intervalos de 48 s, apenas foi possível armazenar estes dados a cada 5 min, pelo programa de aquisição de dados.

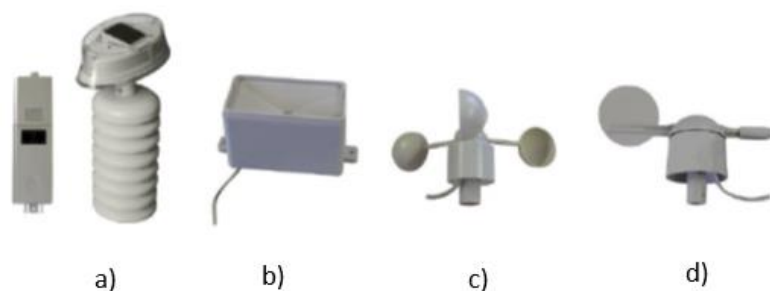


Figura 4.8 - Sensores integrantes da estação meteorológica: a) sensor de temperatura e humidade; b) sensor pluviométrico; c) sensor para a medição da velocidade do vento; d) sensor para a medição da direção do vento

A estação meteorológica foi posicionada no piso técnico da torre à cota 320.4 m, onde foi fixada aos às guardas metálicas aí existentes. A estação meteorológica transmite os registos para um ecrã portátil que se encontra no interior da Torre que por sua vez encontra-se ligado ao sistema de aquisição de dados por um cabo de rede com adaptador USB.

4.2.4 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados permite a conversão dos sinais analógicos, em Volt, em sinais digitais, em formato binário, que após processamento permite obter os valores das acelerações, da velocidade e direção do vento. O sistema de aquisição de dados utilizado foi da marca National Instruments, modelo Compact DAQ-9172, National Instruments (figura 4.9).



Figura 4.9 – Sistema de aquisição de dados Compact DAQ-9172, da National Instruments

Uma vez que o sistema de aquisição permite a incorporação de vários módulos, para o armazenamento dos diferentes sinais medidos, foram utilizados dois módulos NI 9234, para registo das acelerações, um módulo NI 9401, para leitura da velocidade do vento e um modulo 9209 para a direção do vento.

O sistema de monitorização da torre do Monte da Virgem, permitiu a recolha de informação durante um período alargado, neste caso 6 meses, entre agosto de 2017 a janeiro de 2018. A figura 4.10 esquematiza o sistema de monitorização permanente implementado.

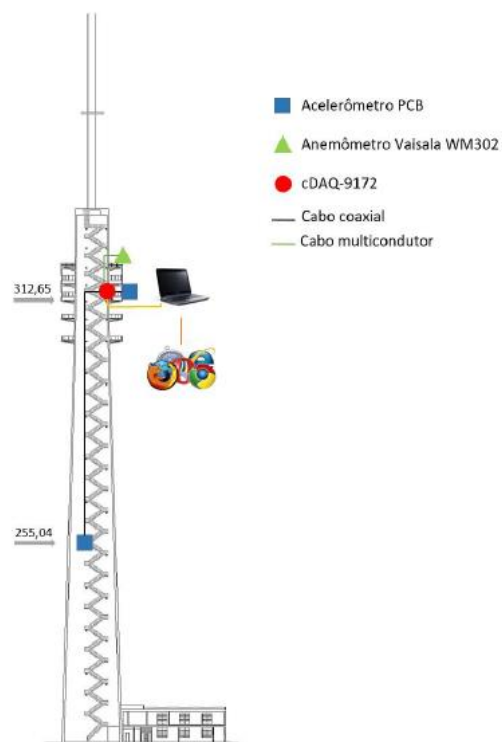


Figura 4.10 - Esquema da implantação do sistema de monitorização
contínua

Os dados adquiridos pelo sistema de aquisição são processados por um computador que se encontra no piso técnico da torre à cota 312.65, recorrendo a um programa desenvolvido em LabView, da National Instruments, armazena os dados em ficheiros de texto. Devido às restrições de acesso à Torre, foi preparado o acesso remoto ao computador através do programa TeamViewer.

Estes documentos de textos foram organizados através de rotinas desenvolvidas com o programa MatLab, que posteriormente serão analisados com o objetivo de caracterizar a resposta da estrutura perante a ação do vento.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA

Com o sistema de monitorização da torre do Monte da Virgem instalado, procedeu-se à análise dos registos dos acelerómetros e anemómetros.

A aquisição de sinais foi realizada num intervalo de tempo de aproximadamente meio ano com o objetivo de incluir no estudo diferentes condições climáticas e de utilização. O estudo compreendeu o período entre agosto de 2017 e janeiro de 2018.

Com base na análise dos registos das acelerações medidas, foram identificados três tipos de eventos, designados de eventos críticos, eventos não-críticos e eventos esporádicos.

5.1 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS

Os sinais medidos pelos acelerómetros e anemómetros são armazenados em ficheiros de textos que são criados com a frequência de um ficheiro por hora.

Os ficheiros (figura 5.1) gravam um total de trezentos e sessenta mil pontos, ou seja, a resposta da estrutura em termos de acelerações é obtida a um ritmo de cem registos por segundo. No caso dos anemómetros os sinais são gravados a uma frequência de dois registos por segundo.

```
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator .
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator DEC
Date 2017/06/30
Time 16:00:34.2269434928894842969
***End_of_Header***

Channels 4
Samples 50 50 50 50
Date 2017/06/30 2017/06/30 2017/06/30 2017/06/30
Time 16:00:34.2269434928894842969 16:00:34.2269434928894842969 16:00:34.2269434928894842969 16:00:34.2269434928894842969
Y_Unit_Label g g g g
X_Dimension Time Time Time Time
X0 0.000000000000000E+0 0.000000000000000E+0 0.000000000000000E+0 0.000000000000000E+0
Delta_X 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000
***End_of_Header***

X_Value Acceleration_1 (Last) Acceleration_2 (Last) Acceleration_3 (Last) Acceleration_4 (Last) Comment
0.000000 -0.004040 -0.001913 0.000819 -0.000312 6/30/2017 4:00:31 PM
0.010000 0.000523 0.001999 0.000748 5.000368E-5
0.020000 0.004910 0.000524 0.000856 0.000249
0.030000 -0.000130 0.000767 0.001090 0.425122E-5
0.040000 -0.003420 -0.001777 0.000736 0.000147
0.050000 0.005477 -0.000979 0.000626 -0.000163
0.060000 0.002532 0.002175 0.000544 9.608815E-5
0.070000 0.002258 0.002235 0.000552 0.000121
0.080000 -0.006770 -0.003945 0.000391 -0.000283
0.090000 0.001190 -0.001265 0.000650 9.59346E-5
0.100000 0.000944 -0.001030 0.000291 1.349271E-5
0.110000 0.003701 0.001934 -0.000147 -0.000118
0.120000 0.001971 0.001410 0.000529 0.000235
0.130000 0.003655 0.000661 0.000257 0.000146
0.140000 0.003365 -0.002070 0.000891 -8.527415E-5
0.150000 0.002734 -0.000343 0.000621 0.000169
0.160000 -0.001192 0.001944 0.000526 0.000188
0.170000 -0.001044 0.000383 0.000304 3.976422E-5
0.180000 -0.002760 0.000144 0.000263 0.000535
```

Figura 5.1 – Exemplo de um registo de acelerações

CAPÍTULO 5

O tratamento da informação obtida através do sistema de monitorização contínua foi realizado através da representação gráfica dos eventos identificados. Esta representação foi executada através de rotinas elaboradas com o software MatLab, com o objetivo de automatizar a identificação das situações onde a resposta da torre do Monte da Virgem surge amplificada.

A caracterização dos eventos teve como principais critérios o valor da aceleração máxima dos eventos e a sua duração. A amplitude da aceleração foi considerada na seleção dos registos potencialmente críticos, estabelecendo um valor mínimo da aceleração para que a rotina pudesse arrancar. Isto permitiu reduzir em quantidade significativa a informação a tratar, pois caso contrário, o código em questão correria para todos os registos disponíveis.

Em relação ao código, além da definição do critério mínimo para o seu arranque, foi necessário a utilização de uma rotina que fosse capaz de remover certas interferências que pudessem representar perturbações na análise dos registos. Para isso foi utilizado um filtro digital do tipo passa-baixo de Chebyshev (Rhodes et al., 1980).

Por outro lado, de forma a ser possível relacionar a velocidade e direção do vento com a aceleração medida foi incluída uma rotina que permitisse a análise simultânea destes dois aspetos caracterizadores dos eventos.

Assim ficou definido que os registos dos acelerómetros que seriam analisados, correspondiam a eventos que apresentavam picos de aceleração superiores a 4 mg, uma vez que abaixo deste valor, foi considerado que qualquer evento ocorrido na estrutura corresponderia a um evento corrente como sucede sobretudo com os eventos não críticos.

A condição do valor da aceleração, representada na figura 5.2, com a variável *maxg*, para a seleção dos registos foi introduzida após a aplicação do filtro de Chebyshev, possibilitando a obtenção de um resultado fiável a nível da representação dos registos dos acelerómetros e anemómetros.

```
ACC4_Max_XX=max(xn_f_f1);  
ACC3_Max_YY=max(xn_f_f); |  
  
% condição para executar gráficos  
maxg=max(ACC3_Max_YY,ACC4_Max_XX);  
  
if maxg >= 0.004;
```

Figura 5.2 - Introdução da condução da aceleração mínima para validação dos registos

A condição do valor da aceleração, juntamente com o filtro de Chebychev, encontram-se localizados, no interior de um ciclo que permite a análise dos ficheiros de forma automática (figura 5.3).

```
dir acc_*.lvm
files_acc = dir('acc_*.lvm')

for i=1:length(files_acc);
    eval(['lvm_import ' files_acc(i).name]);
```

Figura 5.3 - Início do ciclo da execução de gráficos representativos do movimento da Torre do Monte da Virgem

Apesar da execução dos gráficos estar dependente de picos de aceleração mínima de 4 mg, todos os ficheiros armazenados pelo sistema de monitorização permanente são avaliados pela rotina. Assim está garantido que todos os eventos registados no período da análise são abrangidos.

Após a validação da condição imposta, são executados os gráficos representativos do movimento da torre durante uma hora.

Na construção dos gráficos foi necessário ter em atenção a utilização de uma escala que fosse facilmente interpretável com o objetivo de se obter a informação em relação à amplificação das acelerações e duração dos eventos.

Neste contexto, foi encontrada uma escala de tempo equivalente a 3600 segundos, 1 hora. Esta escala foi determinada tendo em conta que os ficheiros de texto possuem cerca de 360000 registos, o que significa que cada segundo possui 100 registos (figura 5.4)

```
f=figure(i); % EXECUTA GRAFICOS EM FUNÇÃO DE N FICHIEROS LVM
subplot(2,1,1);
plot(t3,xn_f_f);
title('ACC3 - sentido W-E (yy)');
xlabel('t (s)');
ylabel('a (g)');
xticks(0:180:length(ISEP3(:,1))/100);
yticks(-0.015:0.003:0.015);
xlim([0 3600]);
ylim([-0.015 0.015]);
```

Figura 5.4 - Escala do eixo horizontal e vertical da representação gráfica dos acelerómetros

Desta forma, ficou estabelecido que a linha tempo, que se encontra no eixo horizontal dos gráficos, teria um passo de 0,01 segundos o que permitiu a contemplação de todos os 360000 registos. No final para melhor interpretação a escala estaria marcada de 180 em 180 segundos. A título de exemplo encontra-se

CAPÍTULO 5

na figura 5.5 o gráfico de aceleração em função tempo registrado pelos acelerómetros. Este evento foi registrado no dia 24 de setembro de 2017, entre as 19:00 e 20:00 horas.

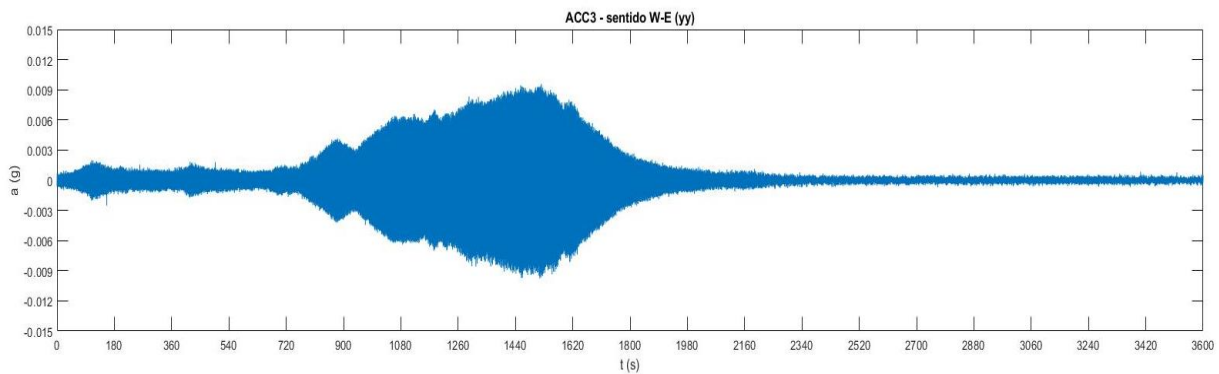


Figura 5.5 - Gráfico obtido através da rotina desenvolvida em MatLab para a caracterização de eventos. Da análise da figura pode-se verificar que o evento crítico teve a duração de, aproximadamente, 27 minutos, o equivalente a 1620 segundos.

Outro aspecto de relevo na caracterização dos eventos críticos é a caracterização dos movimentos induzidos à torre.

Neste seguimento, considerando que as direções em que foram instalados os acelerómetros são ortogonais e coincidentes com os pontos cardeais, cada evento foi representado numa distribuição polar, o que permitiu obter o movimento real da estrutura.

A distribuição polar foi definida em função de duas variáveis, a amplitude da aceleração e o ângulo de fase entre o acelerómetro 4 e acelerómetro 3, ou seja, a resultante da aceleração da torre corresponde à combinação trigonométrica das amplitudes registadas por estes dois sensores.

Sendo a representação de coordenadas polares uma distribuição de pontos pelos 4 quadrantes do círculo trigonométrico, e, tendo sido necessário determinar a posição da estrutura em cada instante, em função da rosa dos ventos, foi elaborada uma nova rotina desenvolvida em MatLab, que permitisse essa mesma distribuição, através de relações trigonométricas. Este tratamento de informação encontra-se representado na figura 5.6.

```
ACC_MAX= sqrt(xn_f_fl.^2+xn_f_f.^2); % COMBINAÇÃO DAS ACELERAÇÕES

for mv=1:length (ACC_MAX);
    if xn_f_f(mv,:) > 0 && xn_f_fl(mv,:) > 0; % ACC3 - POSITIVO & ACC4 - POSITIVO
        dirtmv(mv,:) = atan(xn_f_fl(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE - CONDIÇÃO PARA O 1º QUADRANTE
    elseif xn_f_f(mv,:) < 0 && xn_f_fl(mv,:) > 0; %ACC3 - NEGATIVO & ACC4 - POSITIVO
        dirtmv(mv,:) = pi + atan(xn_f_fl(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE - CONDIÇÃO PARA 2º QUADRANTE
    elseif xn_f_f(mv,:) < 0 && xn_f_fl(mv,:) < 0; % ACC3 - NEGATIVO & ACC4 - NEGATIVO
        dirtmv(mv,:) = pi + atan(xn_f_fl(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE - CONDIÇÃO PARA 3º QUADRANTE
    elseif xn_f_f(mv,:) > 0 && xn_f_fl(mv,:) < 0; % ACC3 - POSITIVO & ACC4 - NEGATIVO
```

Figura 5.6 – Determinação da posição da torre do Monte da Virgem em coordenadas polares

No que diz respeito à quantidade de informação que seria apresentada, considerou-se que a contabilização dos 15 s anteriores e posteriores ao evento crítico atingir a sua amplitude máxima eram suficientes para a representação do movimento da torre, uma vez que o movimento é oscilatório e diminui de intensidade após atingir o pico. Esta contabilização encontra-se a seguir ao ciclo da distribuição das coordenadas polares, conforme representado na figura 5.7.

```
% FILTRAGEM DO EVENTO CRITICO PARA 15 SEGUNDOS - ACELERAÇÃO MÁXIMA
AMP1=ACC_MAX(find(ACC_MAX==MAX_VAL)-1500:find(ACC_MAX==MAX_VAL)+1500); % AMPLITUDE DO EVENTO
DIR1=dirtmv(find(ACC_MAX==MAX_VAL)-1500:find(ACC_MAX==MAX_VAL)+1500); % DIRECÇÃO EM FUNÇÃO DA AMPLITUDE
```

Figura 5.7 - Filtragem dos 15 segundos anteriores e posteriores ao evento crítico atingir o valor máximo

Por último, tendo sido a informação filtrada compilou-se a informação no gráfico de coordenadas polares, em que a posição da estrutura é apresentada em função da amplitude da resultante dos registos dos acelerómetros, representado a título exemplificativo na figura 5.8. Os códigos que permitiram a separação dos eventos e a representação da direcção da resposta da estrutura encontram-se nos Anexos I e II, respetivamente.

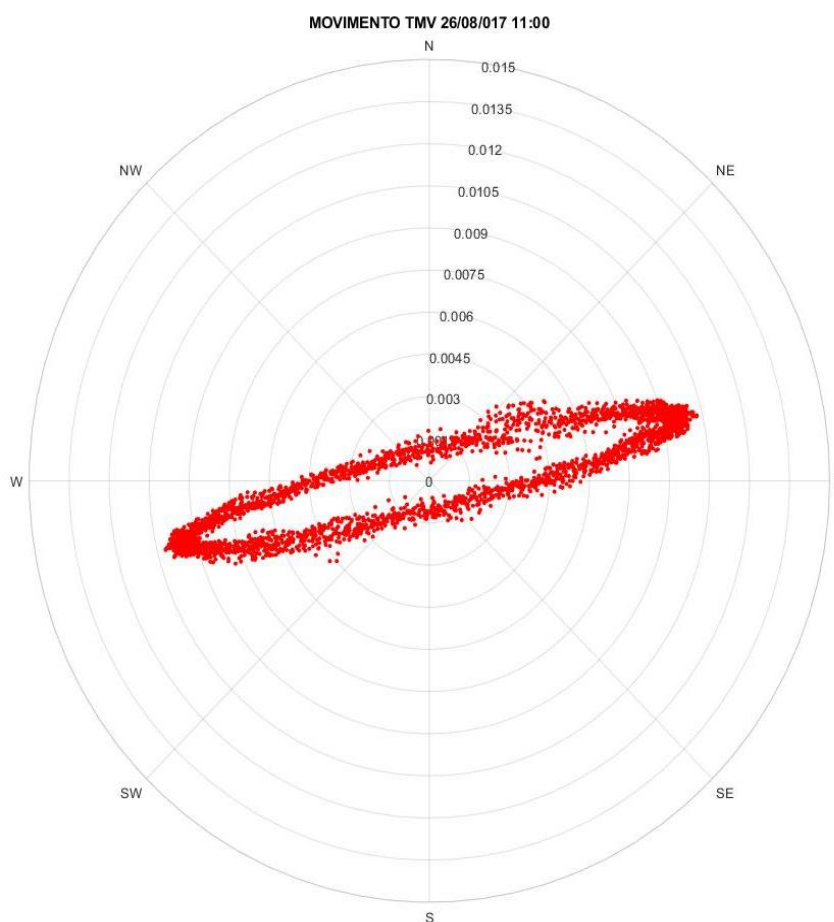


Figura 5.8 - Representação da posição da Torre do Monte da Virgem, no dia 26 de agosto de 2017, às 11:00

Por sua vez os eventos esporádicos encontram-se associados a atividades de utilização da estrutura, seja o acesso e a operação de equipas de manutenção, os movimentos ascendente ou descendente do elevador, as visitas de público, o funcionamento de equipamentos e máquinas, entre outros. Na figura 5.9, pode-se verificar uma sequência de vários eventos esporádicos.

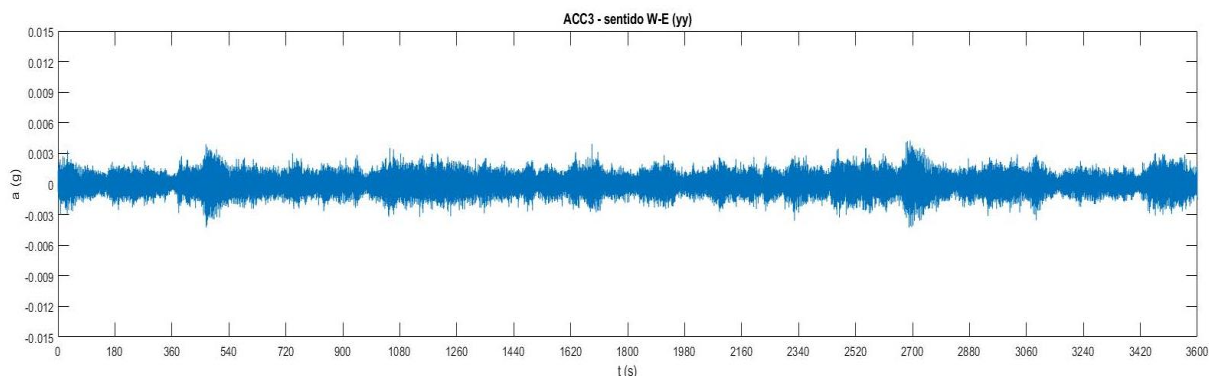


Figura 5.9 - Representação do registo no dia 22 de novembro de 2017, entre as 16:26 e 17:26

5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS EVENTOS

5.2.1 Eventos críticos

Os eventos críticos são caracterizados por ocorrências de menor frequência, mas associados a importantes amplificações da resposta dinâmica. No gráfico da figura 5.10 apresenta-se um evento crítico medido dia 25 de novembro de 2017, com duração de aproximadamente 46 minutos.

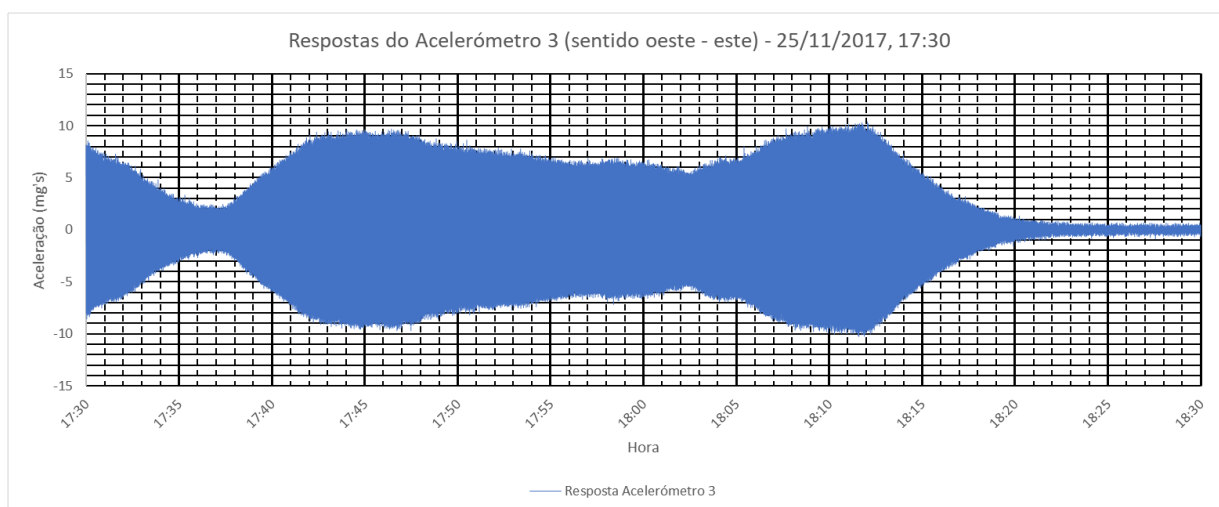


Figura 5.10 – Resposta do acelerómetro 3, no sentido este – oeste, da Torre do Monte da Virgem no dia 25 de novembro de 2017, às 17:30

A representação gráfica dos eventos críticos permitiu analisar com maior detalhe a resposta dinâmica da Torre. Assim, através da ampliação de um minuto do evento, verificou-se que as acelerações da torre num evento crítico correspondem a uma senoide pura, com uma frequência igual a 0,7 Hz, correspondente ao 2º modo de vibração da torre que envolve movimentos locais do palito metálico. No gráfico da figura 5.11, apresenta-se o momento em que o evento crítico, representado no gráfico anterior, atinge a aceleração máxima de 10,39 mg, às 18:12 horas.

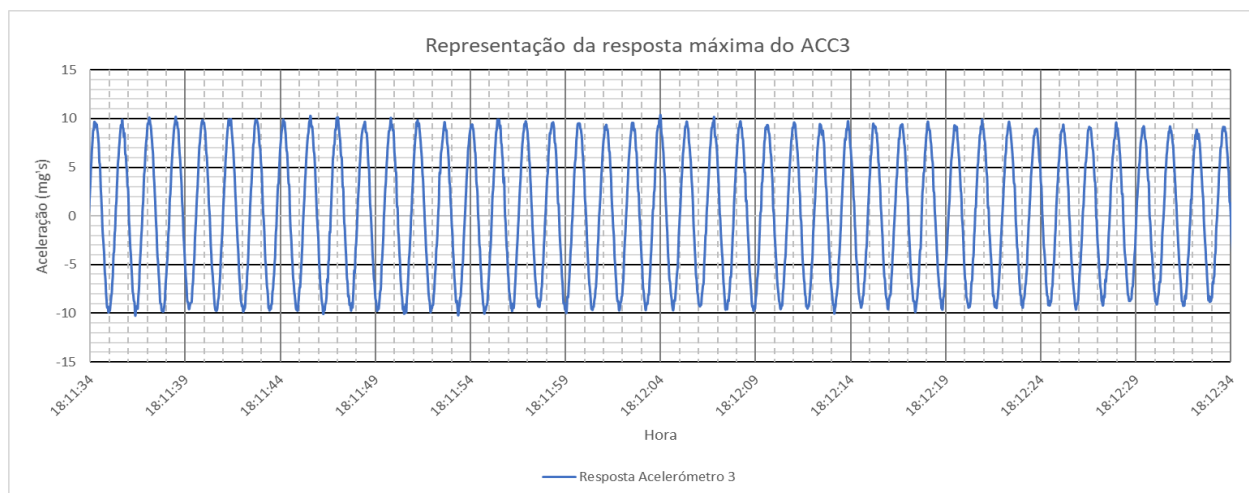


Figura 5.11 - Representação gráfica da aceleração máxima, registada no acelerómetro 3, às 18:12, no dia 25 de novembro de 2017

Do mesmo modo, o acelerómetro 4 posicionado na direção ortogonal (Direção N-S), também regista uma senoide pura, com características idênticas aos sinais medidos com o acelerómetro 3, mas com menor intensidade, como se pode observar na figura 5.12. Da comparação realizada entre os dois acelerómetros, pode-se concluir que a direção em que está posicionado o acelerómetro 3 é condicionante para o estudo da resposta dinâmica da estrutura.

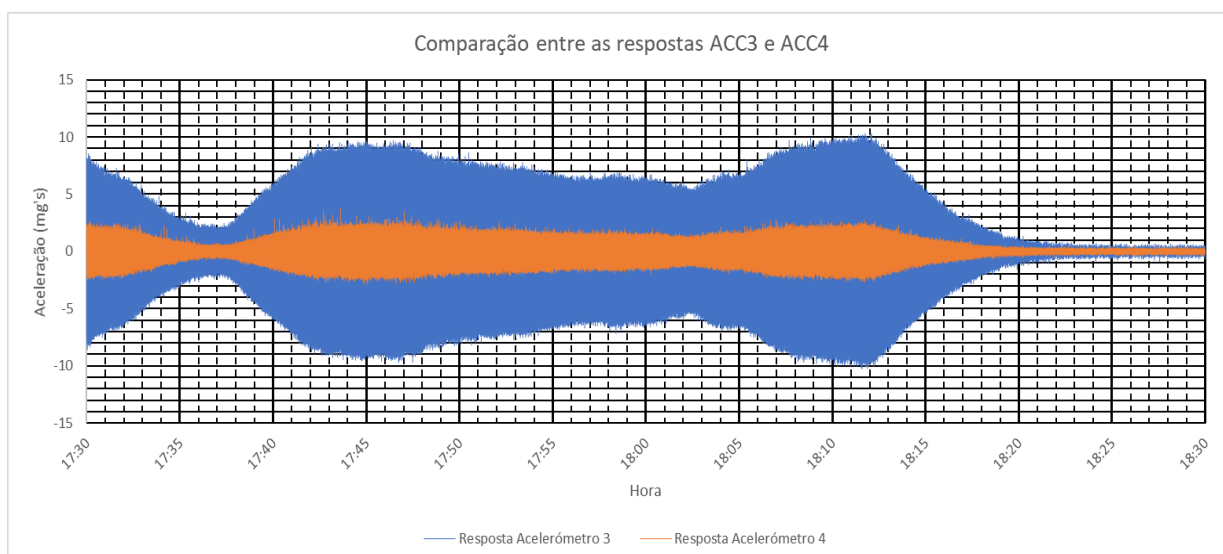


Figura 5.12 - Representação gráfica da resposta da Torre do Monte da Virgem no sentido N-S e O-E, no dia 25 de novembro de 2017, às 17:30

CAPÍTULO 5

Na figura 5.13 apresenta-se o instante em que as acelerações medidas pelos acelerómetros 3 e 4 apresentam o seu pico máximo, podendo assim constatar que, na realidade, os movimentos apresentam desenvolvimentos em fase.

Contudo, a quantificação da resposta em termos de aceleração não é suficiente para caracterizar o

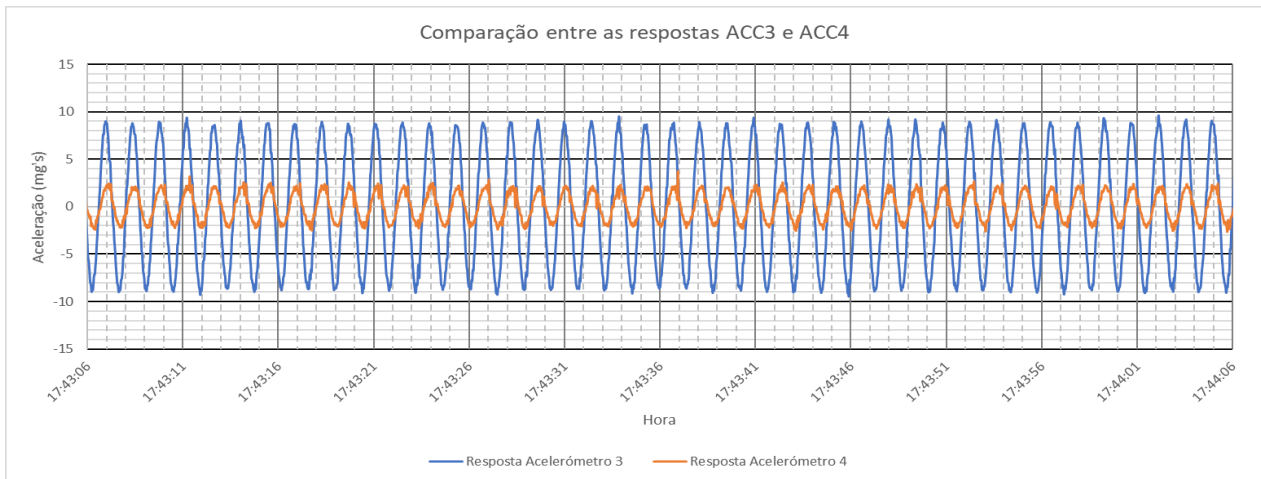


Figura 5.13 - Representação da resposta da torre, nas direções O-E e N-S, no dia 25 de novembro de 2017, às 17.30

movimento da torre. É também necessário relacionar a resposta com a ação do vento.

De forma análoga aos acelerómetros, os sinais medidos pelos anemómetros permitiram obter uma representação gráfica da velocidade e direção do vento. A direção do vento expressa em graus, possibilita a sua correlação com os pontos cardeais. Na figura 5.14 está representada a velocidade e direção do vento da medição realizada no dia 25 de novembro de 2017, entre as 17:30 horas e as 18:30 horas.

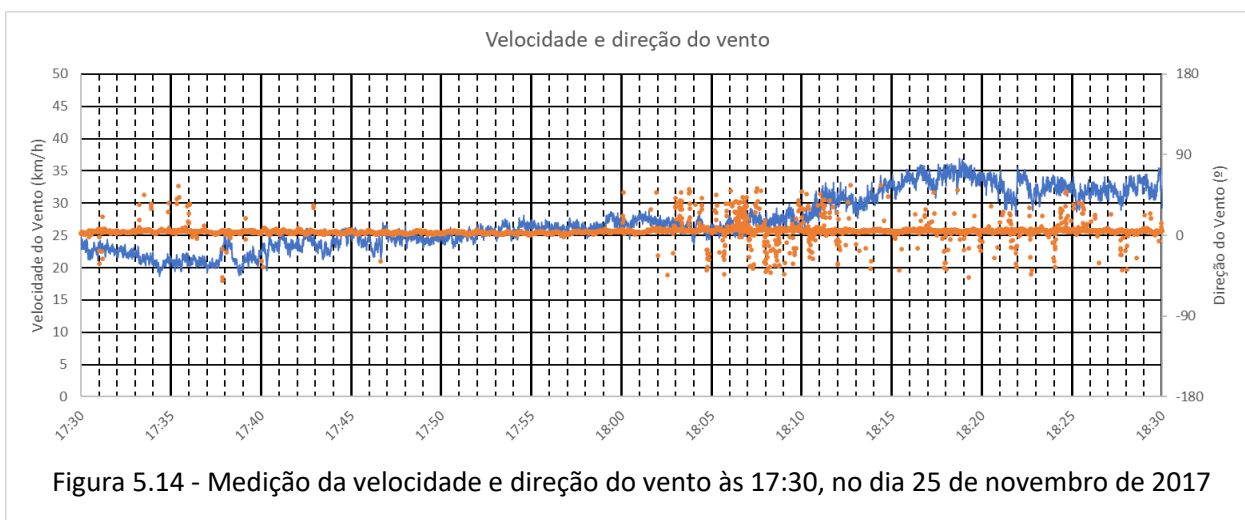


Figura 5.14 - Medição da velocidade e direção do vento às 17:30, no dia 25 de novembro de 2017

Da análise do gráfico da figura 5.14 verifica-se que a velocidade do vento varia entre 20 a 35 km/h, aproximadamente, e que a direção do vento se encontra muito próxima do eixo correspondente ao valor 0, que representa a direção Este. Por outro lado, no anemómetro 2, que se encontra posicionado a sudoeste, verifica-se um padrão de medição irregular da direção (figura 5.15). Esta situação pode ser devida a fenómenos de turbulência que afetou o anemómetro 2.

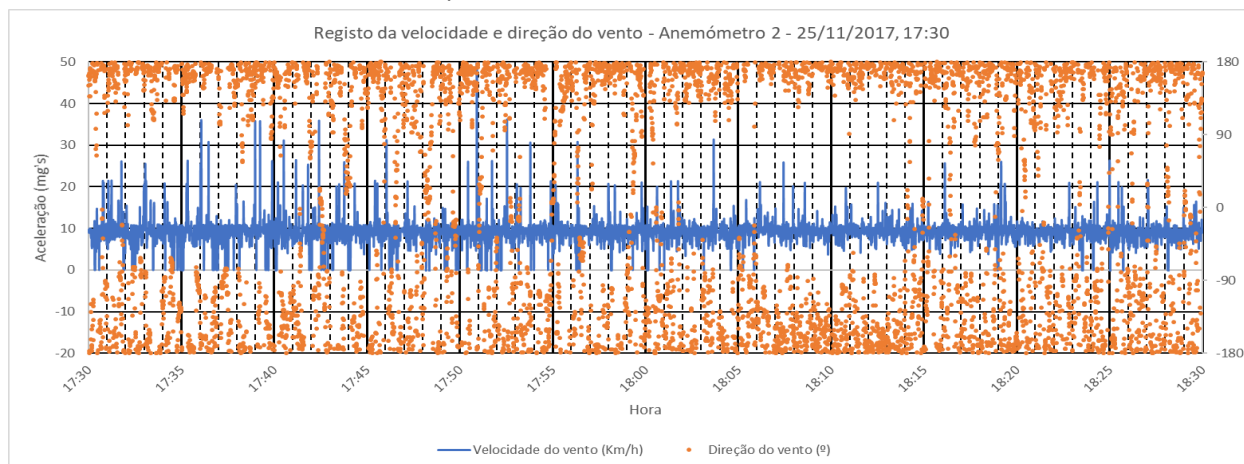


Figura 5.15 - Medição da velocidade e direção do vento, anemómetro 2, às 17:30, no dia 25 de novembro de 2017

Assim, para a identificação da velocidade e direção do vento que provoca a amplificação significativa da resposta dinâmica da torre serão utilizadas as medições registadas pelo anemómetro 1.

Comparando a direção e velocidade do vento com os registos da aceleração (figura 5.16), verifica-se que a velocidade do vento tem um valor de aproximadamente 30 km/h, e a direção do vento constante na direção este-oeste.

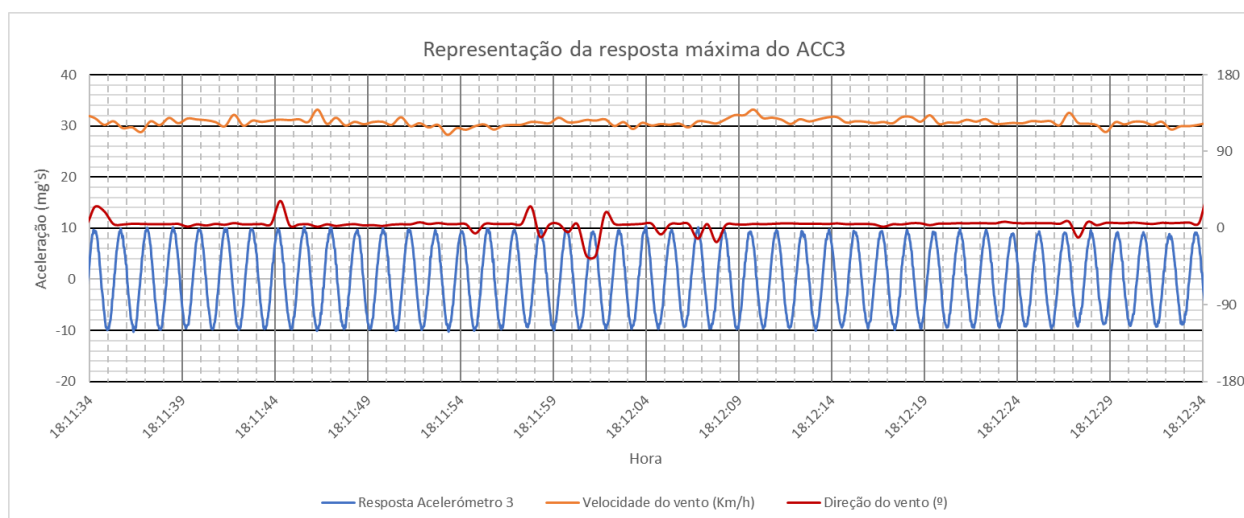


Figura 5.16 - Representação gráfica da aceleração máxima no acelerómetro 3, com a velocidade e direção do vento

CAPÍTULO 5

Realizando a combinação dos sinais medidos, obtém-se a resultante que corresponde à verdadeira direção da resposta em acelerações da estrutura (figura 5.17).

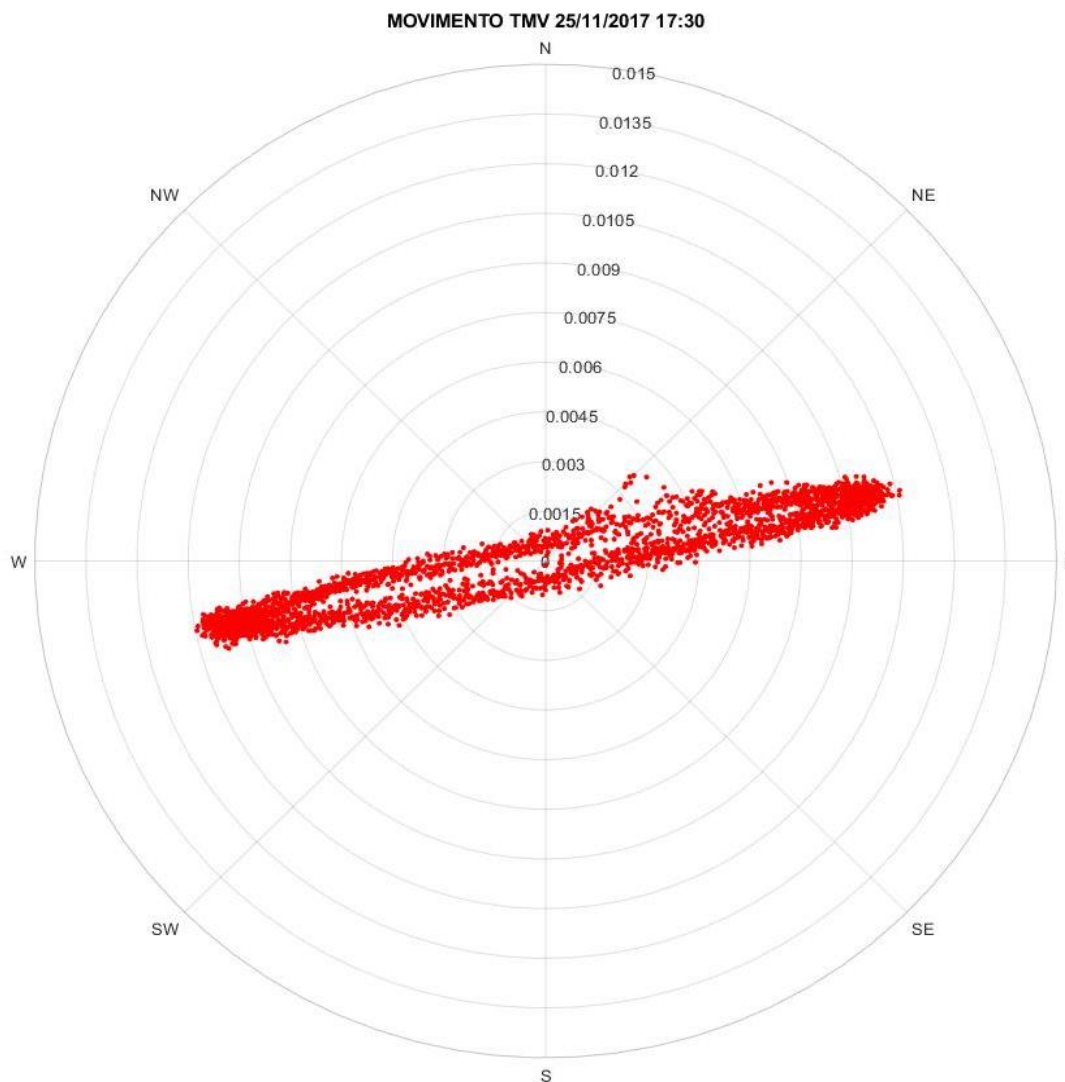


Figura 5.17 - Movimento da torre do Monte da Virgem, no dia 25/11/2017, às 17:30

Noutros exemplos de eventos críticos, como o caso do evento do dia 23 de janeiro de 2018, às 21 horas (figura 5.18), pode-se verificar que a Torre possui um movimento translacional associado a uma ligeira rotação. Identifica-se este tipo de movimento em todos os eventos críticos, contudo em alguns casos a elipse apresenta maior largura que outros. Este efeito é mais notório nuns eventos do que outros, mas encontra-se presente em todos os eventos identificados.

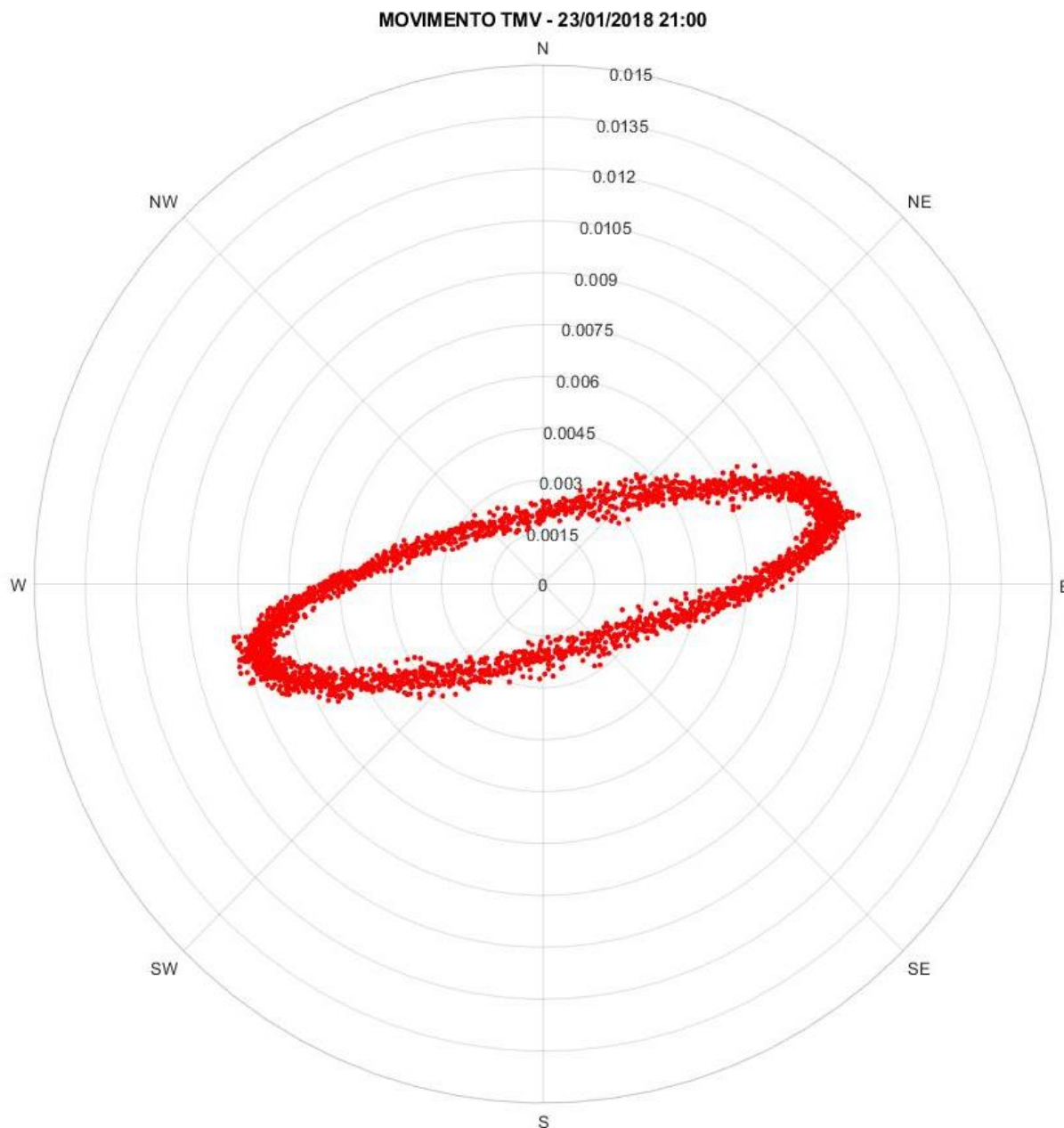


Figura 5.18 - Movimento da torre do Monte da Virgem, no dia 23/01/2018, às 21:00

Neste capítulo foram apresentadas as características que permitem a identificação dos eventos críticos, sendo, estes, os fenómenos que requerem um estudo mais aprofundado, uma vez durante a sua duração provoca maior desconforto aos utilizadores do edifício.

5.2.2 Eventos esporádicos

Estes eventos não possuem caráter periódico, ou seja, quando ocorrem, são resultado de uma interferência quase instantânea, ou de duração limitada que faz com que a amplitude do registo de

CAPÍTULO 5

acelerações aumente de forma significativa naquele determinado instante ou num curto intervalo de tempo.

Nos registos dos acelerómetros estas ocorrências caracterizam-se pelo aparecimento de um pico de aceleração que se destaca do registo medido ao longo do tempo, como se encontra representado na figura 5.19, onde se apresenta um registo filtrado de um evento esporádico ocorrido em 4 de dezembro de 2017.

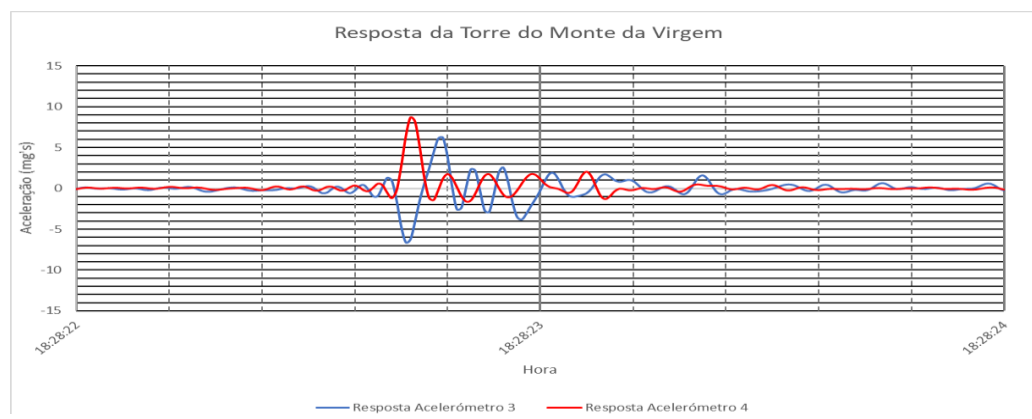


Figura 5.19 – Evento esporádico

Os eventos esporádicos encontram-se associados a situações transitórias, como por exemplo o funcionamento de equipamentos, a utilização do elevador, operações e trabalhos de manutenção, e que normalmente induzem picos de aceleração de amplitude elevada de curta duração. Estes eventos nada têm haver com a duração do vento sobre a estrutura e são potencialmente uma fonte de erro na identificação automática de eventos críticos. De facto, estes fenómenos ocorrem que forma bastante rápida, com durações entre poucos segundos e 5-10 minutos, voltando o registo ao estado normal de forma quase instantânea. Os eventos esporádicos, podem, também, ser classificados como interferências, quando ocorrem durante eventos não críticos.

5.2.3 Eventos não críticos

Os eventos não críticos caracterizam-se pela resposta dinâmica da estrutura ser de baixa amplitude, tipicamente inferior a 4 mg, e correspondem à normal resposta da estrutura para a grande maioria dos regimes de ventos, como é o caso dos ventos de direção sul-norte e noroeste-sudeste (os típicos ventos de nortada), e sem impacto nocivo no normal funcionamento da torre (figura 5.20).

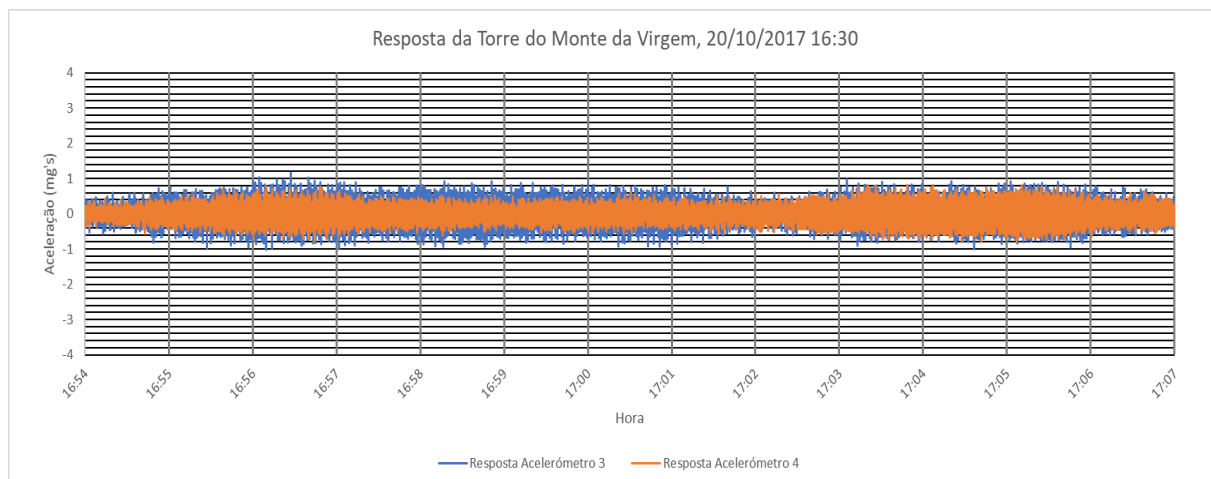


Figura 5.20 - Evento não crítico

Em analogia com os eventos críticos, fez-se a análise da resposta da torre em termos de representação da sua oscilação. Isto permitiu verificar que a oscilação da estrutura não representa uma senoide pura (figura 5.21), não estando os registos medidos pelos acelerómetros em fase, o que dá a indicação de comportamentos oscilatórios diferentes nas situações de eventos críticos e não críticos.

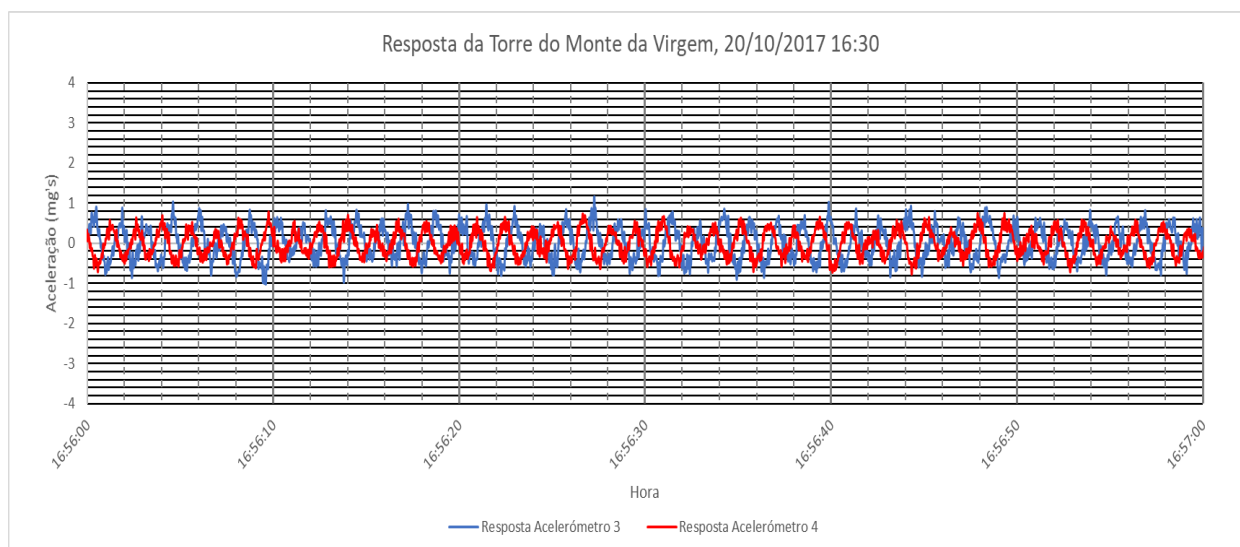


Figura 5.21 - Representação das oscilações de um evento não crítico

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DOS EVENTOS CRÍTICOS

Após a caracterização dos eventos críticos e da ação que conduz ao fenómeno de vibração excessiva, apresenta-se a identificação automática dos eventos críticos medidos no período entre agosto de 2017 e janeiro de 2018 (figuras 5.22 e 5.23).

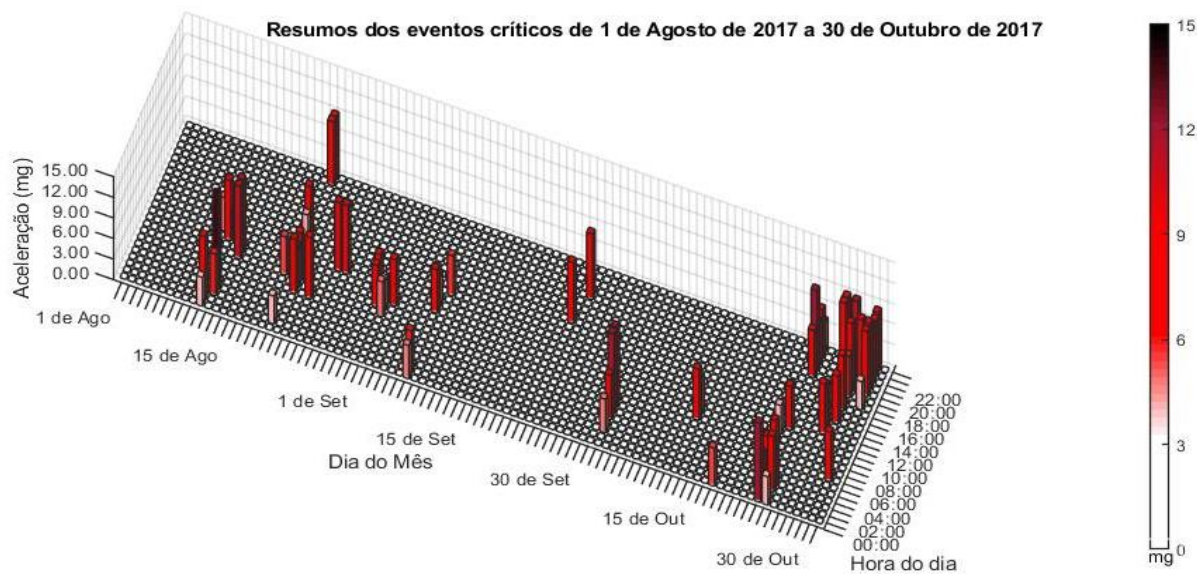


Figura 5.22 - Representação dos eventos críticos que ocorreram desde 1 de agosto de 2017 até 31 de outubro de 2018

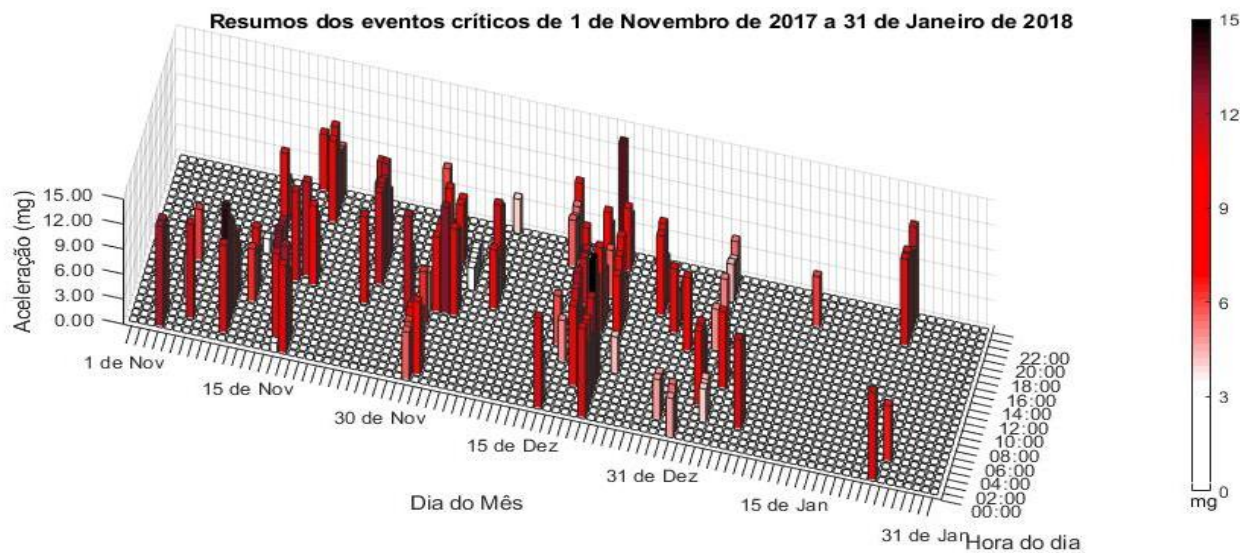


Figura 5.23 - Representação dos eventos críticos que ocorreram desde 1 de novembro de 2017 até 31 de janeiro de 2018

Da análise dos gráficos 5.22 e 5.23 verifica-se que em novembro e dezembro os valores das acelerações máximas medidas são mais elevados apresentando valores superiores a 9 mg, em comparação com os meses de agosto a outubro, em que se pode verificar valores de ocorrência de eventos críticos com acelerações medidas na ordem de 6 mg.

Outro aspeto que se encontra presente é facto de que entre novembro e dezembro os eventos críticos ocorrem diversas vezes por dia, podendo um evento ser contínuo durante várias horas.

Por último, referindo a distribuição dos eventos críticos ao longo do dia, conclui-se que não existe um padrão para a ocorrência deste fenómeno, uma vez que os regimes de vento ocorrem de forma aleatória.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo a caracterização da resposta dinâmica da torre de telecomunicações do Monte da Virgem, a partir de medições realizadas por um sistema de monitorização contínua instalado, durante um período de 6 meses.

Este estudo envolveu o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitiram a identificação automática de situações em que a resposta dinâmica da torre surge amplificada sob a atuação de regimes de vento específicos.

Da análise efetuada aos registos de acelerações e da velocidade e direção do vento, foi possível identificar três tipos de eventos: críticos, não críticos e esporádicos, em que se caracterizam, principalmente, pela amplitude e duração do evento. Os eventos críticos são aqueles que ocorrem em menor frequência, mas com amplitude e duração significativas, e, associados a regimes específicos de ventos, que cujo sentido predominante é este-oeste e velocidade entre 20 km/h e 35 km/h.

Da caracterização dos eventos críticos verificou-se que estes ocorreram em maior número, e, que provocaram uma resposta maior da torre, entre os meses de novembro e janeiro. Os valores da amplitude das acelerações nestes meses são superiores a 9 mg. No entanto, a análise de todo o período de medição, mostra que ocorreram eventos críticos a partir de respostas com acelerações de amplitude a partir de 4 mg.

Por outro lado, o estudo mais aprofundado dos eventos críticos conduziu à caracterização da direção da resposta da estrutura, em que esta se encontra ligeiramente afastada do sentido predominante do vento, possibilitando a identificação de um efeito de rotação em todos os eventos críticos.

Por último, o presente estudo permitiu complementar as conclusões retiradas das investigações anteriores, nomeadamente no que diz respeito à direção da ação do vento e da resposta da torre do Monte da Virgem.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste estudo foi possível a caracterização de eventos críticos a partir das medições dos acelerómetros e anemómetros. Contudo, a estação meteorológica efetua medições sobre a temperatura na envolvente da estrutura. Estes registos poderão ser utilizados para identificar uma eventual relação entre variações de temperatura e acelerações com a ocorrência de eventos críticos.

Após este estudo, a ação do vento deverá ser caracterizada de forma detalhada, o que possibilitará o dimensionamento de uma solução de reforço, com o objetivo de atenuar as vibrações, recorrendo, por exemplo, a amortecedores de massa sincronizados (TMDs).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes, Paulo; Travanca, Rui; Varum, Humberto ; André, Paulo (2012). Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers. *Journal of Constructional Steel Research*, 74 (2012), p. 58-62. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.02.006>

Beirrow, Bernd; & Osterrieder, Peter (2001) -. *Structural Engineering, Mechanics and Computation: DYNAMIC INVESTIGATIONS OF TV TOWERS (Vol. 1)*. Cape Town, South Africa: Elsevier, 2001. Vol. 1, p. 629–636.

Breuer, Peter; Chmielewski, Tadeusz; Górski, Piotr, Konopka Eduard; Tarczyński, Leslaw (2008). The Stuttgart TV Tower – displacement of top caused by the effects of the sun and wind. *Engineering Structures*, 30 (2008), p. 2771-2781. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/engineering-structures>

Brownjohn, James Mark William; Pan, Tso Chien (2001). Response of tall buildings to weak long distance earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30, p. 709-729. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/eqe.32>

Chen, W.H.; Lu, Z.R.; Lin, W.; Chen, S.H.; Ni, Y.Q.; Xia, Y.; Liao, W.Y. (2011). Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower. *Engineering Structures*, 33 (2011), p. 3628-3646. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.028>

Cheng, XiaoXiang; Dong, Jun; Han, XiaoLin; Fei, QingGuo (2016). Structural Health Monitoring-Oriented Finite-Element Model for a Large Transmission Tower. *International Journal of Civil Engineering*, 16 (2018), p. 79-92. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0069-3>

Leite, Jorge; Ribeiro, Diogo; Pinto, Nuno; Costa, Bruno; Calçada, Rui (2017). Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos em Torre de Telecomunicações de Elevada Altura. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (2017)

Pauli, Rafael – Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos da Ação do Vento na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Quan, Young; Wang, Shuai; Gu, Ming; Kuang, Jun (2013). Field Measurement of Wind Speeds and Wind-Induced Responses atop the Shanghai World Financial centre under Normal Climate Conditions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 14 páginas

Rhodes, J.D.; Alseyab, S.A. (1980). The generalized Chebyshev low-pass prototype filter. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 8 (1980), p. 113-125. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cta.4490080205>

Ribeiro, Diogo; Leite, Jorge; Pauli; Rafael; Alves, Vinicius; Costa, Bruno; Calçada, Rui (2016). Calibration of the numerical model of a telecommunications tower based on genetic algorithms. *Genetic Algorithms: Advances in Research and Applications*, Chapter 3.

Salvo, Caio – Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos da Ação do Vento na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017

ANEXO I – ROTINA PARA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS

```
dir acc_*.lvm
files_acc = dir('acc_*.lvm')

for i=1:length(files_acc);

eval(['lvm_import ' files_acc(i).name]);
ISEP1=ans.Segment1.data(:,2);
t1=[0.01:0.01:length(ISEP1(:,1))/100];
ISEP2=ans.Segment1.data(:,3);
t2=[0.01:0.01:length(ISEP1(:,1))/100];
ISEP3=ans.Segment1.data(:,4); %ACC3
t3=[0.01:0.01:length(ISEP1(:,1))/100];
ISEP4=ans.Segment1.data(:,5); %ACC4
t4=[0.01:0.01:length(ISEP1(:,1))/100];

ISEP1=detrend(ISEP1);
ISEP2=detrend(ISEP2);
ISEP3=detrend(ISEP3);
ISEP4=detrend(ISEP4);

data_acc=datestr(files_acc(i).date,'dd/mm/yyyy HH:MM');

% transforma os nomes dos ficheiros .lvm todos com o mesmo número de
% caracteres

while length(files_acc(i).name)<=23;
    files_acc(i).name=strcat(files_acc(i).name,'000');
end

while length(files_acc(i).name)<=24;
    files_acc(i).name=strcat(files_acc(i).name,'00');
end

while length(files_acc(i).name)<=25;
    files_acc(i).name=strcat(files_acc(i).name,'0');
end

% Substitui o '.' por '_' para eleiminar a extensão .lvm
z(i,:)=strrep(files_acc(i).name,'.','_');
s=num2str(z(i,:));

% Calculo das frequências e acelerações máximas no ACC3 - topo da
% torre; sentido W-E; eixo yy

xn = ISEP3(:,1);
Fs=100;
Fn=Fs/2;
```

ANEXO I

```
Fc=20;
Wn=Fc/Fn;
% Filtro de Chebyshev tipo II
% n->ordem do filtro;R->atenuação;
% Wn->frequência de corte normalizada
n=8;
R=30;
[b,a]=cheby2(n,R,Wn);
Fpontos=100;
[h,w]=freqz(b,a,Fpontos,Fs);
m=abs(h);
p=angle(h);
xn_f_f=filtfilt(b,a,xn);
Fs=1/0.01;
nfft=2048*2;
xx=fft(xn_f_f,nfft);
Pxx=xx.*conj(xx)/nfft;
f=Fs*(0:nfft-1)/nfft;
[r,c,v]=find((f)>0.4 & (f)<0.55,1,'first');
Pxx4=Pxx(find((f)>0.4,1,'first'):find((f)<0.55,1,'last'),:);
f_res1=find(Pxx4==max(Pxx4))+(c-1);
maxVal1=max(Pxx4);
f_res41=f(f_res1);
[r,c,v]=find((f)>0.6 & (f)<0.8,1,'first');
Pxx2=Pxx(find((f)>0.6,1,'first'):find((f)<0.8,1,'last'),:);
f_res2=find(Pxx2==max(Pxx2))+(c-1);
maxVal2=max(Pxx2);
f_res42=f(f_res2);

% Calculo das frequências e acelerações máximas no ACC4 - topo da
% torre; sentido N-S; eixo xx

xn1 = ISEP4(:,1);
Fs=100;
Fn=Fs/2;
Fc=20;
Wn=Fc/Fn;
% Filtro de Chebyshev tipo II
% n->ordem do filtro;R->atenuação;
% Wn->frequência de corte normalizada
n=8;
R=30;
[b,a]=cheby2(n,R,Wn);
Fpontos=100;
[h,w]=freqz(b,a,Fpontos,Fs);
m=abs(h);
p=angle(h);
xn_f_f1=filtfilt(b,a,xn1);
Fs=1/0.01;
nfft=2048*2;
xx1=fft(xn_f_f1,nfft);
Pxx1=xx1.*conj(xx1)/nfft;
f=Fs*(0:nfft-1)/nfft;
[r,c,v]=find((f)>0.4 & (f)<0.55,1,'first');
Pxx11=Pxx1(find((f)>0.4,1,'first'):find((f)<0.55,1,'last'),:);
f_res21=find(Pxx11==max(Pxx11))+(c-1);
maxVal21=max(Pxx11);
f_res11=f(f_res21);
[r,c,v]=find((f)>0.6 & (f)<0.8,1,'first');
Pxx22=Pxx1(find((f)>0.6,1,'first'):find((f)<0.8,1,'last'),:);
f_res23=find(Pxx22==max(Pxx22))+(c-1);
maxVal22=max(Pxx22);
```

```

f_res12=f(f_res23);

ACC4_Max_XX=max(xn_f_f1); %para passar acelerações de 'g' para 'm/s2',
multiplica-se por g*9,81
ACC3_Max_YY=max(xn_f_f); %para passar acelerações de 'g' para 'm/s2',
multiplica-se por g*9,81

% condição para executar gráficos
maxg=max(ACC3_Max_YY,ACC4_Max_XX);

if maxg >= 0.004;

f=figure(i); % EXECUTA GRAFICOS EM FUNÇÃO DE N FICHIEROS LVM
subplot(2,1,1);
plot(t3,xn_f_f);
title('ACC3 - sentido W-E (yy)');
xlabel('t (s)');
ylabel('a (g)');
xticks(0:180:length(ISEP3(:,1))/100);
yticks(-0.015:0.003:0.015);
xlim([0 3600]);
ylim([-0.015 0.015]);

subplot(2,1,2);
plot(t4,xn_f_f1);
title('ACC4 - sentido N-S (xx)');
xlabel('t (s)');
ylabel('a (g)');
xticks(0:180:length(ISEP4(:,1))/100);
yticks(-0.015:0.003:0.015);
xlim([0 3600]);
ylim([-0.015 0.015]);

savefig(i,s);
close.figure(i));

dir anemometro *.lvm
files_ann = dir('anemometro *.lvm')

eval(['lvm_import ' files_ann(i).name]);
Dados1=ans.Segment1.data(:,3);
tv1=[0.5:0.5:length(Dados1(:,1))/2];
Dados2=ans.Segment1.data(:,4)*2; % Multiplica-se por dois por causa do erro
das velocidades no LABVIEW
tv2=[0.5:0.5:length(Dados2(:,1))/2];
Dados3=ans.Segment1.data(:,7);
tv3=[0.5:0.5:length(Dados3(:,1))/2];
Dados4=ans.Segment1.data(:,8)*2; % Multiplica-se por dois por causa do erro
das velocidades no LABVIEW
tv4=[0.5:0.5:length(Dados4(:,1))/2];

data_ann=datestr(files_ann(i).date, 'dd/mm/yyyy HH:MM');

% transforma os nomes dos ficheiros .lvm todos com o mesmo número de
% caracteres
while length(files_ann(i).name)<=30;
files_ann(i).name=strcat(files_ann(i).name, '000');
end

```

ANEXO I

```
while length(files_ann(i).name)<=31;
    files_ann(i).name=strcat(files_ann(i).name,'00');
end

while length(files_ann(i).name)<=32;
    files_ann(i).name=strcat(files_ann(i).name,'0');
end

% Substitui o '.' por '_' para eleiminar a extensão .lvm
zv(i,:)=strrep(files_ann(i).name, '.', '_');
sv=num2str(zv(i,:));

fv=figure(i);
subplot(2,1,1);
title('Anemometro 01 - Pos. SW');
yyaxis left;
plot(tv2,Dados2);
xlabel('t (s)');
ylabel('Vel Vento (Km/h)NW');
xticks(0:300:length(Dados2(:,1))/2);
yticks(0:10:50);
xlim([0 3600]);
ylim([0 50]);

yyaxis right;
plot(tv1,Dados1, '.');
xlabel('t (s)');
ylabel('Direcção do Vento (°)');
xticks(0:300:length(Dados1(:,1))/2);
yticks(-180:90:180);
yticklabels({'O','S','E','N','O'});
xlim([0 3600]);
ylim([-180 180]);

subplot(2,1,2);
yyaxis left;
plot(tv4,Dados4);
title('Anemometro 02 - Pos. NW');
xlabel('t (s)');
ylabel('Vel Vento (Km/h)NW');
xticks(0:300:length(Dados4(:,1))/2);
yticks(0:10:50);
xlim([0 3600]);
ylim([0 50]);

yyaxis right;
plot(tv3,Dados3, '.');
xlabel('t (s)');
ylabel('Direcção do Vento (°)');
xticks(0:300:length(Dados3(:,1))/2);
yticks(-180:90:180);
yticklabels({'O','S','E','N','O'});
xlim([0 3600]);
ylim([-180 180]);

savefig(i,sv);
close(figure(i));
end
end
```

ANEXO II – ROTINA PARA REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO DA TORRE

```
ACC_MAX= sqrt(xn_f_f1.^2+xn_f_f.^2); % COMBINAÇÃO DAS ACELERAÇÕES

for mv=1:length (ACC_MAX);
    if xn_f_f(mv,:) > 0 && xn_f_f1(mv,:) > 0; % ACC3 - POSITIVO & ACC4 -
    POSITIVO
        dirtmv(mv,:)= atan(xn_f_f1(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE -
    CONDIÇÃO PARA O 1° QUADRANTE
        elseif xn_f_f(mv,:) < 0 && xn_f_f1(mv,:) > 0; %ACC3 - NEGATIVO & ACC4 -
    POSITIVO
            dirtmv(mv,:)= pi + atan(xn_f_f1(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE -
    CONDIÇÃO PARA 2° QUADRANTE
            elseif xn_f_f(mv,:) < 0 && xn_f_f1(mv,:) < 0; % ACC3 - NEGATIVO & ACC4 -
    NEGATIVO
                dirtmv(mv,:)= pi + atan(xn_f_f1(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); % ARCOTANGENTE -
    CONDIÇÃO PARA 3° QUADRANTE
                elseif xn_f_f(mv,:) > 0 && xn_f_f1(mv,:) < 0; % ACC3 - POSITIVO & ACC4 -
    NEGATIVO
                    dirtmv(mv,:)= pi.*2 + atan(xn_f_f1(mv,:)./xn_f_f(mv,:)); %
    ARCOTANGENTE - CONDIÇÃO PARA O 4° QUADRANTE
                    end
                end
            end
        end

MAX_VAL=max(ACC_MAX);

% FILTRAGEM DO EVENTO CRITICO PARA 15 SEGUNDOS - ACELERAÇÃO MÁXIMA
AMP1=ACC_MAX(find(ACC_MAX==MAX_VAL)-1500:find(ACC_MAX==MAX_VAL)+1500); %
    AMPLITUDE DO EVENTO
DIR1=dirtmv(find(ACC_MAX==MAX_VAL)-1500:find(ACC_MAX==MAX_VAL)+1500); %
    DIRECÇÃO EM FUNÇÃO DA AMPLITUDE

% CONSTRUÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO POLAR DO MOVIMENTO DA TORRE
ps_tmv=polarscatter(DIR1,AMP1,'filled')
ps_tmv.SizeData=10;
ps_tmv.MarkerFaceColor='red';
thetaticks(0:45:360);
thetaticklabels({'E','NE','N','NW','W','SW','S','SE'});
rticks(0:0.0015:0.015);
rlim([0 0.015]);
```