



Avaliação Experimental dos Efeitos Dinâmicos da Ação do Vento na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem

CAIO CESAR TROLEZ DE SALVO

novembro de 2017

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

CAIO CÉSAR TROLEZ DE SALVO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro

NOVEMBRO DE 2017

ÍNDICE GERAL

| | |
|---|------|
| Resumo..... | v |
| Abstract | vii |
| Agradecimentos | ix |
| Índice de Texto | xi |
| Índice de Figuras..... | xiii |
| Índice de Tabelas..... | xvii |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| Capítulo 2 Torre de telecomunicações do Monte da Virgem..... | 9 |
| Capítulo 3 Investigações anteriores na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem | 13 |
| Capítulo 4 Sistema de monitorização permanente: análise dos dados medidos | 23 |
| Capítulo 5 Considerações Finais | 49 |
| Referências Bibliográficas | 51 |
| Anexo I – Algoritmos Matlab..... | 53 |
| Anexo II – Eventos críticos e não críticos | 57 |

RESUMO

Este documento consiste na análise e avaliação da ação do vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem (Vila Nova de Gaia, Portugal) através da análise de dados já coletados por um sistema de monitorização instalado.

Este trabalho enquadra-se numa parceria técnica entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Portugal Telecom (Altice).

A torre de telecomunicações do Monte da Virgem, é uma torre de aproximadamente 177 m de altura, em estrutura mista aço-betão, que, desde o seu início de utilização, no ano de 1995, vem apresentando problemas de vibrações excessivas devido à atuação de regimes específicos de ventos.

Com o objetivo de caracterizar a resposta em acelerações da torre e os regimes de vento foi realizada a análise extensiva dos dados recolhidos através do sistema de monitorização instalado nela. A análise dos dados medidos envolveu um tratamento prévio dos dados, em particular dos acelerómetros, devido, sobretudo, à presença de perturbações dos sinais devidas aos fatores não relacionados com a ação do vento, como é o caso da ação das pessoas, o movimento do elevador, o funcionamento de equipamentos, entre outros.

Para o efeito foi desenvolvido um programa em ambiente Matlab que possibilitou a filtragem do sinal, uma vez que as frequências dos principais modos de vibração da torre situam-se entre 0,478 Hz a 5,979 Hz. A análise dos valores máximos das acelerações durante um período de aproximadamente 1 mês permitiu a identificação e caracterização de um número significativo de eventos críticos que ocorrem sob a ação de ventos específicos. A ocorrência destes eventos está associada a vibrações excessivas da parte metálica da torre que induz na estrutura de betão níveis de aceleração muito superiores aos admissíveis para este tipo de estrutura.

Palavras-chave: Torre de telecomunicações; sistema de monitorização permanente; frequências e modos de vibração; acelerações; velocidade e direção do vento; eventos críticos.

ABSTRACT

This document consists of the analysis and evaluation of the wind action in the telecommunication tower of Monte da Virgem (Vila Nova de Gaia, Portugal) through the analysis of data already collected by an installed monitoring system.

This work is part of a technical partnership between the Instituto Superior de Engenharia do Porto and Portugal Telecom (Altice).

The Monte da Virgem telecommunication tower is a tower of approximately 177 m high, in a mixed steel-concrete structure, which, since its beginning in 1995, has presented excessive vibration problems due to the specific wind regimes.

In order to characterize the response in tower accelerations and wind regimes an extensive analysis of the data collected through the monitoring system installed in the tower was performed. The analysis of the measured data involved a previous treatment of the data, in particular of the accelerometers, mainly due to the presence of signal disturbances due to factors not related to the action of the wind, as is the case of people's action, the movement of the elevator, the operation of equipment, among others.

For this purpose, a Matlab program was developed that enabled the filtering of the signal, since the frequencies of the main modes of vibration of the tower are between 0,478 Hz and 5,979 Hz. The analysis of maximum acceleration values during a period of approximately 1 month allowed the identification and characterization of a significant number of critical events that occur under the action of specific winds. The occurrence of these events is associated with excessive vibrations of the metallic part of the tower that induces in the concrete structure acceleration levels much higher than the allowable ones for this type of structure.

Keywords: Telecommunications tower; permanent monitoring system; frequencies and modes of vibration; accelerations; wind speed and direction; critical events.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Carmem, que sempre acreditou em mim e fez esse sonho ser tornar realidade, sempre me apoiando desde pequeno e sempre me incentivando a me tornar uma pessoa e um profissional melhor.

Ao meu pai, Giuseppe, que, apesar da distância, sempre ajudou eu e minha mãe com conselhos e sempre nos acompanhando, sem que nada faltasse para minha chegada até aqui.

Aos Professores do Mackenzie, que sempre ajudaram e me incentivaram a realizar pesquisas e me tornar um aluno melhor.

Ao Professor Alfonso Pappalardo e à Professora Magda que uniram forças para tornar a Escola de Engenharia do Mackenzie cada vez mais forte e se empenharam muito para que o programa de dupla titulação conseguisse ajudar profissionalmente seus alunos.

Aos meus professores do Instituto Superior de Engenharia do Porto que sempre foram solícitos comigo e me ajudaram a conseguir êxito na parte do programa em que estive presente no Instituto.

Ao professor Carlos Félix que sempre ajudou os alunos brasileiros em terras estrangeiras e nos deixou sempre muito confortável, incluo também os colaboradores das relações externas e os demais profissionais que nos ajudaram em Portugal.

Ao, hoje, Engenheiro Rafael Di Pauli, que me ajudou no início do trabalho me mostrando e tirando dúvidas sobre o que ele tinha feito em relação ao trabalho na torre.

Ao Professor Diogo Ribeiro, que, apesar de não ter tido aulas presenciais com ele, pude aprender muito sobre dinâmica das estruturas, se mostrando ser um grande docente, sempre solícito e disposto a ajudar, sempre colaborando a melhorar cada vez mais esse trabalho.

Ao Engenheiro Jorge Leite que me ajudou em Portugal e me forneceu alguns materiais para realização do trabalho.

Ao Engenheiro Jorge Garcia da Portugal Telecom, que sempre ajudou no acesso à torre e em alguns problemas no local.

Aos meus amigos, tanto os Portugueses quanto os Brasileiros, com certeza eles foram de suma importância sempre incentivando e compartilhando momentos inesquecíveis.

ÍNDICE DE TEXTO

| | | |
|------------|--|----|
| CAPÍTULO 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Considerações Iniciais..... | 1 |
| 1.2 | Revisão Bibliográfica..... | 2 |
| 1.2.1 | Torre de TV de Stuttgart — deslocamento do topo causado pelos efeitos do sol e do vento - (Breuer et al, 2008)..... | 3 |
| 1.2.2 | Monitoramento da integridade estrutural com base na análise estática e dinâmica de torres de transmissão de energia (Fei et al, 2011)..... | 4 |
| 1.2.3 | Investigação dinâmica de torres de TV - (Beirrow & Osterrieder, 2001)..... | 6 |
| 1.3 | Objetivos..... | 6 |
| CAPÍTULO 2 | Torre de telecomunicações do Monte da Virgem..... | 9 |
| CAPÍTULO 3 | Investigações anteriores na Torre de Telecomunicações do Monte da Virgem..... | 13 |
| 3.1 | Modelo numérico..... | 13 |
| 3.2 | Parâmetros modais..... | 15 |
| 3.3 | Ensaio de vibração ambiental..... | 15 |
| 3.4 | Comparação entre modelo numérico e dados experimentais..... | 18 |
| 3.5 | Sistema de monitorização contínua..... | 19 |
| CAPÍTULO 4 | Sistema de monitorização permanente: análise dos dados medidos..... | 23 |
| 4.1 | Aprimoramento do sistema de monitorização..... | 23 |
| 4.2 | Procedimento de recolha de dados..... | 26 |
| 4.3 | Processamento prévio dos dados medidos..... | 26 |
| 4.3.1 | Filtragem dos sinais..... | 27 |
| 4.4 | Análise de dados: envolvente das acelerações máximas..... | 29 |

ÍNDICE DE TEXTO

| | | |
|------------|---|----|
| 4.4.1 | Envolventes de acelerações sem correção de eventos esporádicos..... | 30 |
| 4.4.2 | Correção de eventos esporádicos (não relacionados com a ação do vento)..... | 32 |
| 4.4.3 | Envolventes de acelerações com correção de eventos esporádicos..... | 35 |
| 4.5 | Análise de dados: eventos críticos e não críticos..... | 36 |
| 4.5.1 | Eventos críticos..... | 37 |
| 4.5.2 | Eventos não críticos..... | 41 |
| 4.6 | Análise do efeito do vento..... | 44 |
| CAPÍTULO 5 | Considerações Finais..... | 49 |
| 5.1 | Conclusões..... | 49 |
| 5.2 | Desenvolvimentos Futuros..... | 50 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Comparação de diversos espectros de potência do vento. | 2 |
| Figura 1.2– Resposta dinâmica da estrutura devido a rajadas de vento. | 4 |
| Figura 1.3 – Modelo numérico da torre de transmissão e representação do 1º modo de vibração..... | 5 |
| Figura 1.4 – Deslocamento horizontal da torre e variação da frequência em função da velocidade do vento. | 5 |
| Figura 1.5 – Disposição dos equipamentos instalados na torre..... | 6 |
| Figura 2.1 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem..... | 9 |
| Figura 2.2 – Estrutura metálica no interior da torre: a) vista geral; b) consola de fixação das vigas metálicas. | 10 |
| Figura 2.3 – Palito metálico: a) vista geral; b) vista da fixação ao fuste de betão. | 10 |
| Figura 2.4 – Projetos arquitetônicos iniciais da torre: a) vista da torre; b) planta baixa do térreo..... | 11 |
| Figura 3.1 – Modelo numérico da torre do Monte da Virgem elaborado no programa Robot..... | 14 |
| Figura 3.2 – Vigas metálicas de suporte às escadas e de contraventamento..... | 14 |
| Figura 3.3 – Principais modos de vibração da torre..... | 15 |
| Figura 3.4 – Pontos de colocação dos sismógrafos para realização do ensaio de vibração ambiental. | 16 |
| Figura 3.5 – Parâmetros modais experimentais na direção X..... | 17 |
| Figura 3.6 – Parâmetros modais experimentais na direção Y..... | 17 |
| Figura 3.7 – Comparação entre as configurações modais (após a calibração) e experimental na direção X. | 19 |
| Figura 3.8 – Anemómetros na torre: a) Disposição; b) anemómetro localizado a noroeste..... | 20 |
| Figura 3.9 – Acelerómetros na torre: a) disposição; b) acelerómetros localizados à cota 312,65 m. | 21 |
| Figura 3.10 – Layout do interface gráfico de aquisição de dados em Labview..... | 21 |
| Figura 4.1 - - Estação meteorológica PCE – FWS – 20..... | 23 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.2 – Sensores que compõem a estação meteorológica..... | 24 |
| Figura 4.3 – Tela portátil da estação meteorológica..... | 25 |
| Figura 4.4 – Estação meteorológica instalada na torre do Monte da Virgem..... | 25 |
| Figura 4.5 – Arquivo que armazena os valores das acelerações..... | 27 |
| Figura 4.6 – Filtro passa-baixo ideal..... | 28 |
| Figura 4.7 – Função de transferência de um filtro Chebyshev tipo 2 de 8ª ordem..... | 28 |
| Figura 4.8 – Filtro Chebyshev tipo 2 com $f_c = 15$ Hz..... | 29 |
| Figura 4.9 – Envolvente das acelerações na direção X à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016..... | 31 |
| Figura 4.10 - Envolvente das acelerações na direção Y à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016..... | 32 |
| Figura 4.11 – Registro de acelerações na direção X à cota 312,65 m no dia 14/09/2016 entre 11:12 e 12:12..... | 33 |
| Figura 4.12 – Detalhe do pico de acelerações registrado..... | 33 |
| Figura 4.13 – Janela de ajuste aplicada ao registro de acelerações..... | 34 |
| Figura 4.14 – Registro das acelerações com o fator de ajuste..... | 35 |
| Figura 4.15 - – Envolvente das acelerações com fator de ajuste na direção X à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016..... | 36 |
| Figura 4.16 – Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12..... | 37 |
| Figura 4.17 – Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 06/09/2016 entre os instantes 3000 s e 3030 s..... | 38 |
| Figura 4.18 – Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento crítico..... | 38 |
| Figura 4.19 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 06/09/2016 entre as 10:12 e as 11:12..... | 39 |

Figura 4.20 - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 06/09/2016 entre os instantes 1500 s e 1560 s. 40

Figura 4.21 - Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento crítico. 40

Figura 4.22 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 22/08/2016 entre as 02:12 e as 03:12. 41

Figura 4.23 - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 22/08/2016 entre os instantes 3000 e 3030 segundos..... 42

Figura 4.24 – Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento não crítico..... 42

Figura 4.25 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 31/08/2016 entre as 03:12 e as 04:12. 43

Figura 4.26 - - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 31/08/2016 entre os instantes 1580 s e 1620 s. 43

Figura 4.27 - Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento não crítico..... 44

Figura 4.28 – Registros da direção do vento no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12: a) anemómetro 1; b) anemómetro 2. 45

Figura 4.29 – Registro da velocidade do vento no anemómetro 1 no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12. 46

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Parâmetros modais da estrutura do modelo numérico. | 15 |
| Tabela 3.2 – Comparação entre os parâmetros modais do modelo numérico e os experimentais. | 18 |
| Tabela 3.3 - Comparação entre os parâmetros modais (após a calibração) e experimental na direção X. | 19 |
| Tabela 4.1 – Identificação dos eventos críticos no período em análise..... | 41 |
| Tabela 4.2 - Identificação dos eventos não críticos no período em análise. | 44 |
| Tabela 4.3 - Velocidade do vento para os casos com acelerações máximas. | 46 |
| Tabela 4.4 – Velocidade do vento para os casos mais recorrentes. | 47 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde os primórdios da humanidade a necessidade de se comunicar através de grandes distâncias vem fazendo com que sejam criados novos meios de transmissão além do aperfeiçoamento dos meios já existentes.

Antigamente, as trocas de mensagens a grandes distâncias dependiam de métodos como os pombos-correios, nuvens de fumaça ou mensageiros de cavalo, navio ou carroça. Há não mais de cem anos uma mensagem demorava cerca de um mês para sair do ocidente e chegar no Japão. Com o avanço da elétrica e eletromagnetismo foi possível mudar esse panorama. O físico italiano Guglielmo Marconi foi a primeira pessoa a usar ondas eletromagnéticas para transmitir uma mensagem através do oceano Atlântico.

Depois que se descobriu que uma onda eletromagnética pode se propagar por longas distâncias, o desafio tem sido aperfeiçoar a técnica para fazer com que elas carreguem cada vez mais informações a distâncias ainda mais longas. Um dos meios eficazes para a transmissão e recepção desse sinal são as torres de telecomunicações, que para evitar interferências devido ao meio urbano precisam ter uma altura considerável em relação ao meio onde se inserem.

Com a necessidade de estruturas altas e esbeltas como as torres de telecomunicações, tornou-se cada vez mais desafiante para a engenharia civil, o desenvolvimento de novas técnicas de análise e dimensionamento, uma vez que estas estruturas requerem novas considerações estruturais e ambientais em relação à estruturas de porte comum.

Com os avanços tecnológicos nos meios de cálculo e construção civil, exige-se que as estruturas sejam cada vez mais funcionais e seguras. Com isso, torna-se mais exigente o cálculo das mesmas, gerando estruturas mais confiáveis e confortáveis para o utilizador.

Para o cálculo de qualquer estrutura é preciso levar em conta não só as cargas gravitacionais, como o peso próprio da estrutura e a sobrecarga da mesma, de acordo com sua utilização. É preciso, também, levar em consideração o efeito do vento, que, apesar de ser um efeito dinâmico, muitas vezes ele é considerado em sua forma estática, através de considerações e simplificações.

Em estruturas com grande porte em altura, como edificações altas, torres de telecomunicações, torres eólicas, etc. é difícil, em relação ao cálculo estrutural, considerar o vento de maneira estática, pois, quanto mais alta a estrutura, mais difícil é a determinação de parâmetros simplificadores para o efeito do mesmo. Com isso, em determinados casos o vento necessita ser estudado enquanto ação dinâmica e, portanto, é preciso levar em conta outros comportamentos estruturais e as características dinâmicas do vento.

O fator principal que influencia a resposta dinâmica é a frequência de vibração natural da estrutura, que, depende principalmente de sua massa mobilizada e da rigidez. É possível, de maneira experimental ou numérica determinar as frequências de vibração das estruturas e as correspondentes configurações modais, principalmente de torres, pois elas possuem uma geometria mais simples, facilitando o processo de identificação modal.

Para a análise estrutural, os espectros mais utilizados para o vento são os definidos por Davenport, von Kármán, Harris, Kaimal e Simiu, conforme apresentado em Beça (2010). Enquanto ação dinâmica, o vento pode induzir vibrações nas estruturas, função da sua frequência de excitação que geralmente se situa entre 0,001 e 5 Hz (Figura 1.1), da sua maior ou menor proximidade das frequências próprias de vibração das estruturas.

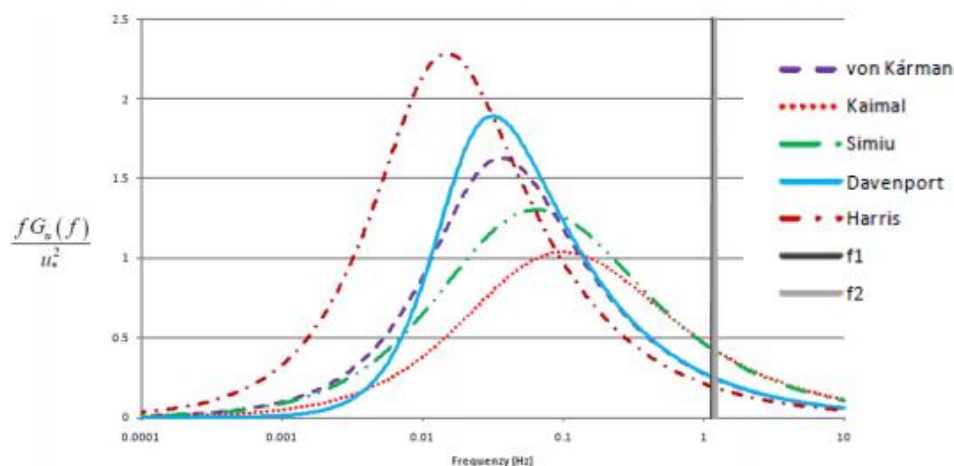


Figura 1.1 – Comparação de diversos espectros de potência do vento.

Assim, é de especial relevância a análise das vibrações em excesso em estruturas esbeltas pois, do ponto de vista da segurança, essas vibrações são potencialmente causadoras de danos estruturais, podendo mesmo conduzir ao colapso da estrutura, e, do ponto de vista da utilização, podem gerar o desconforto aos usuários, tornando-se necessário estudos para minimizar os seus danos e desenvolver métodos de monitoramento e prevenção.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Cada vez mais as estruturas tendem a ser mais esbeltas, uma vez que ao se utilizar *software* de cálculo automático tem-se uma estimativa cada vez mais precisa de valores de esforços e deformações induzidos

pelas ações. Porém, diante essa realidade, verifica-se que estruturas de grande porte como pontes, estádios, torres eólicas, entre outras ficam sujeitas às vibrações devidas ao vento, aos sismos ou mesmo aos utilizadores da estrutura.

Face esta nova realidade, a monitorização e ensaios de verificação do comportamento dessas estruturas são cada vez mais utilizados. Em seguida são apresentados alguns casos semelhantes ao proposto neste trabalho, onde algumas estruturas apresentam vibrações excessivas e por isso poderão afetar a sua integridade estrutural e afetar sua normal utilização.

1.2.1 Torre de TV de Stuttgart — deslocamento do topo causado pelos efeitos do sol e do vento - (Breuer et al, 2008).

Uma equipe de pesquisadores da Universidade de Tecnologia de Opole e da Universidade de Ciências Aplicadas de Munique realizaram a monitorização de uma torre de TV localizada em Stuttgart, Alemanha. A torre é feita em betão armado, de seção tubular, com um diâmetro variando entre 10,8 m, na base, até 5,04 m, no topo. Projetada e construída por Leonhardt, a torre possui um fuste de betão de 161 m de altura e um palito metálico com 51 m de altura, totalizando, aproximadamente, 212 m de altura, tendo sido a primeira torre construída em betão com o objetivo de transmitir sinais de televisão.

O estudo do seu comportamento dinâmico foi realizado com base numa monitorização com recurso a GPS (sistema de posicionamento global) que revelou elevada eficiência e precisão na caracterização dos deslocamentos do tipo da torre.

A título exemplificativo, ilustra-se na Figura 1.2, a resposta dinâmica da torre em deslocamentos devido à ação do vento. É possível observar que o vento de sudoeste com uma velocidade de 17 m/s (61,2 km/h) provocou um deslocamento do topo da torre de 6 cm na direção nordeste.

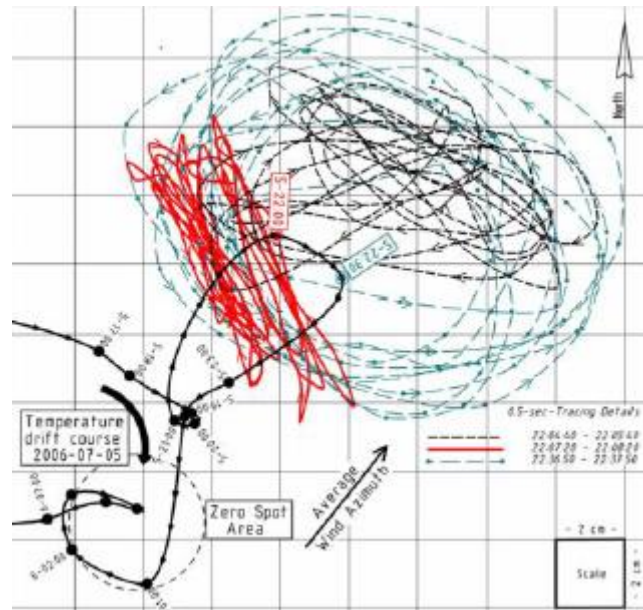


Figura 1.2– Resposta dinâmica da estrutura devido a rajadas de vento.

Através deste estudo, foi ainda possível concluir que os maiores deslocamentos ocorreram devido a dois fatores distintos. Os deslocamentos quase-estáticos máximos ocorreram devido ao efeito da radiação solar e combinado com a variação de temperatura do ar durante as estações do ano, e os deslocamentos dinâmicos máximos ocorreram devido à ação do vento.

1.2.2 Monitoramento da integridade estrutural com base na análise estática e dinâmica de torres de transmissão de energia (Fei et al, 2011)

Pesquisadores de uma universidade chinesa realizaram um estudo referente a monitorização de torres de transmissão de 131 m de altura, tendo em vista a caracterização do desgaste que é causado na estrutura com o passar do tempo, e também a caracterização dos seus deslocamentos sob a ação do vento. Para a pesquisa foi elaborado um modelo numérico no *software* ANSYS, conforme ilustrado na Figura 1.3, tendo em vista a obtenção das principais frequências e modos de vibração da torre.

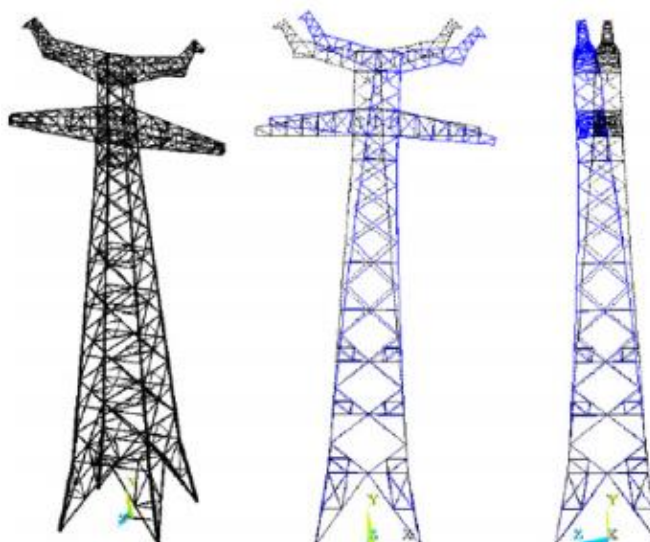


Figura 1.3 – Modelo numérico da torre de transmissão e representação do 1º modo de vibração.

Os resultados permitiram constatar que a partir de uma determinada velocidade do vento, em particular para velocidades superiores a 40-45 m/s (144-162 km/h), verificou-se uma forte redução do valor da frequência do modo de vibração fundamental da torre e é associado a um significativo aumento dos valores dos deslocamentos horizontais, reduzindo assim sua frequência, conforme se constata no gráfico da Figura 1.4.

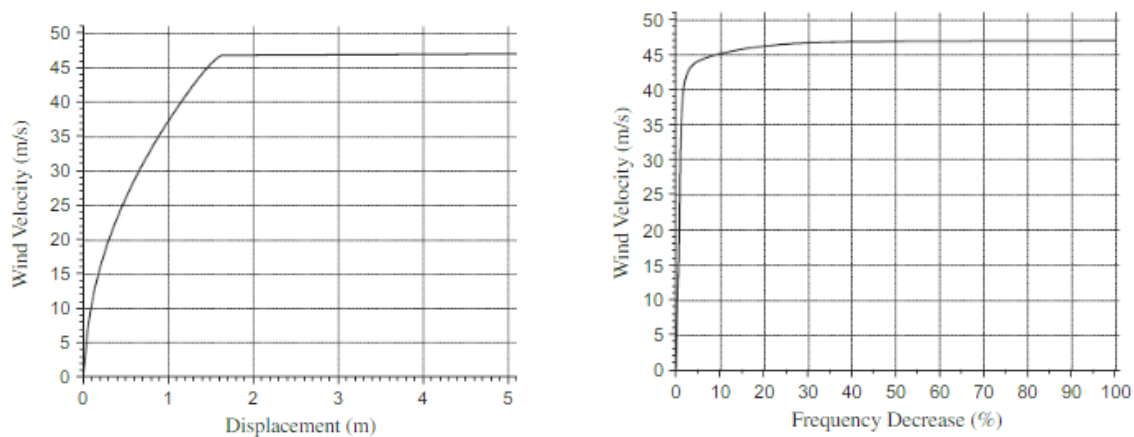


Figura 1.4 – Deslocamento horizontal da torre e variação da frequência em função da velocidade do vento.

Conclui-se também que, a avaliação da estabilidade da estrutura, pode ser realizada com base na frequência de vibração, que por esse motivo constitui-se como um indicador da integridade estrutural da torre.

1.2.3 Investigação dinâmica de torres de TV - (Beirow & Osterrieder, 2001)

Com o intuito de verificar a viabilidade de uma mudança do tipo de uso, em abril de 1997, Beirow e Osterrieder instalaram um sistema de monitorização contínuo na torre de telecomunicações de Cottbus, na Alemanha. A torre possui uma altura de 137,9 m de altura, e é composta por um fuste de betão armado e uma antena de aço no topo do mesmo.

O sistema de monitorização consistiu, em dois geofones, capazes de identificar vibrações da estrutura, posicionados na parte superior do fuste de betão (Figura 1.5). A medição da velocidade e direção do vento é realizada de maneira independente com recurso a uma estação meteorológica localizada a 10 m da base da torre. A localização dos sensores foi realizada com base no estudo de um protótipo em túnel de vento.

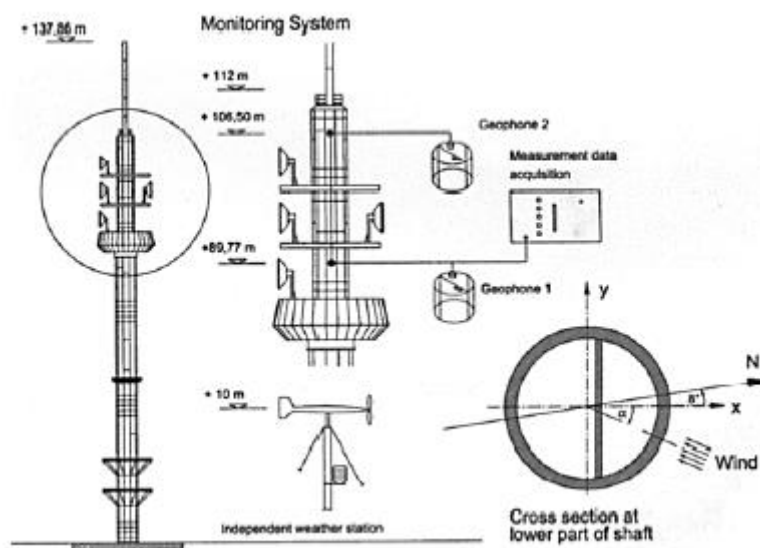


Figura 1.5 – Disposição dos equipamentos instalados na torre.

Com este estudo foi possível caracterizar a resposta dinâmica da estrutura e extrapolar os regimes de vento que geram maiores deslocamentos na estrutura, com recurso a redes neurais, obtendo-se, deste modo, uma previsão confiável da vida útil da estrutura.

1.3 OBJETIVOS

Com o avanço da tecnologia e dos estudos dinâmicos, atualmente, as novas estruturas são concebidas levando-se em conta o efeito da ação dinâmica do vento, que é tipicamente a ação determinante em torres de telecomunicações. No entanto, em estruturas antigas, muitas vezes, não foi considerada a ação dinâmica do vento devido sobretudo à inexistência de *softwares* de cálculo automático capazes, o que teve como consequência que muitas dessas estruturas apresentem nos dias de hoje fenómenos de amplificação de suas respostas dinâmicas sob ação do vento.

Neste enquadramento, foi realizada uma parceria entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Portugal Telecom (atualmente Alice) para a análise dinâmica da torre de telecomunicações do Monte da Virgem, localizada em Vila Nova de Gaia (Portugal). A torre, desde o início de sua operação, em 1995, vem apresentando com alguma regularidade fenómenos de vibrações excessivas, devido ao seu porte em altura, associadas a regimes de ventos específicos. Estas vibrações vêm causando oscilações significativas da estrutura, colocando em risco a operacionalidade da estrutura e o conforto dos seus utilizadores. Além disso, tem-se verificado que os parafusos de ligação entre o fuste de betão e o palito metálico, têm que ser verificados e substituídos com uma regularidade acima do habitual.

Na torre já foram desenvolvidos estudos anteriores para caracterizar o seu comportamento dinâmico, nomeadamente os realizados por estudantes do Mestrado em Engenharia Civil do ISEP. Neste âmbito foi realizado um ensaio de vibração ambiental, para obter as principais frequências e modos de vibração da torre, além do desenvolvimento de um modelo numérico com recurso a um *software* de elementos finitos e a sua a calibração com base em algoritmos genéticos. Mais recentemente foi também instalado na torre um sistema de monitorização permanente composto de 4 acelerómetros e 2 anemómetros tendo em vista a identificação dos eventos de vibração excessiva.

Face ao oposto, o presente trabalho tem por principal objetivo analisar e interpretar os dados experimentais recolhidos através do sistema permanente de monitorização. Adicionalmente foram realizados melhoramentos no sistema de monitorização, em particular foi instalada na torre uma estação meteorológica com capacidade de obtenção da temperatura ambiente e interior, da humidade, do índice pluviométrico e da velocidade e direção do vento. Deste modo, será possível no futuro avaliar a influência destas grandezas nos valores das frequências e o modo de vibração da torre. Com base nos dados já coletados pelo sistema de monitorização, serão caracterizadas as acelerações da torre na perspetiva da identificação de eventos críticos e correspondentes regimes de ventos, tentando compreender melhor os modos de vibração da estrutura que neles participam.

CAPÍTULO 2

TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

A torre de telecomunicações do Monte da Virgem, Figura 2.1, se localiza em Vila Nova de Gaia (Portugal), foi construída em 1995 e é uma das estruturas mais altas de Portugal. Ela foi idealizada para realizar a distribuição dos sinais de televisão, provenientes do emissor de Monsanto, em Lisboa, até um conjunto de retransmissores localizados pelo centro e norte de Portugal e deste modo garantindo que esses sinais chegassem às antenas das residências, realizando uma melhor distribuição do sinal devido às interferências topográficas do terreno.



Figura 2.1 - Torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

A torre é constituída por um fuste de betão, de altura igual a 126 m, e um palito metálico com 51 m de extensão, totalizando uma altura de aproximadamente 177 m. A seção da torre é composta por um fuste de betão armado de seção circular vazada, com diâmetro variando de 14,3 m na base até 7,7 m no topo do fuste. A torre possui 5 pisos técnicos localizados entre as alturas de 94,9 m e 112 m, sendo que dois desses pisos são cobertos e todos com acesso permitido a pessoas autorizadas. O betão utilizado é da classe de resistência C25/30.

Todos os pisos são constituídos por lajes de betão pré-esforçado em consola, fixadas no fuste. Os pisos cobertos são totalmente fechados e neles estão localizados equipamentos de telecomunicações. Os pisos

descobertos possuem guarda corpos em seu contorno e neles são fixados equipamentos que dão suporte para as antenas.

No interior do fuste de betão é possível verificar a existência de vigas metálicas apoiadas em consolas metálicas ligadas à parede do fuste, estas vigas servem para dar suporte às escadas metálicas além de suportarem a caixa de elevador e servirem de contraventamento para o fuste de betão, evitando fenómenos de ovalização sob ação do vento.



a)



b)

Figura 2.2 – Estrutura metálica no interior da torre: a) vista geral; b) consola de fixação das vigas metálicas.

No topo do fuste de betão, é fixado através de ligações aparafusadas o palito metálico. O palito metálico possui uma altura de 51 metros e é constituído por perfis do tipo H e que são travados por meio de diagonais e transversas formados por perfis tipo U.



a)



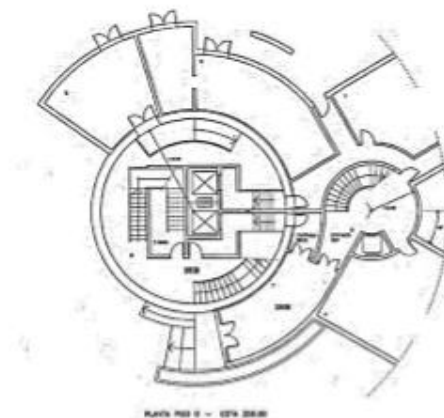
b)

Figura 2.3 – Palito metálico: a) vista geral; b) vista da fixação ao fuste de betão.

Inicialmente estava prevista a construção de mais dois pisos de betão, destinados a um restaurante, porém, por motivos financeiros não foram executados.



a)



b)

Figura 2.4 – Projetos arquitetônicos iniciais da torre: a) vista da torre; b) planta baixa do térreo.

Atualmente existe o desejo de usar a torre como um ponto turístico de Vila Nova de Gaia, considerando a possibilidade da implantação de um restaurante nos andares superiores da torre.

CAPÍTULO 3

INVESTIGAÇÕES ANTERIORES NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

No âmbito da parceria entre o Instituto Superior de Engenharia do Porto e a Portugal Telecom (atual Altice), já foram realizados diversos estudos e trabalhos académicos e científicos ao longo dos últimos 2 anos tendo em vista a caracterização numérica e experimental do comportamento dinâmico da torre sob ação do vento.

Nas próximas secções será detalhado as tarefas que já foram realizadas e os dados referentes à torre que já foram obtidos.

3.1 MODELO NUMÉRICO

Em trabalhos anteriores foi desenvolvido um modelo numérico da torre no programa *Autodesk Robot Structural Anaysis*, uma ferramenta de cálculo estrutural baseada no método dos elementos finitos (PAULI,2016).

A criação do modelo numérico da estrutura existente envolveu alguns cuidados na sua elaboração, nomeadamente no que toca às características dos materiais, geometria, condições de vinculação, tentando que o mesmo represente da melhor forma a estrutura em estudo.

Com base nos projetos de arquitetura e estruturas da torre foi possível reproduzir no modelo numérico a geometria da estrutura, porém, foram verificadas algumas divergências entre o projeto e o executado e, como o modelo deve representar uma estrutura existente, foram seguidas as dimensões resultantes de um levantamento geométrico da torre e não as do projeto.

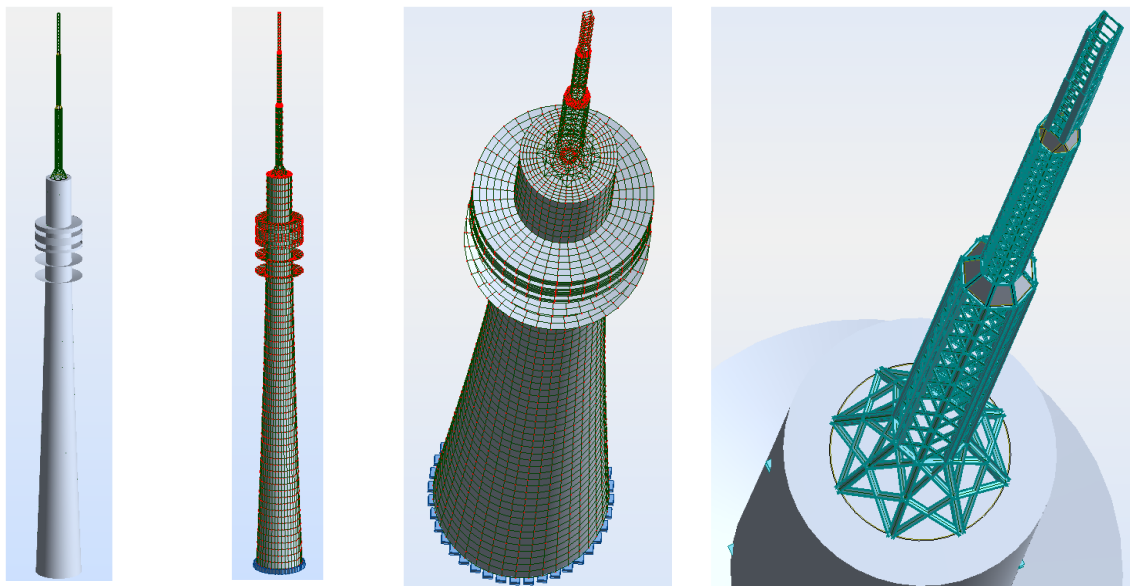


Figura 3.1 – Modelo numérico da torre do Monte da Virgem elaborado no programa *Robot*.

O modelo numérico foi elaborado levando em consideração um engastamento na ligação da estrutura da torre às fundações, desconsiderando os efeitos de interação com o solo e possíveis recalques. Foram ainda modeladas as vigas metálicas que servem de suporte à escadaria e que realizam um contraventamento das paredes da torre (Figura 3.2).

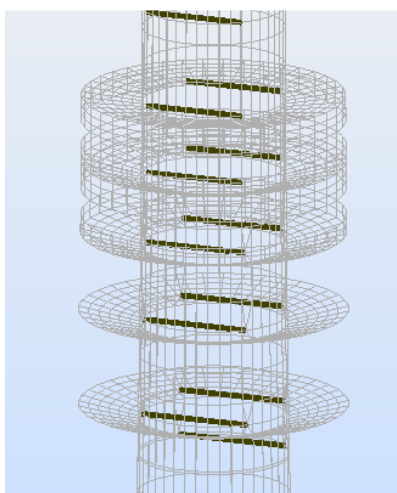


Figura 3.2 – Vigas metálicas de suporte às escadas e de contraventamento.

O modelo é composto por 5618 nós, 702 barras e 49 painéis (paredes e lajes). A malha de elementos finitos foi definida com base no método de Coons, por meio de elementos finitos de 4 nós, quadriláteros e com dimensões 0,5x0,5m.

3.2 PARÂMETROS MODAIS

Com base no modelo numérico desenvolvido, foi realizada a análise modal da estrutura com o objetivo de identificar as suas principais frequências naturais e modos de vibração. Na Figura 3.3 ilustram-se os 4 primeiros modos de vibração que mobilizam uma parte significativa da massa da estrutura e envolvem essencialmente a flexão do fuste e do palito metálico.

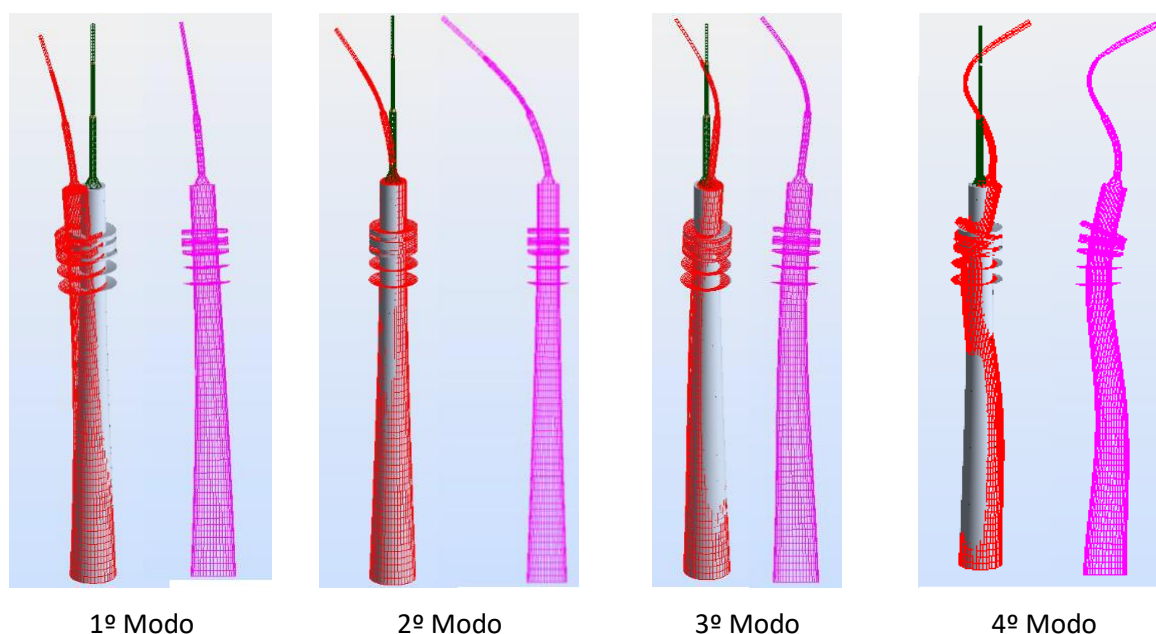


Figura 3.3 – Principais modos de vibração da torre.

Como a estrutura é simétrica, os modos de vibração são idênticos nas direções principais (X e Y) e por simplificação são apenas apresentados as frequências dos modos na direção X, assim como as correspondentes massas mobilizadas, conforme ilustrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros modais da estrutura do modelo numérico.

| Modo | Frequência (Hz) | Período (s) | Massa mobilizada na direção X (%) |
|------|-----------------|-------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,492 | 2,032 | 49,0 |
| 2 | 0,897 | 1,115 | 2,4 |
| 3 | 2,4567 | 0,407 | 17,5 |
| 4 | 5,807 | 0,172 | 8,7 |

3.3 ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

Pauli (2016) salienta que, os ensaios de vibração ambiental, são cada vez mais usados na obtenção dos parâmetros modais mais representativos das estruturas, nomeadamente as frequências naturais e os modos de vibração.

O ensaio de vibração ambiental da torre foi realizado no dia 18 de abril de 2016 com recurso a dois sismógrafos da marca GeoSIG, modelo GMS Plus+ munidos de acelerómetros tri-axiais do tipo “force-balance”, e que são capazes de medir as acelerações nas três direções (X, Y e Z).

O ensaio consistiu em medir as acelerações em diferentes pontos da estrutura com base num conjunto de configurações experimentais (setups). Em cada setup, um dos sismógrafos é posicionado de maneira fixa, sobre um ponto de referência, enquanto o outro é colocado de maneira móvel, em pontos predeterminados da estrutura (Figura 3.4). Devido às dificuldades de acesso direto a pontos do fuste de betão, optou-se por colocar os sismógrafos nas vigas metálicas, de suporte da escada, uma vez que estes elementos estão diretamente ligados ao fuste de betão.

O sismógrafo de referência foi fixado na cota 104,4 m, enquanto o sismógrafo móvel foi posicionado em 12 pontos diferentes, conforme os detalhes da Figura 3.4.

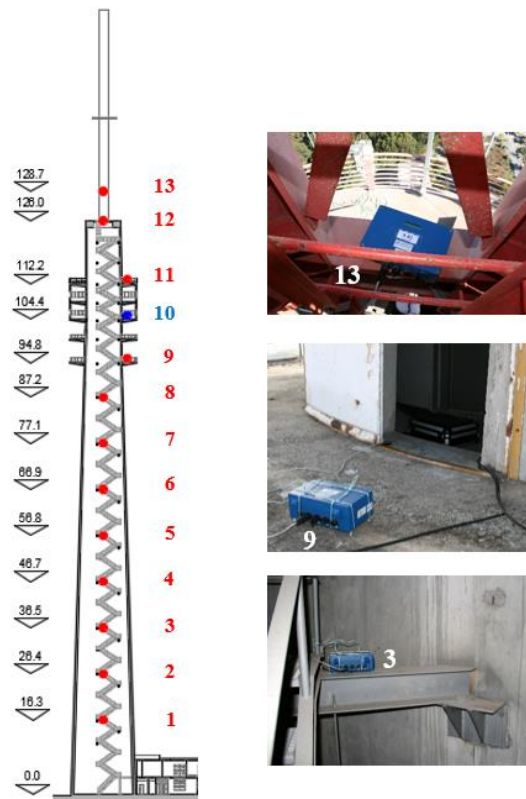


Figura 3.4 – Pontos de colocação dos sismógrafos para realização do ensaio de vibração ambiental.

Devido aos elevados níveis de radiação eletromagnética emitidos pelas antenas de transmissão, não foi possível a colocação do sismógrafo em pontos a cotas elevadas do palito metálico, limitando por isso a sua caracterização dinâmica. O único ponto de medição localizado no palito metálico foi posicionado a 2,65 m de altura, em relação ao topo do fuste de betão.

Após a coleta dos dados dos sismógrafos foi aplicada uma técnica de identificação modal para obter as principais frequências naturais e modos de vibração nas direções X e Y, assim como os correspondentes coeficientes de amortecimento (Figura 3.5 e Figura 3.6).

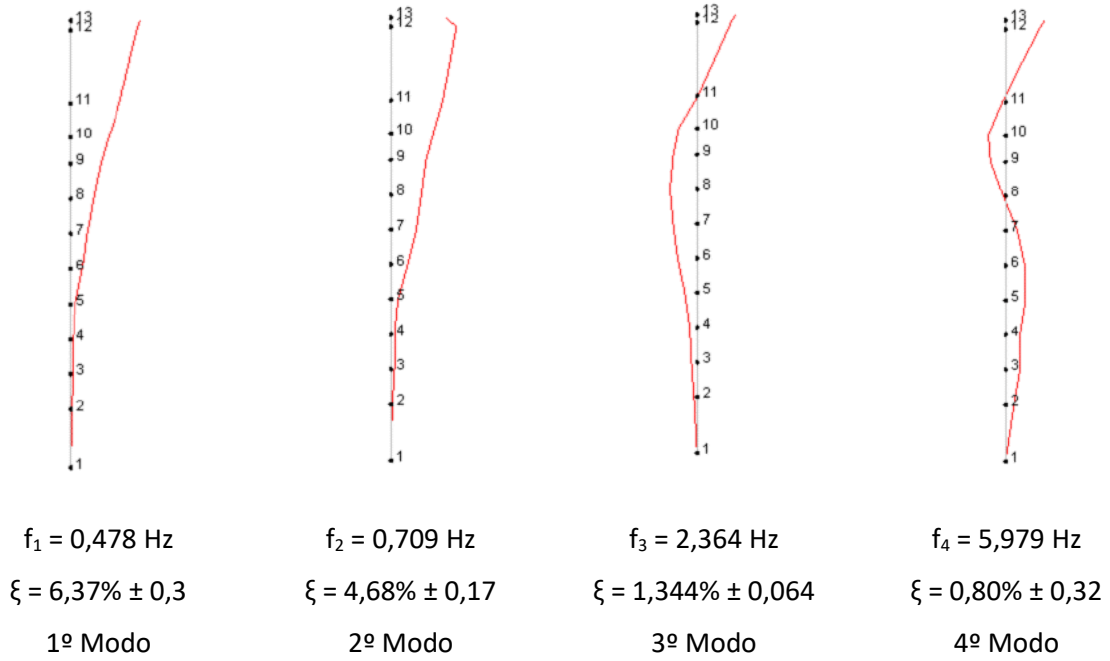


Figura 3.5 – Parâmetros modais experimentais na direção X.

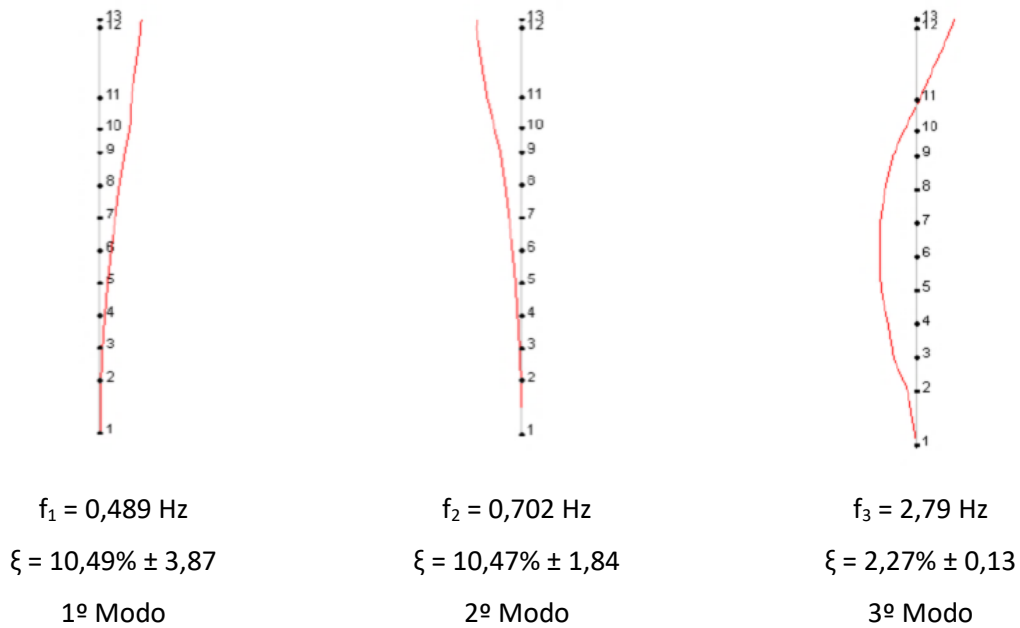


Figura 3.6 – Parâmetros modais experimentais na direção Y.

Atendendo a que durante o ensaio de vibração ambiental a excitação ambiental na direção Y foi menos pronunciada, a identificação modal foi menos eficiente e condicionou o número dos parâmetros modais identificados.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MODELO NUMÉRICO E DADOS EXPERIMENTAIS

A comparação dos resultados numéricos (modelo inicial) e os resultados experimentais foi realizada em termos de valores das frequências naturais, e da forma das configurações modais, através do parâmetro MAC (Pastor & Binda, 2012). O parâmetro MAC é um estatístico do grau de correlação entre modos de vibração com base apenas nas formas modais. Este parâmetro é muitas vezes utilizado para emparelhar os modos derivados de modelos analíticos com os obtidos experimentalmente. É de fácil aplicação e não requer uma estimativa das matrizes do sistema. Os valores do parâmetro MAC estão limitados entre 0 e 1, sendo que o valor de 1 é referente a formas de modos totalmente consistentes, enquanto um valor próximo de 0 indica que os modos não são consistentes.

A comparação dos parâmetros modais obtidos no ensaio e através do modelo numérico são representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Comparação entre os parâmetros modais do modelo numérico e os experimentais.

| Modos de vibração | Frequências numéricas (Hz) | Frequências experimentais (Hz) |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 0,492 | 0,478 |
| 2 | 0,897 | 0,709 |
| 3 | 2,457 | 2,364 |
| 4 | 5,807 | 5,979 |

Apesar da boa correlação entre os modos de vibração do modelo numérico e do ensaio, é perceptível uma pequena diferença entre as frequências de vibração dos respectivos modos, justificando a necessidade de uma calibração do modelo.

A calibração do modelo numérico foi realizada com base em técnicas automáticas assentes em algoritmos genéticos, com o objetivo de aproximar os resultados modais do modelo numérico aos do ensaio experimental. Deste modo foi obtido o modelo numérico calibrado que representa da maneira mais fiel o comportamento da torre (Leite, 2016).

Na Figura 3.7 é realizada uma comparação entre as deformadas dos primeiros 4 modos de vibração do modelo numérico calibrado com as obtidas no ensaio experimental.

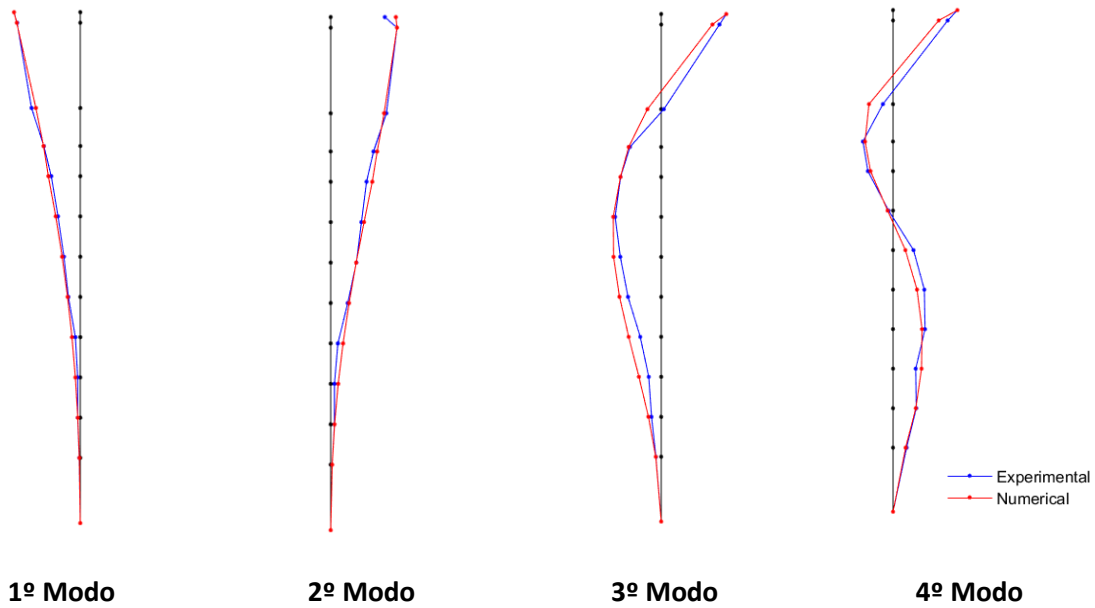


Figura 3.7 – Comparação entre as configurações modais (após a calibração) e experimental na direção X.

Tabela 3.3 - Comparação entre os parâmetros modais (após a calibração) e experimental na direção X.

| Modos de vibração | Frequências numéricas calibradas (Hz) | Frequências experimentais (Hz) |
|--------------------------|--|---------------------------------------|
| Modo 1 | 0,478 | 0,478 |
| Modo 2 | 0,720 | 0,709 |
| Modo 3 | 2,347 | 2,364 |
| Modo 4 | 5,827 | 5,979 |

3.5 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA

De forma a caracterizar de forma mais aprofundada o comportamento dinâmico da estrutura sob ação do vento foi concebido e instalado um sistema permanente de monitorização.

O sistema envolveu a instalação de dois anemómetros, com o objetivo de medir a direção e velocidade do vento. Os anemómetros utilizados são rotacionais de copo, da marca Vaisala, modelo WM302, e são particularmente adequados à medição do vento na direção horizontal. Os anemómetros foram instalados à cota 320 m e localizados na direção noroeste e sudoeste, pois foi verificado que essas duas direções possuem uma maior incidência de ventos, conforme ilustrado na Figura 3.8.

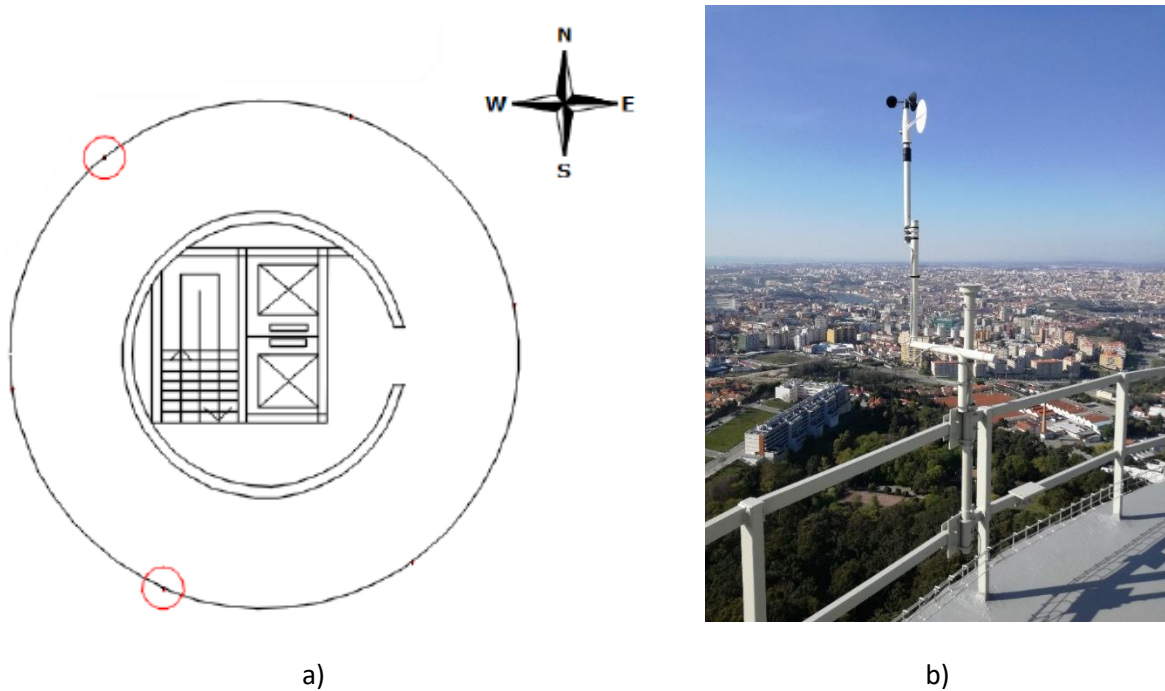


Figura 3.8 – Anemómetros na torre: a) Disposição; b) anemómetro localizado a noroeste.

Outra grandeza a avaliar são as acelerações da torre, tendo-se para o efeito realizado a instalação de 4 acelerómetros, dois localizados à cota 312,65 m (acelerómetros A1 e A2) e outros dois localizados à cota 255,04 m (acelerómetros A3 e A4), próximos de meia altura do fuste de betão. Os acelerómetros são da marca PCB, modelo 393B12. Em cada par de acelerómetros, um foi posicionado segundo a direção X e o outro segundo a direção Y. Foi considerado o eixo X como sendo a direção Norte-Sul e o eixo Y sendo a direção Oeste-leste. Não foi possível realizar a instalação dos acelerómetros no palito metálico devido à dificuldade de acesso ao local.

Para disposição ótima dos acelerómetros, foi realizado um estudo de acordo com as configurações modais obtidas no modelo numérico, visando colocá-los em locais onde existe uma maior deformada modal para os principais modos de vibração da torre, e garantindo que não fossem posicionados em pontos com ordenadas nulas. (Figura 3.9)

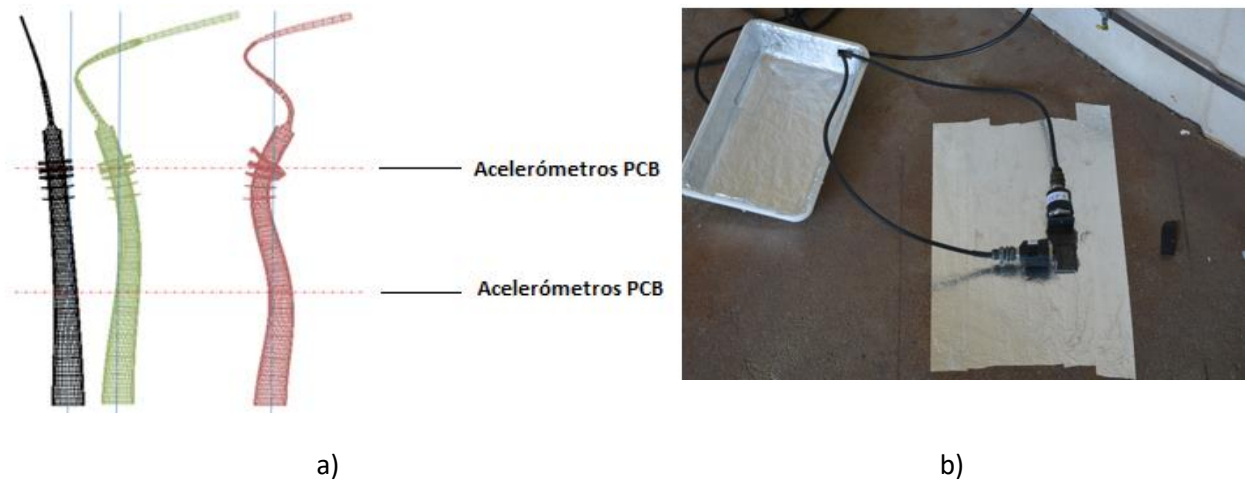


Figura 3.9 – Acelerómetros na torre: a) disposição; b) acelerómetros localizados à cota 312,65 m.

O armazenamento dos dados é realizado através de um PC posicionado à cota 312,65 m, sendo que os dados provenientes dos sensores são adquiridos por meio do sistema de aquisição de dados Compact DAQ, que realiza o condicionamento do sinal e transmite os sinais digitalizados para o computador. O processamento desses dados é feito através do *software Labview 2015*, fornecido pela *National Instruments*.

Pauli (2016) desenvolveu um *software* que faz a leitura do sinal digital e posteriormente realiza seu armazenamento em arquivos de texto. O *layout* do interface gráfico *Labview* desenvolvido por Pauli (2016), onde são fornecidas as informações referentes à velocidade e a direção do vento, e as acelerações, é apresentado na Figura 3.10.

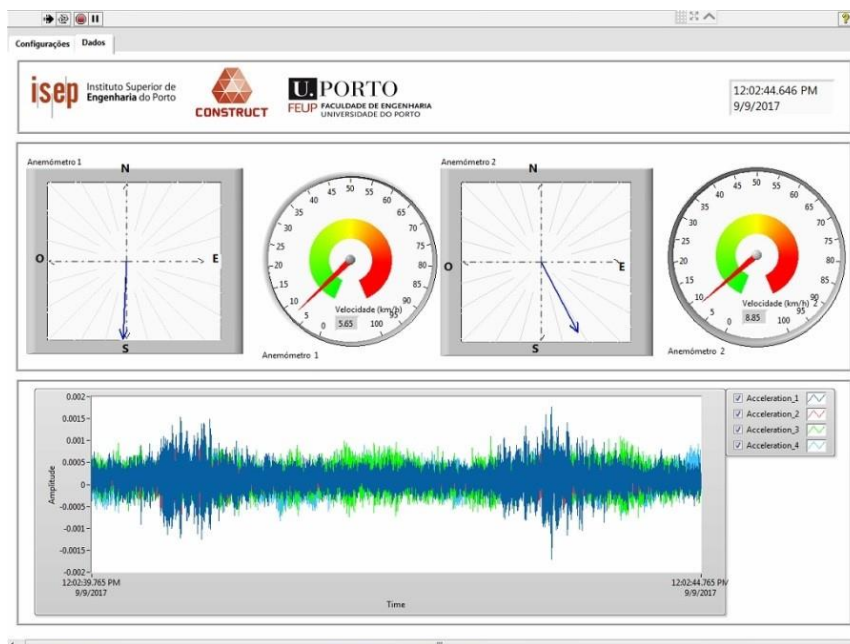


Figura 3.10 – *Layout* do interface gráfico de aquisição de dados em Labview.

CAPÍTULO 3

Com isso, iniciou-se o processo de coleta de dados na torre.

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PERMANENTE: ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS

O sistema de monitorização permanente instalado na torre do Monte da Virgem tem possibilitado a medição e armazenamento de dados importantes para caracterização do seu comportamento dinâmico face à ação do vento.

Neste capítulo será descrito um aprimoramento do sistema de monitorização que foi realizado no âmbito da presente dissertação, nesse caso com a instalação de uma estação meteorológica e além de serem analisados e interpretados detalhadamente os dados recolhidos pelos acelerómetros e pelos anemómetros.

4.1 APRIMORAMENTO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Com o objetivo de complementar os dados medidos na torre, o ISEP adquiriu uma estação meteorológica da marca PCE, modelo FWS – 20, conforme ilustrado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - - Estação meteorológica PCE – FWS – 20.

A estação em questão consegue realizar a recolha de diversos dados, como a velocidade e direção do vento, o índice pluviométrico, as temperaturas interior e ambiente, a pressão atmosférica e a humidade do ar, entre outros. Um dos fatores mais importantes é a medição da temperatura, pois sabe-se que o

efeito da variação da temperatura pode influenciar os valores das frequências naturais e os correspondentes modos de vibração, pelo que, futuramente, será possível correlacionar a temperatura ambiente e a temperatura da estrutura, com os parâmetros modais.

O equipamento foi adquirido e recepcionado em janeiro de 2017, e antes de realizar sua instalação na torre foi testado em laboratório, durante um período de 2 semanas, para melhor compreender o seu funcionamento, nomeadamente no que toca à definição da taxa de aquisição de dados, a capacidade da memória de armazenamento de dados, entre outros.

A estação transmite os dados medidos para uma tela portátil através de uma ligação WiFi, até uma distância máxima de 100 m. A estação possui 4 sensores que são instalados num mastro adequado para o efeito, cada um com uma funcionalidade diferente, conforme especificado na Figura 4.2.

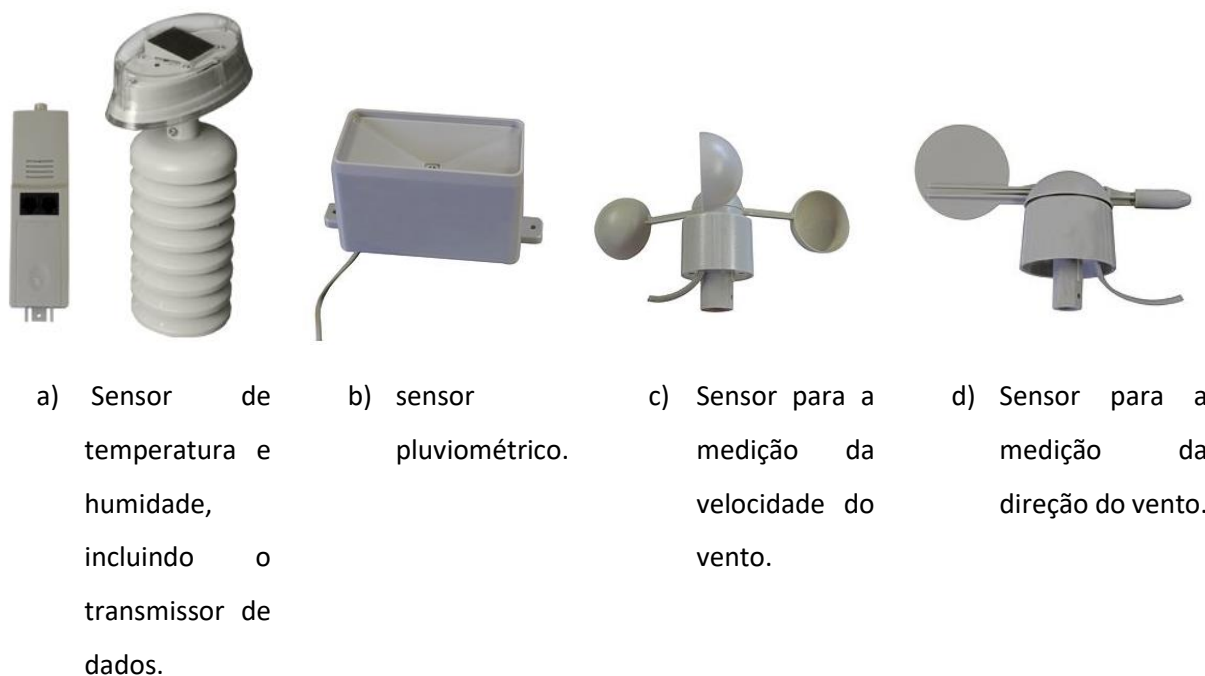


Figura 4.2 – Sensores que compõem a estação meteorológica.

Realizada a sua montagem basta ligar a tela portátil, Figura 4.3, que se inicia de imediato a recolha de dados. Esses dados podem ser visualizados através de um *software* próprio da estação, e que também realiza a gestão de aquisição de dados e sua posterior análise.

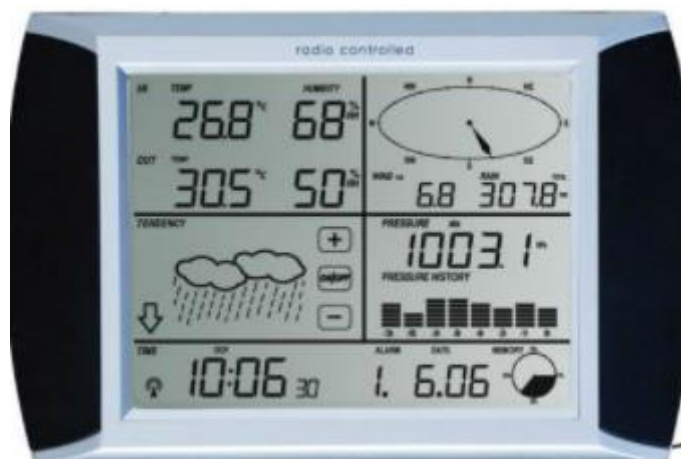


Figura 4.3 – Tela portátil da estação meteorológica.

Verificou-se que a tela portátil recebe o sinal dos diversos sensores a cada 48 s, porém o *software* armazena dados apenas a cada 5 min.

A estação foi instalada na torre onde foram realizados mais testes, uma vez que as paredes de betão do fuste poderiam impedir ou dificultar a transmissão da informação entre a estação e a tela portátil (Figura 4.4). A solução encontrada passou pela colocação da tela portátil no interior do fuste em betão, mas a uma distância muito próxima da estação. (cerca de 4-5 m), viabilizando assim a transmissão de dados mesmo com o obstáculo da parede do fuste. Por sua vez a transmissão de dados entre a tela portátil e o PC foi assegurada por intermédio de um cabo digital de rede, tipo RJ45, com adaptadores USB para a ligação ao PC e à tela.



Figura 4.4 – Estação meteorológica instalada na torre do Monte da Virgem.

4.2 PROCEDIMENTO DE RECOLHA DE DADOS

O programa *Labview* que realiza a aquisição dos dados dos diversos sensores, foi programado para guardar automaticamente as amostras a cada 1 h em arquivos em formato texto, ou seja, a cada 1 h é gerado um novo arquivo com dados experimentais.

A instalação do sistema de monitorização foi finalizada no dia 16 de julho de 2016, , porém, ocorreram alguns imprevistos técnicos no sistema que teve como consequência o desligamento do sistema, gerando arquivos incompletos e alguns casos com descontinuidades no tempo. Assim, no âmbito do presente trabalho, optou-se por coletar os arquivos com datas entre 17 de agosto de 2016 e 16 de setembro de 2016, ou seja, um período de aproximadamente 1 mês. Neste período, não ocorreram problemas técnicos e o sistema de monitorização adquiriu os dados de forma contínua.

A taxa de aquisição de dados dos acelerómetros, verificado nos próprios arquivos coletados, é de aproximadamente 100 Hz, ou seja, cada arquivo de acelerações contém mais de 360.000 dados para posterior análise. Isso por um lado é bom, pois quanto mais dados medidos, mais informação em frequência contém as respostas, porém, a gestão do armazenamento de dados torna-se um fator crítico. No período de tempo que foi estudado, foram manipulados 715 arquivos de 1 h cada, pesando cada um entre 25 e 30 Mb, e totalizando mais de 18 Gb.

Devido ao grande número de amostras em cada arquivo optou-se por analisar estes dados através do *software Matlab*, uma vez que é um *software* mais robusto, com maior capacidade de memória e uma velocidade de cálculo superior à de outros *softwares* correntes, tornando-se por isso mais viável a análise desta grande quantidade de dados.

4.3 PROCESSAMENTO PRÉVIO DOS DADOS MEDIDOS

Com base nos ficheiros de texto, foi necessário verificar como se organizava a informação dentro de cada arquivo, de modo a identificar a informação útil e a informação a descartar. As primeiras linhas de cada ficheiro de texto mostram informações gerais, incluindo as datas da gravação do ficheiro, o nome do ficheiro, a frequência de amostragem, as unidades das grandezas medidas, entre outros dados que não são de especial relevo para a fase posterior de análise de dados. (Figura 4.5)

```

Arquivo Editar Formatar Ejibir Ajuda
LabVIEW Measurement
Writer_Version 2
Reader_Version 2
Separator Tab
Decimal_Separator .
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator DEC
Date 2016/08 /17
Time 17:12:42.0696320533752441406
***End_of_Header***

Channels 6
Samples 50 50 50 50 50
Date 2016/09/16 2016/09/16 2016/09/16 2016/09/16 2016/09/16
Time 11:12:24.3938508033752441406 11:12:24.3938508033752441406 11:12:24.3938508033752441406 11:12:24.3938508033752441406 11:12:24.3938508033752441406
Y_Unit_Label g g g g g
X_Dimension Time Time Time Time Time
X0 2.5703823242187500E+6 2.5703823242187500E+6 2.5703823242187500E+6 2.5703823242187500E+6 2.5703823242187500E+6
Delta_X 0.009766 0.009766 0.009766 0.009766 0.009766
***End_of_Header***

X_Value Acceleration_1 (Last) Acceleration_2 (Last) Acceleration_3 (Last) Acceleration_4 (Last) Acceleration_5 (Last) Acceleration_6 (Last) Comment
2570382.324219 1.594009E-5 1.072998E-5 0.000252 0.000103 -0.001185 0.000943 9/16/2016 11:12:41 AM
2570382.333984 4.841434E-6 -3.064014E-6 0.000430 9.096865E-5 -0.000517 0.005288
2570382.343750 1.628692E-5 7.398322E-6 0.000135 9.689349E-5 -0.004472 0.004288
2570382.353516 1.315299E-6 -2.771770E-6 -9.021298E-5 8.809422E-5 0.002917 0.003304
2570382.363281 1.744303E-5 6.463141E-6 -0.000210 0.000109 0.000107 0.000467
2570382.373047 -2.268642E-6 -9.434933E-6 0.000056 8.756265E-5 -0.002768 0.004516
2570382.382812 9.234652E-6 8.158156E-6 0.000179 0.000109 -0.002446 -0.005077
2570382.392578 -1.140191E-5 -1.422773E-5 0.000632 9.513364E-5 0.004721 0.000858
2570382.402344 3.339735E-5 2.785540E-5 -9.931219E-5 0.000101 0.002247 0.001200
2570382.412109 -1.614196E-5 -7.213879E-6 9.204311E-6 9.114463E-5 0.002001 -0.000406
2570382.421875 3.553615E-5 -2.130914E-5 -2.537269E-5 0.000105 0.000762 0.003552
2570382.431641 -1.787613E-5 -2.556680E-5 0.000306 8.416388E-5 0.005766 0.000144
2570382.441406 3.264588E-5 2.569280E-5 0.000315 0.000101 0.006126 0.001493
    
```

Figura 4.5 – Arquivo que armazena os valores das acelerações.

As colunas que apresentam os valores do tempo e da aceleração perfazem no total sete colunas, sendo que a primeira representa o instante de tempo de coleta, e as seguintes representam, respetivamente, os dados provenientes dos acelerómetros 1 a 6. Sabe-se que os acelerómetros 5 e 6 não foram instalados devido às dificuldades no acesso ao palito metálico, com isso, os dados dessas colunas são referentes apenas a ruído digital e serão posteriormente eliminados da análise.

Esses arquivos foram depois exportados para o Matlab, tendo sido testado o desempenho deste *software* na representação gráfica das acelerações atendendo ao elevado número de pontos a serem representados. Foi demonstrado que as potencialidades do Matlab foram as adequadas, fazendo com que a criação desses gráficos seja rápida.

Os acelerómetros instalados na torre são muito sensíveis pelo que registavam não só as acelerações da torre devidas à ação do vento, mas também as acelerações devidas a outras fontes não desejáveis, como por exemplo, os movimentos de pessoas que trabalham na torre, sons e vibrações causadas pelos movimentos do elevador, entre outros. Estas perturbações foram praticamente todas eliminadas com a utilização de um filtro passa-baixa, com uma frequência de corte ajustada, uma vez que as perturbações identificadas eram mais evidentes em frequências elevadas, que estão naturalmente desacopladas das frequências da torre e da ação do vento, tipicamente localizadas em frequências baixas.

4.3.1 Filtragem dos sinais

Os filtros têm como objetivo eliminar componentes de um sinal em função do seu conteúdo em frequência. Existem diferentes tipos de filtros para se utilizar na análise de sinais, como por exemplo o filtro de *Butterworth*, *Chebyshev*, *Bessel-Thomson*, entre outros. A maior diferença entre estes filtros está relacionada com o tipo e grau dos coeficientes dos polinómios que definem as suas funções de

transferência (AUGUSTO, 2011). Para a definição completa de um filtro torna-se também necessário definir a sua frequência de corte (f_c) e o tipo de filtro, geralmente passa-baixo, passa-alto e passa banda. Os coeficientes de cada filtro que determinam as suas propriedades e características, na tentativa de se obter um “filtro ideal”, ou seja, um filtro onde a banda de transição é na vertical (Figura 4.6). Porém, matematicamente, é impossível obter-se um filtro com essas características, existindo sempre uma transição não vertical entre as duas zonas do espectro, nomeadamente a zona das frequências a manter (ganho igual a zero) e a zona das frequências a remover (ganho diferente de zero e de valor negativo). quanto mais estreita for a banda de transição maior será a eficiência do filtro em frequências próximas da frequência de corte.

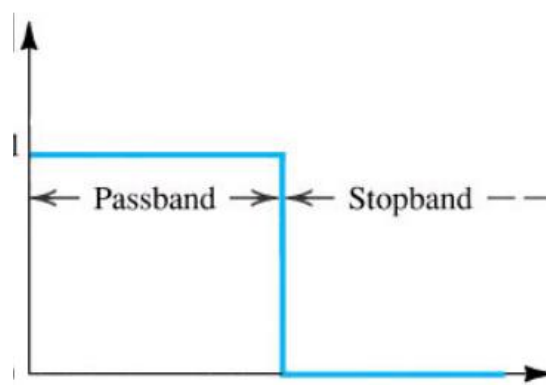


Figura 4.6 – Filtro passa-baixo ideal.

Para este trabalho será utilizado um filtro *Chebyshev* tipo 2. Ele não possui *rippling* (ondulação registrada no gráfico) em sua banda passante, porém possui *rippling* na sua banda atenuada.

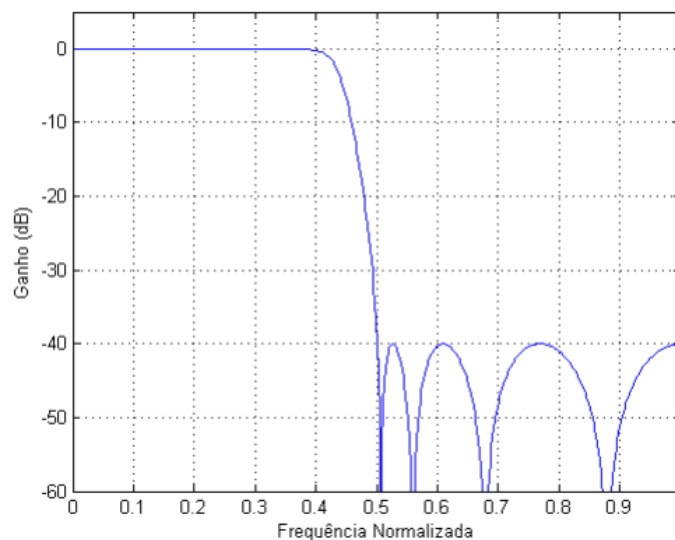


Figura 4.7 – Função de transferência de um filtro *Chebyshev* tipo 2 de 8ª ordem.

O filtro utilizado é um filtro passa-baixo, ou seja, existe a banda passante, que deixa que os conteúdos com frequências inferiores à frequência de corte passem sem alteração, existe uma faixa de transição, na

vizinhança do valor da frequência de corte, e a banda de atenuação ou rejeição, contributos em frequência são praticamente eliminados (com exceção do efeito de *rippling*).

O Matlab já possui funções para esses tipos de filtros, e com isso, se torna mais fácil a sua utilização. Para este trabalho optou-se por usar uma frequência de corte igual a 15 Hz, uma ordem do filtro igual a 10 e uma atenuação de banda igual a 40 dB. O período de amostragem é aproximadamente igual a 0,0098 s, o que corresponde a uma frequência de amostragem (F_s) de 102 Hz. O filtro utilizado encontra-se representado na Figura 4.8. No Anexo I apresenta-se o algoritmo desenvolvido e aplicado na filtragem dos sinais de acelerações.

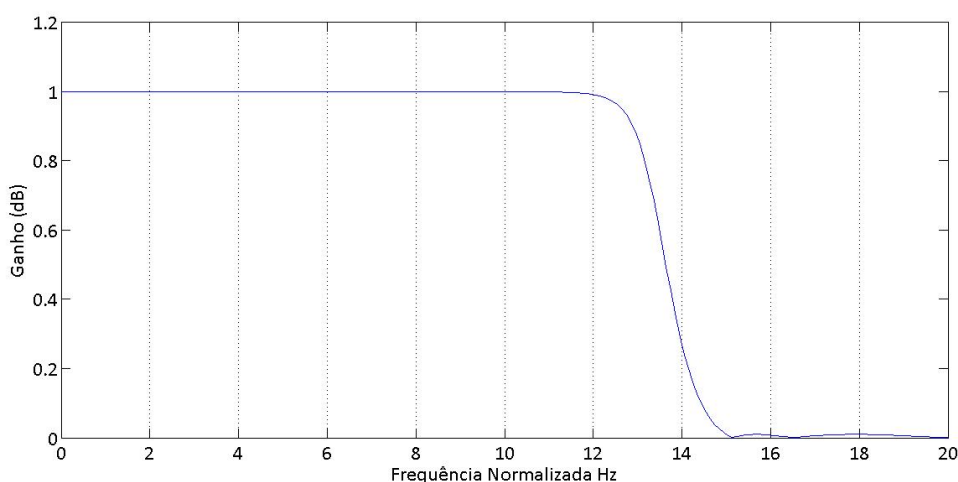


Figura 4.8 – Filtro *Chebyshev* tipo 2 com $f_c = 15$ Hz.

A aplicação do filtro apresentado faz com que as componentes dos registros de acelerações com uma frequência inferior a aproximadamente 13 Hz sejam eliminadas.

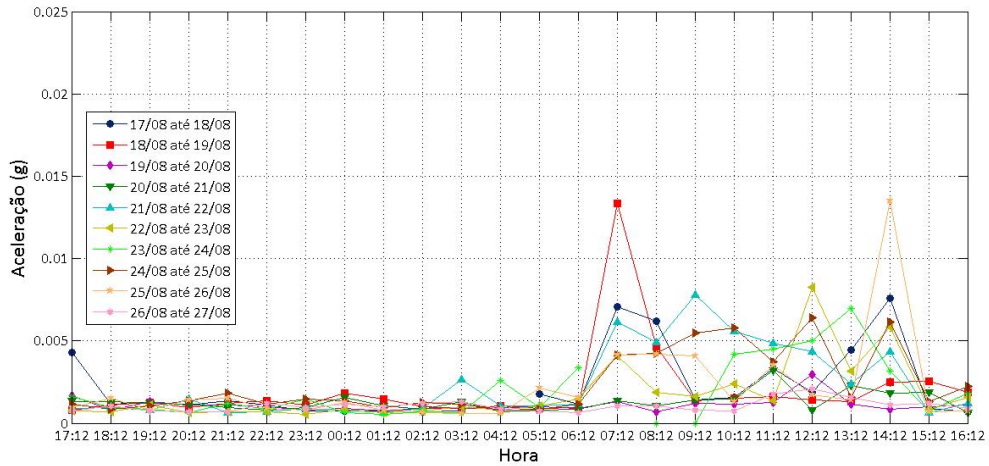
4.4 ANÁLISE DE DADOS: ENVOLVENTE DAS ACELERAÇÕES MÁXIMAS

Com o objetivo de identificar os eventos para os quais são registrados os valores das acelerações máximas da estrutura, foram realizados gráficos dos valores extremos das acelerações máximas (valores em módulo), e de hora em hora, e já após a aplicação do filtro digital.

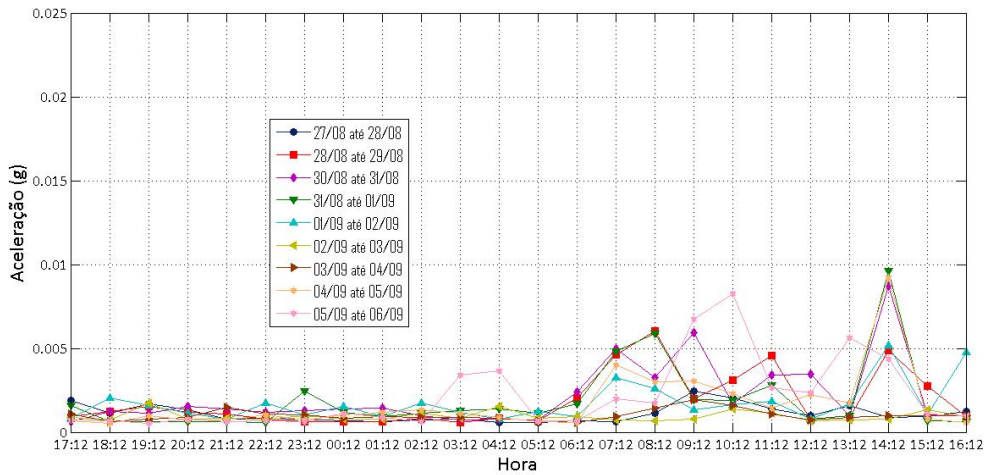
Para efeito foi elaborado um algoritmo (ver Anexo I), que após a aplicação do filtro ao sinal da aceleração, verifica o seu maior valor em módulo. Neste algoritmo, é possível constatar, que após a filtragem do sinal é realizada uma operação que compara o valor máximo da aceleração com o seu valor mínimo e adota o maior dos dois como o valor de referência desse período de 1h. Esse estudo foi feito para as direções X e Y, apenas para os acelerómetros localizados à cota 312,65 m, já que os principais modos de vibração participam todos nestes ponto mais alto da estrutura. Esta operação foi repetida 1430 vezes, pois no estudo foram utilizados 715 arquivos em cada direção (x e y).

4.4.1 Envoltentes de acelerações sem correção de eventos esporádicos

Na Figura 4.9 a) a c) apresentam-se os valores extremos das acelerações na direção X, obtidos com base nos valores extremos horários e para um período de aproximadamente 1 mês (de 17 de agosto a 16 de setembro de 2016). Para uma melhor visualização a informação foi dividida em três sub gráficos, onde cada um possui dados de 10 dias consecutivos, facilitando assim a interpretação dos resultados.



a)



b)

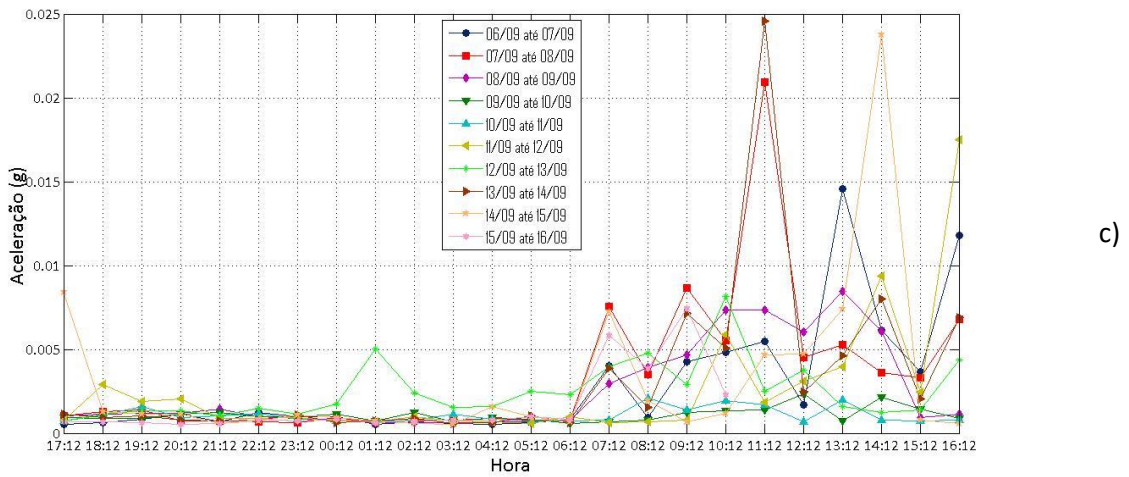
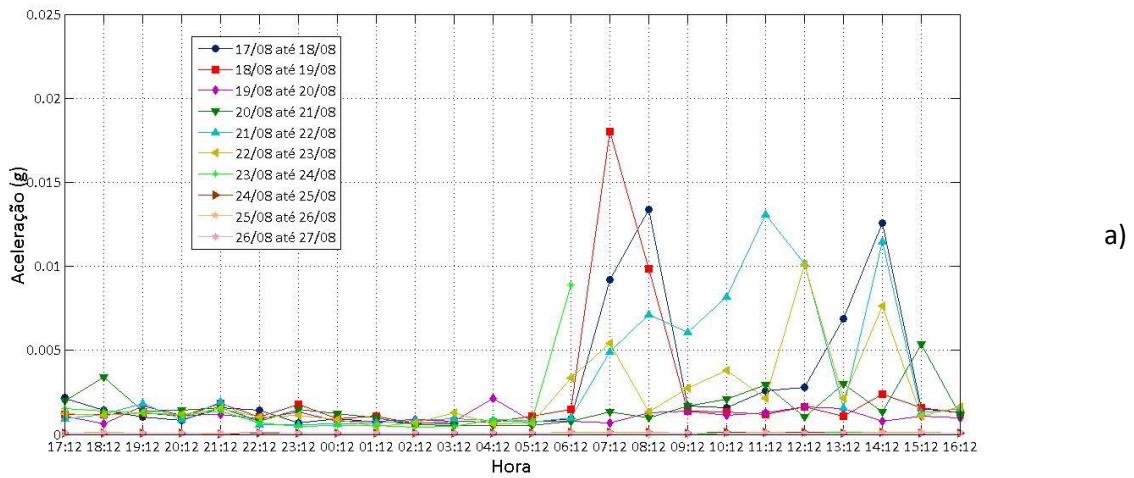
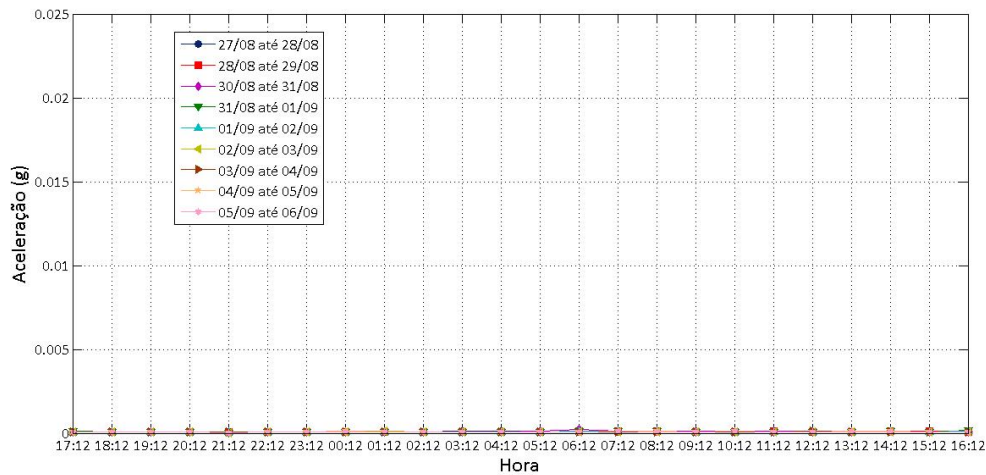


Figura 4.9 – Envolvente das acelerações na direção X à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016.

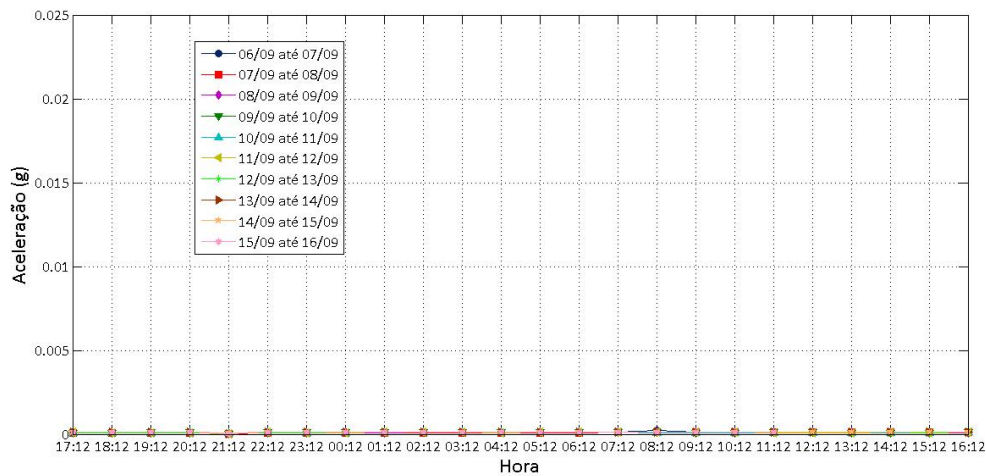
Idêntico procedimento foi também realizado para a direção Y (Figura 4.10 a) a c)).



a)



b)



c)

Figura 4.10 - Envoltório das acelerações na direção Y à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016.

Todos os gráficos têm os mesmos limites (inferior e superior) na escala das ordenadas (acelerações). Ao analisá-los é facilmente percebido que as acelerações na direção X possuem valores extremos mais altos que as acelerações registradas na direção Y. Além disso foram identificado um número muito significativo de picos isolados, associados a eventos esporádicos, com valores em torno de 0,010 g a 0,025 g, este último um valor muito significativo atendendo a que se trata da direção horizontal.

4.4.2 Correção de eventos esporádicos (não relacionados com a ação do vento)

Nesta secção é realizada uma análise mais criteriosa dos eventos esporádicos, com o objetivo de verificar se correspondem a eventos relacionados com os efeitos da ação do vento, ou eventualmente a outros eventos relacionados com a operacionalidade da estrutura e geralmente relacionados com os efeitos dos

movimentos do elevador, dos trabalhos de manutenção realizadas por operários, do funcionamento de equipamentos, entre outros.

Em particular, para a verificação dos picos foi analisado ao detalhe, a título exemplificativo, o registro temporal do dia 14/09/2016, entre as 11:12 e as 12:12, conforme ilustrado na Figura 4.11.

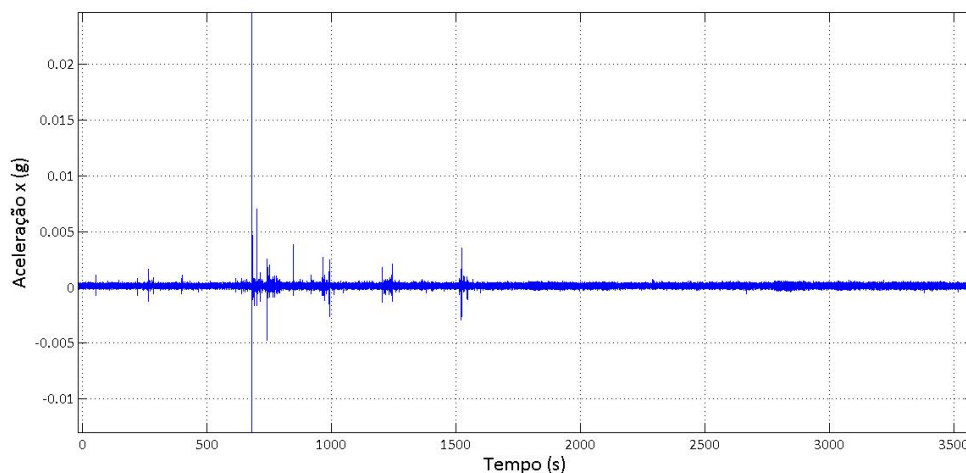


Figura 4.11 – Registro de acelerações na direção X à cota 312,65 m no dia 14/09/2016 entre 11:12 e 12:12.

Analisando o gráfico percebe-se que o valor máximo da aceleração é condicionado por um único pico, que apresenta um valor significativamente mais alto em comparação aos restantes valores. A Figura 4.12 mostra uma ampliação desse pico, entre os instantes 675s e 685s, ou seja, um intervalo de 10 segundos.

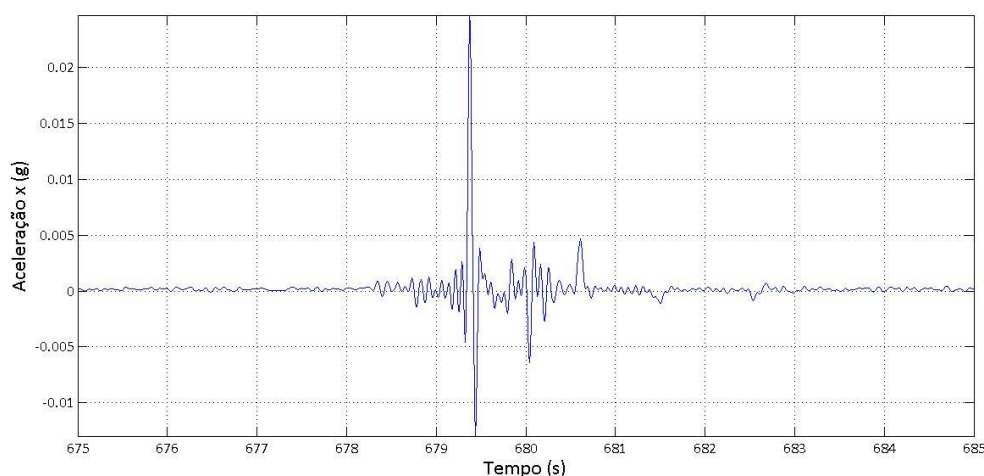


Figura 4.12 – Detalhe do pico de acelerações registrado.

O pico registrado parece não traduzir o movimento da estrutura face à ação do vento, uma vez que fisicamente ela não conseguiria em centésimos de segundo realizar um movimento desta magnitude, ou seja, o valor de pico é provavelmente devido à ocorrência de um evento esporádico. Curiosamente a perturbação do sinal na zona do pico possui componentes em baixa frequência, pois mesmo após o uso

do filtro com uma frequência de corte de 15 Hz o seu valor não foi filtrado. Esta particularidade foi identificada em outros dos picos registrados nos gráficos da Figura 4.9, o que leva a um erro na interpretação das acelerações máximas da estrutura.

Diante dessa situação seria necessário aplicar uma técnica mais avançada de processamento de sinal para eliminar estas perturbações, porém, no presente trabalho, devido à falta de tempo para um estudo mais aprofundado, optou-se por realizar um ajuste manual nos gráficos.

O ajuste manual consiste na eliminação de valores que não representam o real movimento da estrutura sob ação do vento. O procedimento de eliminação de valores depende de gráfico para gráfico com o cuidado de não serem eliminados os valores recorrentes da estrutura, tendo sido elaborado um algoritmo em Matlab que se encontra apresentado no Anexo I.

Para cada gráfico de acelerações é definido pelo utilizador um valor de ajuste e criada uma função que detecta automaticamente os valores que estão acima deste valor e os transforma em zero, ou seja, é criado um limite para o gráfico conforme ilustrado na Figura 4.13.

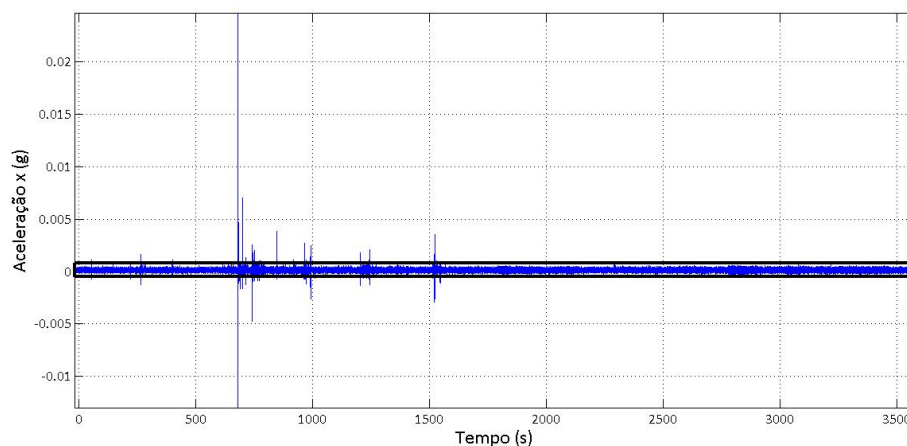


Figura 4.13 – Janela de ajuste aplicada ao registro de acelerações.

Com base na janela de ajuste é possível eliminar os picos indesejáveis, tendo então um gráfico mais representativo do comportamento real da estrutura sob à ação do vento. Para o caso ilustrado na Figura 4.11, foi utilizado um fator de ajuste de 0,5 mg, tendo-se obtido o gráfico apresentado na Figura 4.14.

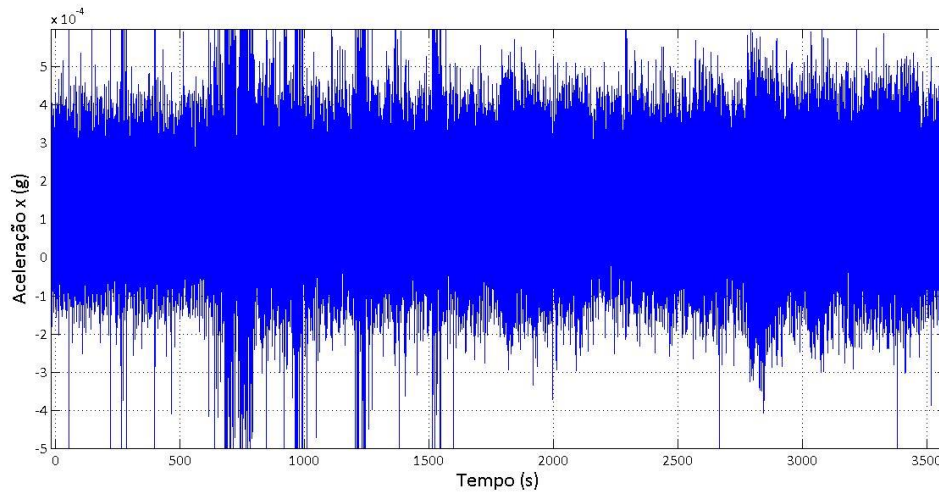
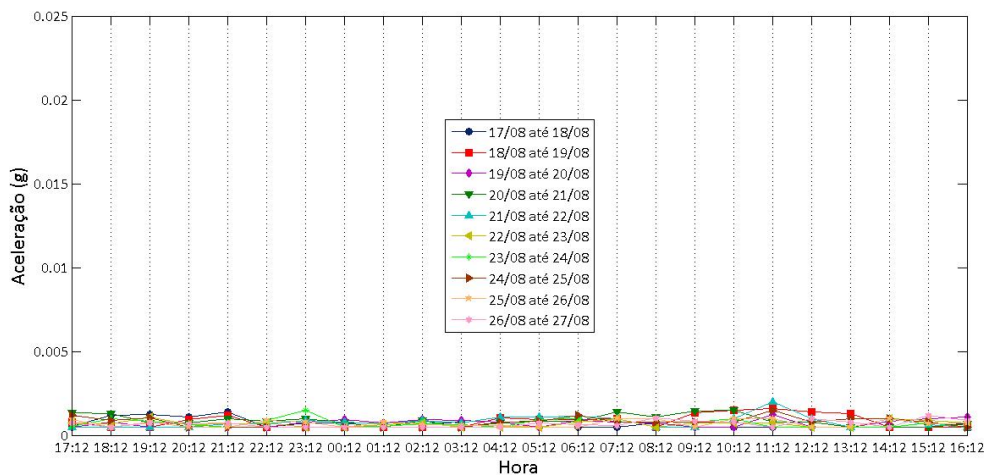


Figura 4.14 – Registro das acelerações com o fator de ajuste.

No novo gráfico é possível verificar que a aceleração possui um efeito mais recorrente, ou seja, um efeito mais dentro do que seria expectável para o movimento da estrutura, sem picos anómalos. Com base na ferramenta de ajuste desenvolvida, a mesma foi aplicada a cada gráfico para verificar a necessidade ou não de ser efetuada a correspondente correção.

4.4.3 Envolventes de acelerações com correção de eventos esporádicos

Por aplicação da ferramenta de ajuste a cada gráfico individual, surgiu a necessidade de refazer o gráfico da envolvente das acelerações, uma vez que os anteriores, apresentados na secção 4.4.1, apresentavam valores que não correspondiam ao efeito da ação do vento, mas sim a outras perturbações sobre a estrutura que não são de interesse. Na Figura 4.15 são apresentados os gráficos das novas envolventes de acelerações medidas na direção X à cota 312,65 m. Apenas são apresentados os resultados na direção X uma vez que foi nesta direção que se atingiram os valores mais elevados da aceleração.



a)

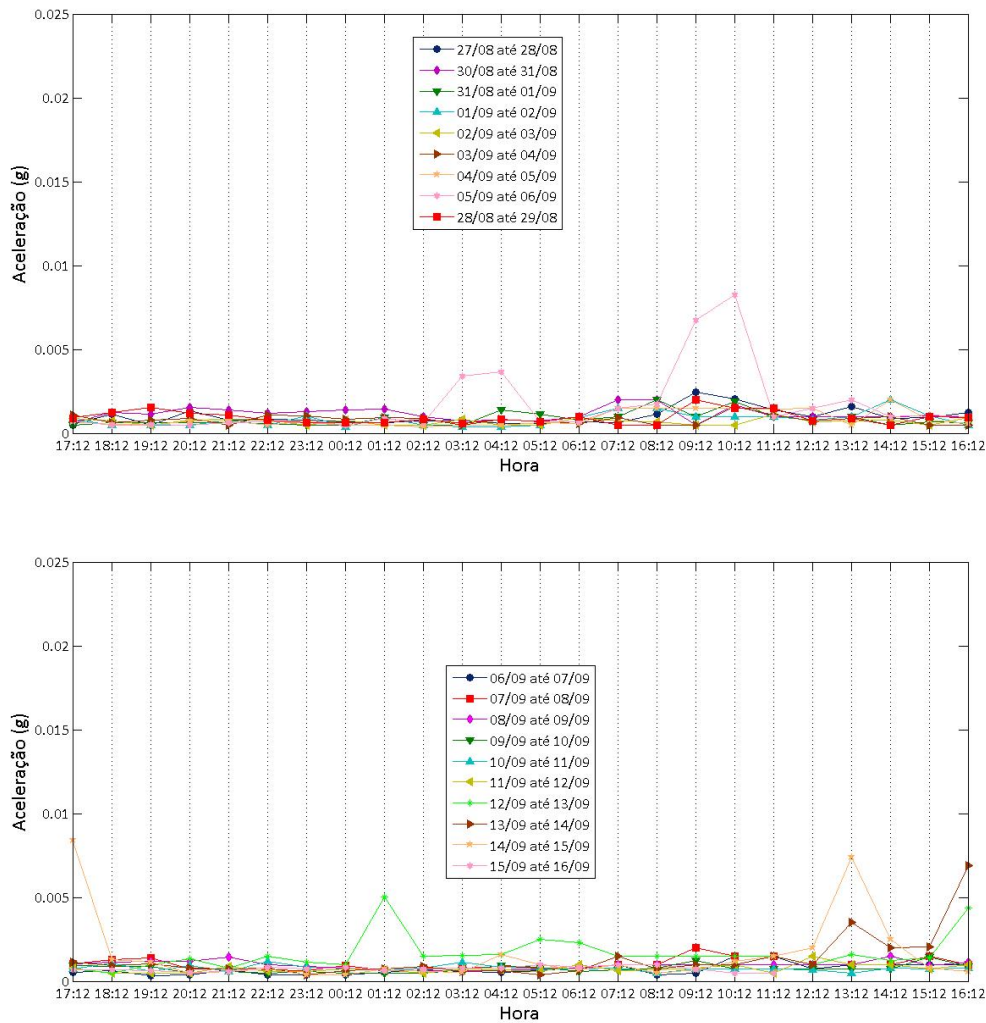


Figura 4.15 - – Envolvente das acelerações com fator de ajuste na direção X à cota 312,65 m: a) entre os dias 17 e 27 de agosto de 2016; b) entre os dias 27 de agosto a 06 de setembro de 2016; c) entre os dias 6 e 16 de setembro de 2016.

Analisando os gráficos é fácil perceber que os valores extremos das acelerações com a correção de eventos esporádicos são inferiores aos obtidos sem a correspondente correção, demonstrando a importância do procedimento proposto antes da interpretação dos resultados.

É possível realizar uma análise minuciosa em alguns pontos para tentar associar esses gráficos aos modos de vibração da estrutura e ao regime de ventos.

4.5 ANÁLISE DE DADOS: EVENTOS CRÍTICOS E NÃO CRÍTICOS

Nesta secção são analisados dois eventos correspondentes aos picos da envolvente de acelerações corrigida, denominados de eventos críticos, e dois eventos associados a zonas da envolvente fora dos picos, denominados de eventos não críticos. Para ambas as situações será interpretada a resposta no

domínio da frequência de modo a correlacionar os resultados com os parâmetros modais da estrutura (ver secção 3.1).

4.5.1 Eventos críticos

Na Figura 4.16 apresenta-se o registro de acelerações referente ao pico identificado no dia 06/09/2016 entre as 3:12 e as 4:12.

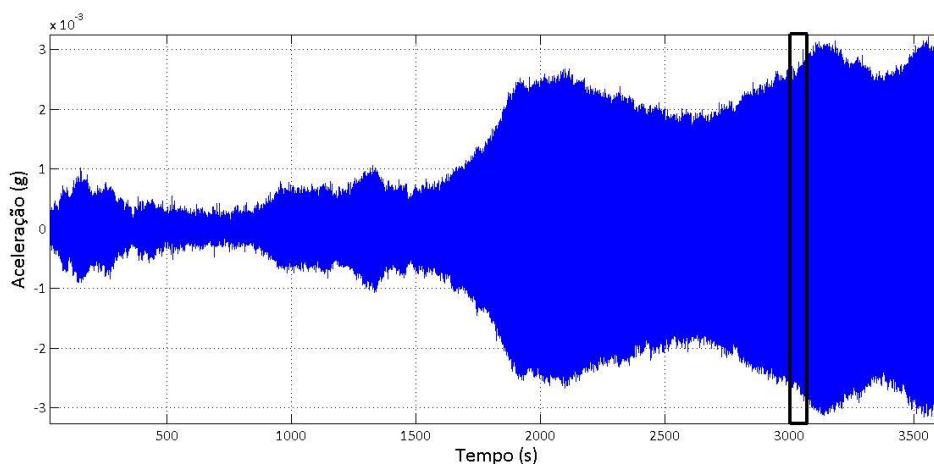


Figura 4.16 – Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12.

O gráfico mostra valores elevados das acelerações e é bem representativo dos fenómenos de amplificação da resposta dinâmica que ocorrem com alguma regularidade na torre. Em particular é possível visualizar que a partir dos 1500 s de registro ocorreu um incremento muito significativo da resposta dinâmica que passou de aproximadamente uma amplitude de 2 mg para valores na ordem de 6 mg. Analisando a zona específica do sinal assinalada na Figura 4.16, que tem a duração de apenas 30 s, obteve-se o sinal representado na Figura 4.17.

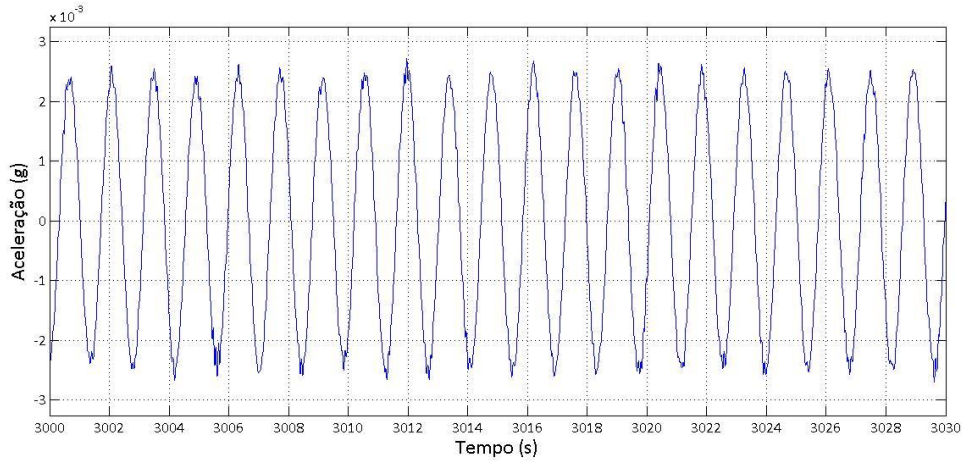


Figura 4.17 – Pormenor do registo e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 06/09/2016 entre os instantes 3000 s e 3030 s.

O sinal demonstra claramente o movimento sinusoidal da estrutura com uma amplitude bastante significativa.

Diante deste resultado é preciso verificar qual o modo de vibração da torre que está a condicionar a sua resposta dinâmica. Para o efeito recorreu-se à função densidade espectral de potência do registo de acelerações, também denominada de auto-espectro, e baseada na passagem dos dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. Trata-se de uma função muito utilizada no campo da engenharia e é aplicável a sinais do tipo não periódicos e aleatórios no tempo. O Matlab disponibiliza esta função tendo sido elaborado um algoritmo para sua aplicação aos registos de acelerações medidos e que se encontra apresentando no Anexo I.

Na Figura 4.18 apresenta-se o auto-espectro do registo de acelerações representado na Figura 4.16.

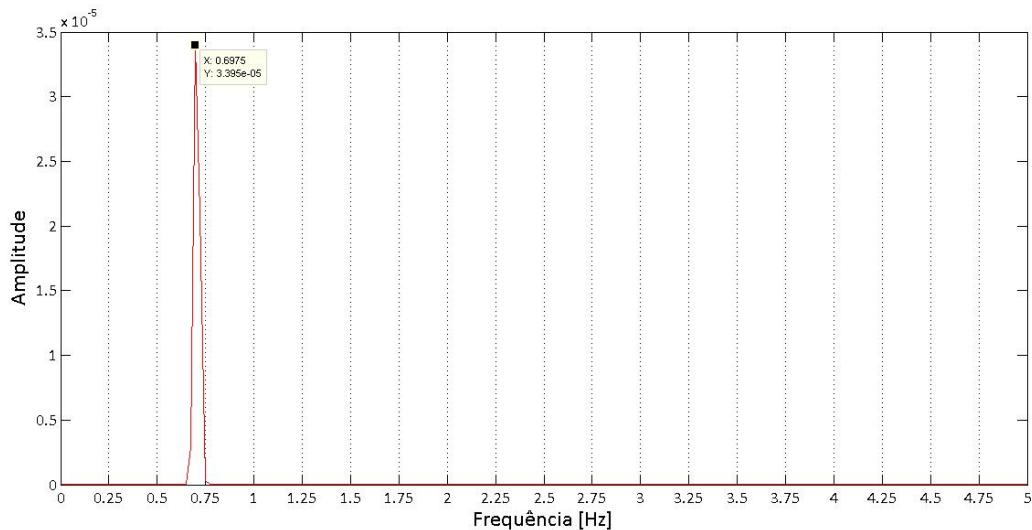


Figura 4.18 – Resposta no domínio da frequência do registo de acelerações referente ao evento crítico.

É possível perceber que a resposta é controlada pelo contributo de apenas um modo de vibração com uma frequência igual a 0,698 Hz, que de acordo com os resultados do ensaio de vibração ambiental corresponde à frequência do 2º modo de vibração da estrutura, envolve a vibração do palito metálico. Este aspecto é particularmente curioso uma vez que demonstra que as vibrações excessivas da torre estão relacionadas com as vibrações excessivas do palito metálico.

Um outro evento crítico foi registrado curiosamente no mesmo dia 06/09/2016 mas agora entre as 10:12 e as 11:12. Na Figura 4.19 apresenta-se o correspondente registro de acelerações cujo valor máximo é aproximadamente igual a 8 mg (amplitude de 16 mg) o que são valores bastantes superiores aos registrados no evento anteriormente reportado (ver Figura 4.16).

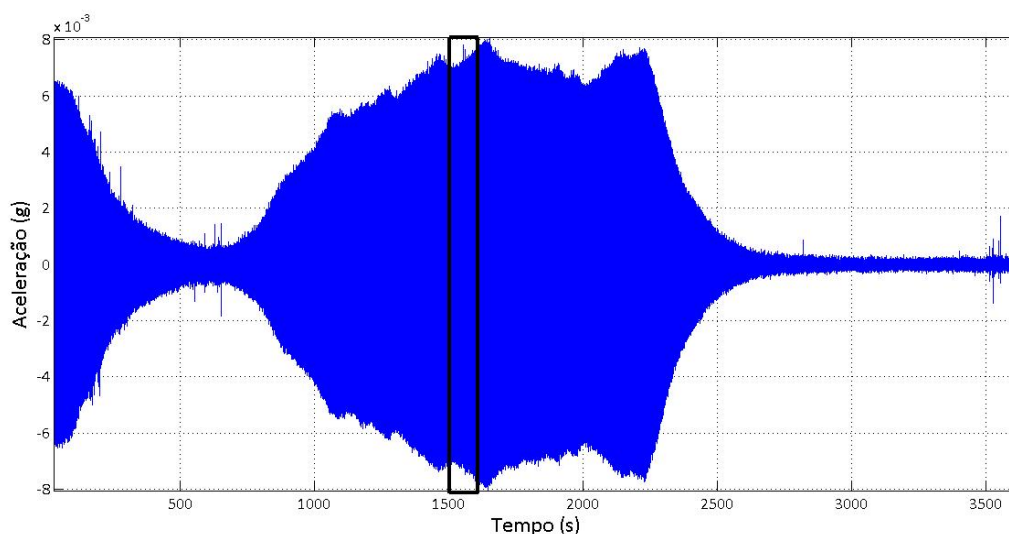


Figura 4.19 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 06/09/2016 entre as 10:12 e as 11:12.

Analogamente ao gráfico visto anteriormente, é possível perceber entre, aproximadamente, o instante 1000 s e 2500 s uma amplificação da resposta dinâmica muito pronunciada e bem definida. Curiosamente próximo do instante de tempo 2250 s ocorreu uma transição brusca da resposta, neste caso uma redução significativa, possivelmente associada a uma variação brusca do regime de ventos no local da torre

Na Figura 4.20 apresenta-se o detalhe da zona assinalada com um retângulo na Figura 4.19.

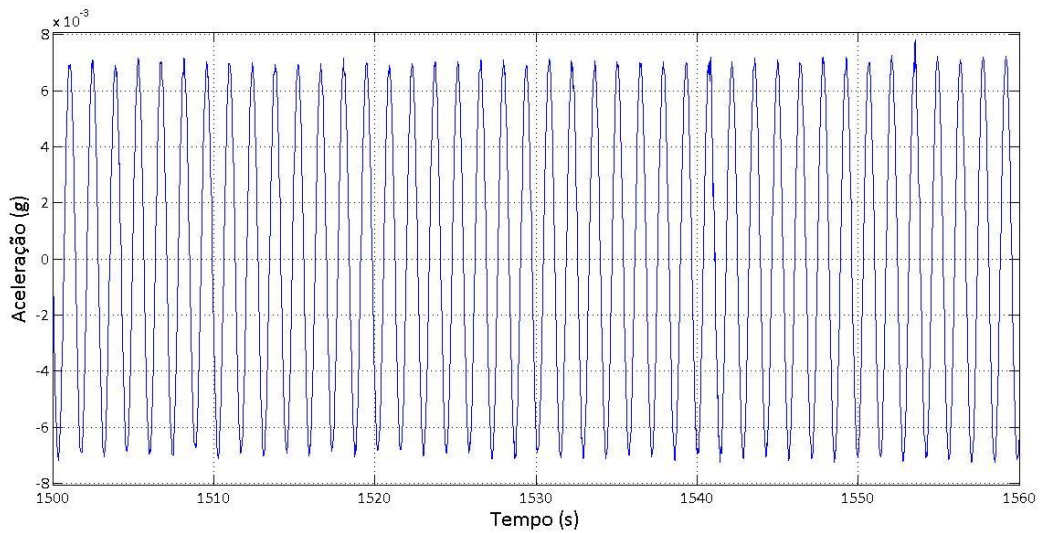


Figura 4.20 - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 06/09/2016 entre os instantes 1500 s e 1560 s.

No intervalo de tempo analisado é possível verificar que o sinal é uma vez mais uma senoide praticamente perfeita.

Na Figura 4.21 apresenta-se o auto-espectro do registro de acelerações representado na Figura 4.19.

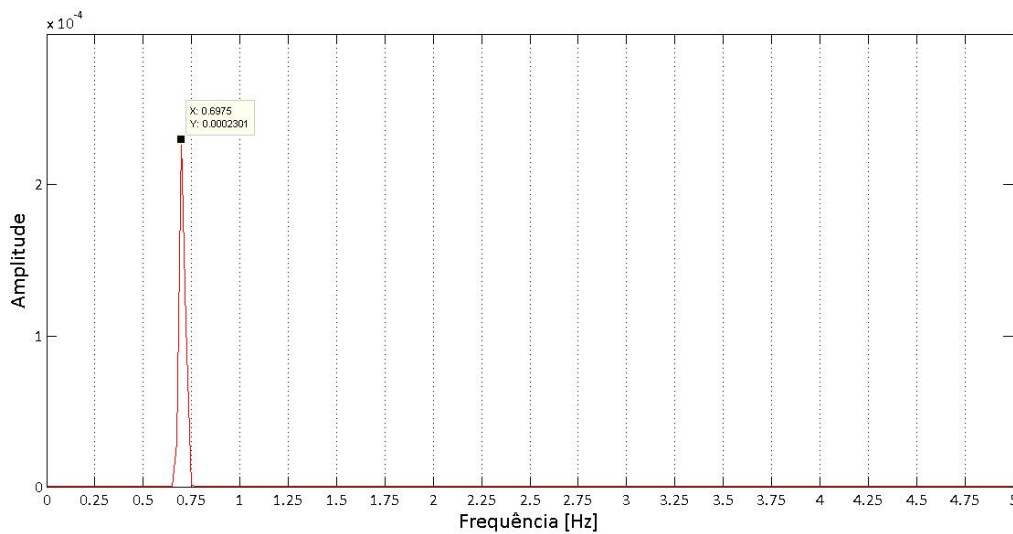


Figura 4.21 - Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento crítico.

Novamente, verifica-se apenas o contributo de uma única frequência para a resposta dinâmica, apresentando o mesmo valor e igual a 0,698 Hz, o que é a frequência do 2º modo de vibração da torre referente a movimentos do palito metálico.

O que sucedeu nos dois eventos críticos apresentados foi repetido para um conjunto mais alargado de picos. No período de tempo em análise (4 semanas) foram identificados um total de 6 eventos críticos

conforme detalhado na Tabela 4.1. O detalhe de cada um destes eventos críticos é apresentado no Anexo II.

Tabela 4.1 – Identificação dos eventos críticos no período em análise.

| Dia | Hora | Frequência dominante (Hz) |
|------|---------------|---------------------------|
| 6/9 | 03:12 - 04:12 | 0,698 |
| 6/9 | 10:12 - 11:12 | |
| 13/9 | 16:12 - 17:12 | |
| 14/9 | 13:12 - 14:12 | |
| 14/9 | 17:12 - 18:12 | |
| 15/9 | 13:12 - 14:12 | |

4.5.2 Eventos não críticos

Foram também analisados alguns eventos mais recorrentes, denominados de eventos não críticos, pois apesar de não apresentarem valores elevados de acelerações existe o interesse de interpretar a sua resposta no domínio da frequência, além de os correlacionar com a velocidade e a direção do vento. A Figura 4.22 ilustra o registro das acelerações na direção X no dia 22/08/2016, no período entre as 02:12 e as 03:12.

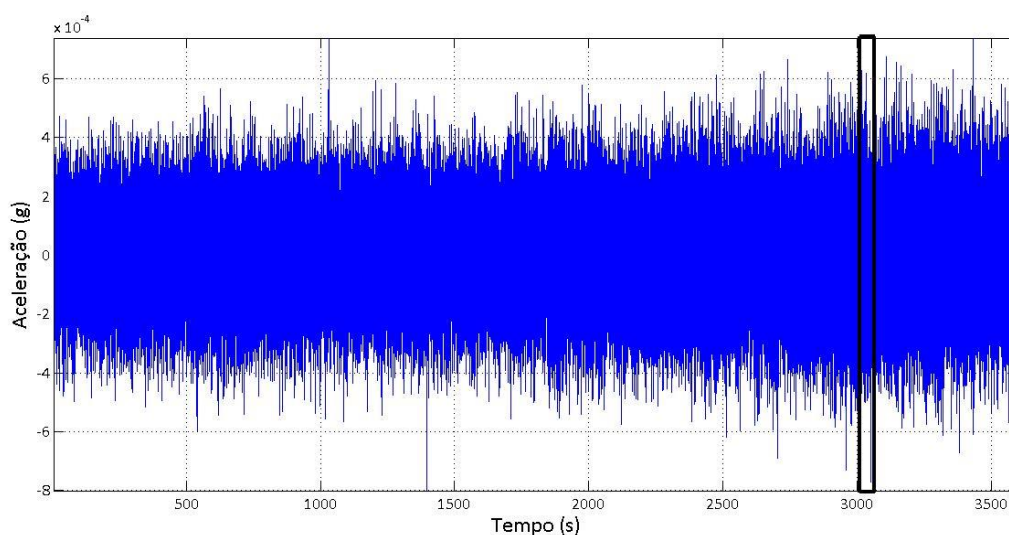


Figura 4.22 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 22/08/2016 entre as 02:12 e as 03:12.

É perceptível que o gráfico possui menores valores de acelerações, com uma amplitude próxima a 0,84 mg, um valor cerca de 10 vezes menor que os registrados nos eventos críticos. Analogamente, foi também realizado um detalhe do registro entre os instantes 3000s e 3030s, para perceber o que ocorre na estrutura, conforme a Figura 4.23.

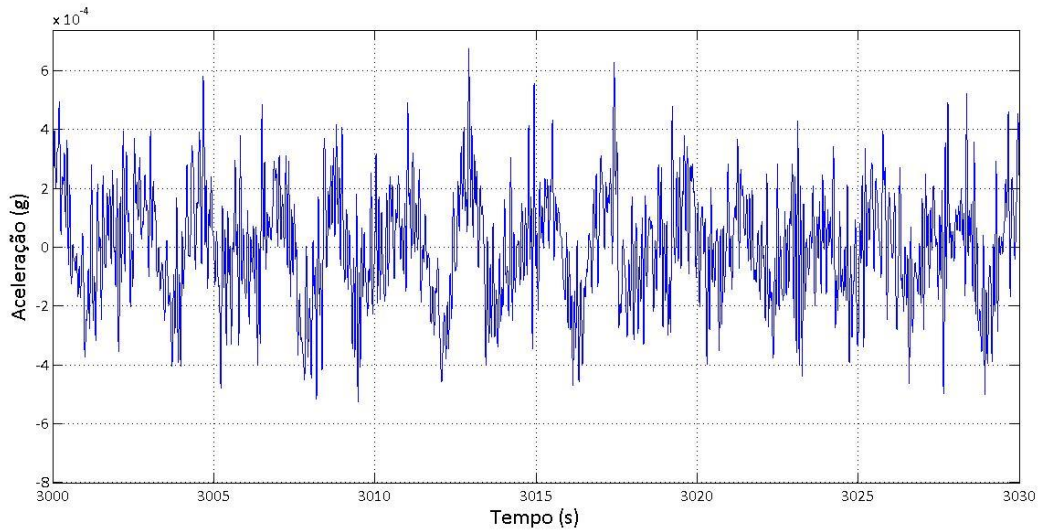


Figura 4.23 - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 22/08/2016 entre os instantes 3000 e 3030 segundos.

Novamente, fica claro que o registro apresenta valores de acelerações bem menores além do efeito sinusoidal surgir menos notório em virtude da participação de mais do que um modo de vibração na resposta em acelerações. Na Figura 4.24 apresenta-se o auto-espectro em correspondência com o registro de acelerações apresentado na Figura 4.22.

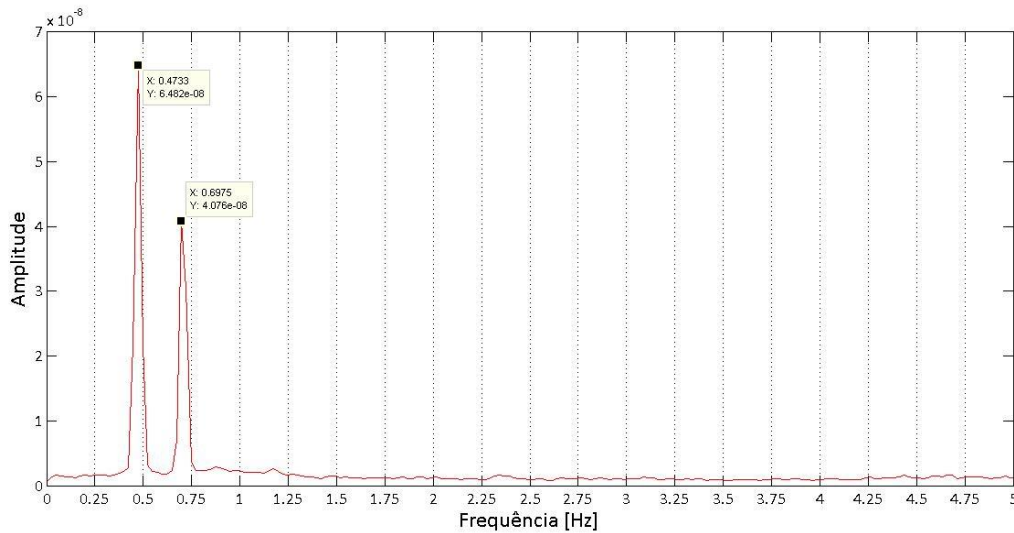


Figura 4.24 – Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento não crítico.

É possível identificar duas frequências que participam na resposta, uma com valor de 0,473 Hz e outra com 0,698 Hz. A primeira tem um valor próximo ao 1º modo de vibração da estrutura, associada a movimentos de flexão do fuste de betão armado, enquanto a segunda é referente ao 2º modo de vibração da estrutura correspondente a movimentos de flexão do palito metálico.

Um segundo exemplo de um evento não crítico foi o registrado no dia 31/08/2016 entre as 03:12 e as 04:12, tendo-se atingido uma aceleração máxima próxima de 0,5 mg (Figura 4.25).

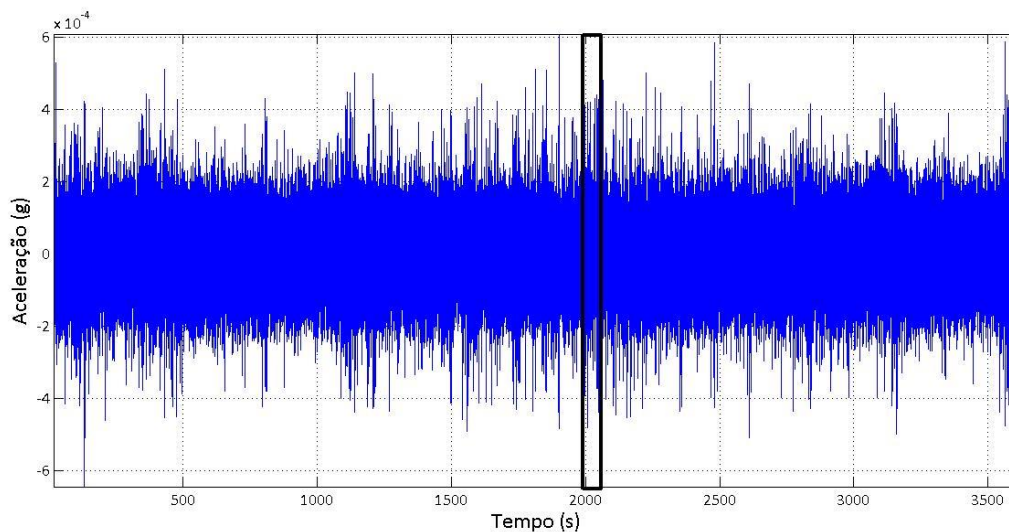


Figura 4.25 - Registro de aceleração na direção X à cota 312,65 m no dia 31/08/2016 entre as 03:12 e as 04:12.

Na Figura 4.26 apresenta-se uma ampliação de um período de 30 s.

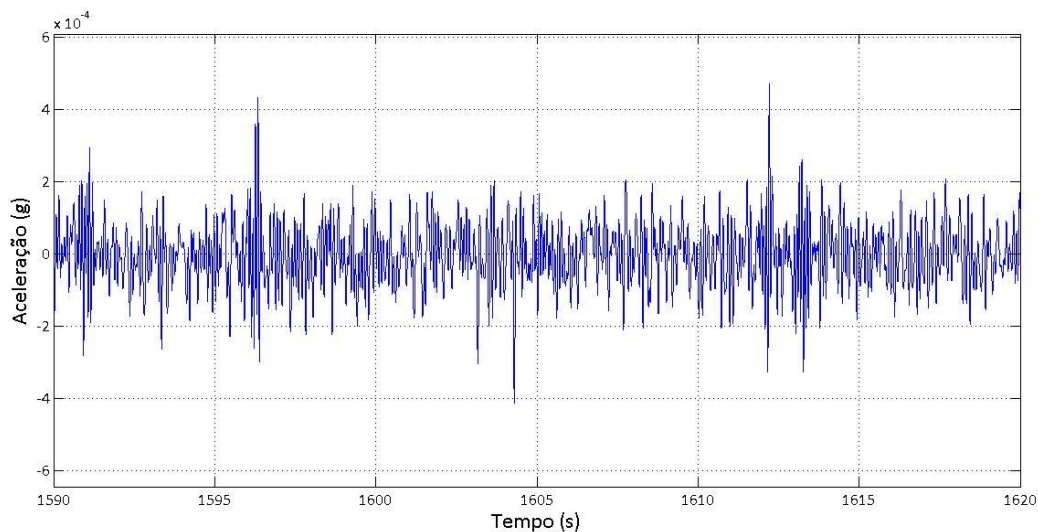


Figura 4.26 - - Pormenor do registro e acelerações na direção X à cota 312,65 no dia 31/08/2016 entre os instantes 1580 s e 1620 s.

Uma vez mais é difícil identificar uma senoide, ou um comportamento específico do registro. Na Figura 4.27 apresenta-se o auto-espectro em correspondência com o registro de acelerações apresentado na Figura 4.25.

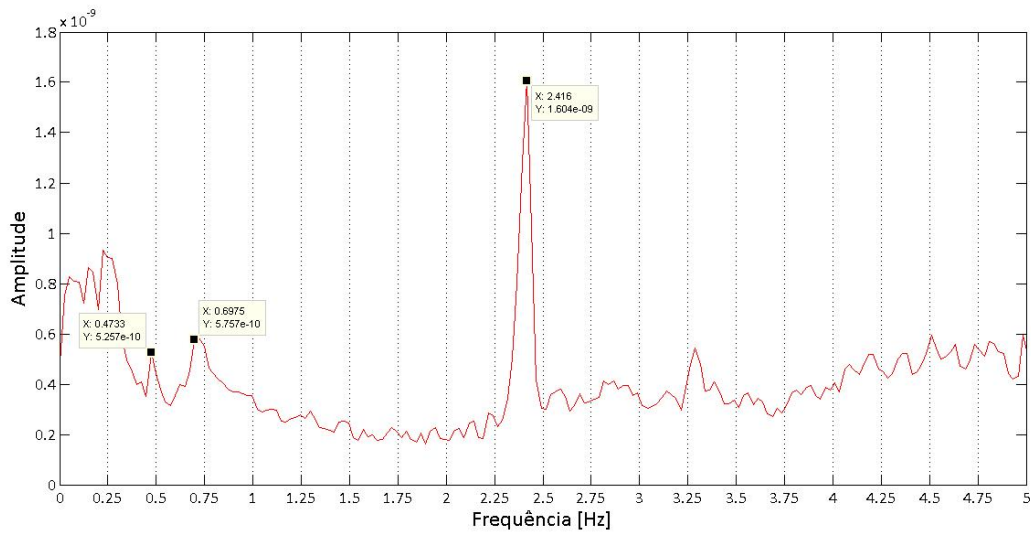


Figura 4.27 - Resposta no domínio da frequência do registro de acelerações referente ao evento não crítico.

No domínio da frequência é possível identificar, para além das frequências iguais a 0,473Hz e 0,698 Hz, correspondentes aos dois primeiros modos de vibração da estrutura, outros picos com frequências superiores, nomeadamente o pico referente ao 3º modo de flexão da torre com uma frequência próxima dos 2,4 Hz.

Na Tabela 4.2 apresentam-se alguns exemplos de eventos não críticos, para os quais os respectivos registos de acelerações encontram-se no Anexo II.

Tabela 4.2 - Identificação dos eventos não críticos no período em análise.

| dia | hora | Domínio Frequência (Hz) |
|------|-----------------|-------------------------|
| 21/8 | 07:12 até 08:12 | 0,473 e 0,698 |
| 22/8 | 02:12 até 03:12 | |
| 27/8 | 21:12 até 22:12 | |
| 29/8 | 03:12 até 04:12 | |
| 31/8 | 03:12 até 04:12 | Variável |

Os eventos não críticos apresentam geralmente a contribuição para a resposta em acelerações de um número maior de modos de vibração.

4.6 ANÁLISE DO EFEITO DO VENTO

Nesta secção foi analisada a velocidade e a direção do vento para o caso dos eventos críticos de modo a tentar associar o regime do vento aos valores das acelerações. Para tal, foi analisado numa primeira etapa

os registros da direção do vento, de modo a identificar o anemómetro que fornece melhor informação, ou seja, isenta, o mais possível, de eventuais perturbações associadas ao regime turbulento do escoamento do vento.

A direção do vento pode variar entre 0° e 360° , sendo o norte 0° e aumentando no sentido horário. Pontualmente verificou-se que alguns valores da direção do vento têm a sua variação limitada entre 0° e 180° , provavelmente devido a um erro no programa de aquisição de dados

Na Figura 4.28 mostram-se os registros da direção do vento para os anemómetros 1 e 2, respectivamente, no mesmo período de tempo da Figura 4.16.

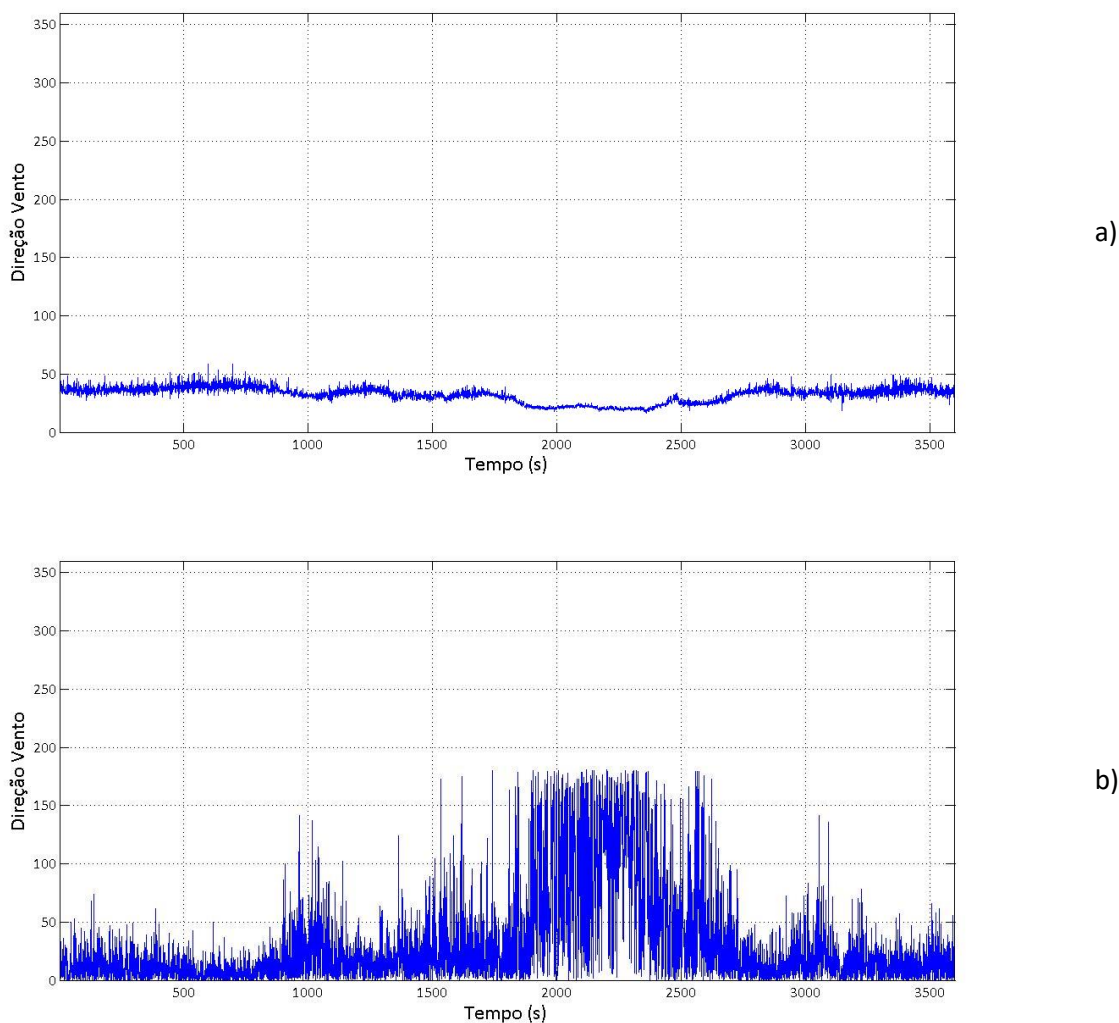


Figura 4.28 – Registros da direção do vento no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12: a) anemómetro 1; b) anemómetro 2.

Claramente percebe-se que o anemómetro 2 está sobre o efeito de vento turbulento, pois a sua direção não está bem definida, apresentando uma variação bastante significativa. Por outro lado o anemómetro

1 apresenta uma direção bem definida, com reduzida variabilidade, e com direção predominante de nordeste, e por isso menos afetado pelo efeito turbulento do vento no atravessamento da torre.

Tendo-se verificado que o vento atinge de uma maneira mais direta o anemómetro 1, apresenta-se na Figura 4.29 o registro da velocidade do vento medida por este anemómetro.

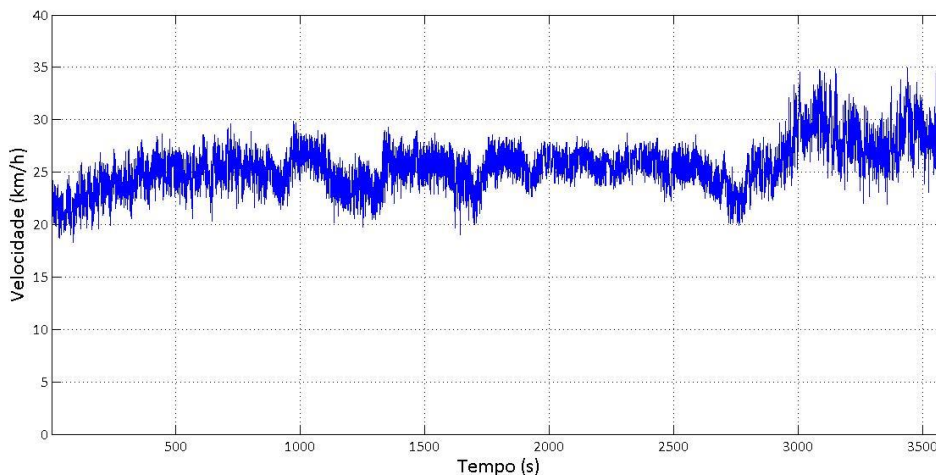


Figura 4.29 – Registro da velocidade do vento no anemómetro 1 no dia 06/09/2016 entre 03:12 e 04:12.

É possível verificar que a velocidade do vento varia entre os 20 e 30 km/h na grande maioria do tempo, chegando a cerca de 30 km/h no final do período de tempo analisado.

Com base nas informações anteriores referentes aos eventos críticos e outras similaridades para os eventos não críticos encontram-se resumidas nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4 as velocidades dos ventos que tipicamente provocam cada um dos eventos, além da indicação do anemómetro que foi responsável pela sua medição. São ainda indicados o dia, a hora e a principal frequência da estrutura que foi mobilizada.

Tabela 4.3 - Velocidade do vento para os casos com acelerações máximas.

| dia | hora | Domínio Frequência (Hz) | Anemómetro predominante | Velocidade no anemómetro predominante (km/h) |
|------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| 6/9 | 03:12 até 04:12 | 0,6975 | Ane. 1 | 20 a 30 |
| 6/9 | 10:12 até 11:12 | 0,6975 | Ane. 1 | 15 a 25 |
| 13/9 | 16:12 até 17:12 | 0,6975 | Ane. 2 | 15 a 25 |
| 14/9 | 13:12 até 14:12 | 0,6975 | Ane. 2 | 15 a 25 |
| 14/9 | 17:12 até 18:12 | 0,6975 | Ane. 2 | 15 a 25 |
| 15/9 | 13:12 até 14:12 | 0,6975 | Ane. 2 | 15 a 25 |

Tabela 4.4 – Velocidade do vento para os casos mais recorrentes.

| dia | hora | Domínio Frequência (Hz) | Anemómetro predominante | Velocidade no anemómetro predominante (km/h) |
|------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|---|
| 21/8 | 07:12 até 08:12 | 0,4733 e 0,6975 | Ane. 1 | 40 a 55 |
| 22/8 | 02:12 até 03:12 | 0,4733 e 0,6975 | Ane. 1 | 40 a 50 |
| 27/8 | 21:12 até 22:12 | 0,4733 e 0,6975 | Ane. 2 | 20 a 30 |
| 29/8 | 03:12 até 04:12 | 0,4733 e 0,6975 | Ane. 2 | 10 a 20 |
| 31/8 | 03:12 até 04:12 | Variável | Variável | 0 a 10 |

Analisando as tabelas, pode-se perceber que os casos que envolvem as maiores acelerações da torre (eventos críticos) estão todas associadas à mobilização do 2º modo de vibração da torre, referentes a movimentos do palito metálico. É também possível concluir que as velocidades do vento que geram as maiores vibrações não são muito elevadas, situando-se entre 15 e 30 km/h

Já para os eventos não críticos é possível verificar que os dois primeiros modos de vibração e, em alguns casos modos com frequências mais elevadas, são os que mais contribuem para a resposta dinâmica da torre. É possível perceber, também, que nestes eventos a velocidade do vento varia mais, em alguns casos apresentando valores mais altos, entre 40 e 55 km/h, e em outros casos valores bem pequenos, abaixo de 20 km/h até sem a ocorrência do vento.

Em relação à direção do vento não é possível chegar à alguma conclusão, uma vez que não é possível confiar na direção do mesmo devido à falha que o programa de aquisição de dados apresentou.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo realizar a análise dos dados coletados por meio de um sistema de monitorização instalado na torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

Foi feita a instalação de uma estação meteorológica na Torre para aprimorar seu sistema de monitorização permanente, fornecendo novos dados, como a temperatura interior e ambiente, a humidade do ar, pressão atmosférica, entre outros, contribuindo para futuras análises para compreender melhor sobre a resposta dinâmica da estrutura e as suas causas.

A análise das acelerações passou por diversos processos até chegar em suas conclusões, foi preciso elaborar um filtro tipo passa-baixo para eliminar valores indesejáveis, visto que para este estudo as frequências que mais influenciam na resposta da estrutura são as de baixa frequência.

Devido à grande quantidade de dados, decidiu-se por realizar uma envolvente com as acelerações e classificá-los em eventos críticos (valores elevados de acelerações) e eventos não críticos (valores baixos de acelerações), para, posteriormente, analisar caso a caso em relação à sua resposta dinâmica. Verificou-se, que numa primeira análise das envolventes, existiam casos com características de eventos críticos, ou seja, com altas acelerações, porém ao analisar esses casos e seus pormenores, percebeu-se que na verdade eles não representavam a resposta dinâmica da estrutura sob ação do vento, e sim alguma perturbação de baixa frequência. Diante disso, realizou-se um ajuste manual dos gráficos para eliminar perturbações de baixa frequência, realizando uma nova envolvente mais fiel ao que realmente ocorre.

Ao analisar a nova envolvente percebe-se que os valores das acelerações que realmente excitam a estrutura estão na ordem de 4 a 8,5 mg e os valores não críticos são cerca de 10 vezes menores.

Foi feito o estudo dos respectivos auto-espectros para os eventos críticos e não críticos e percebeu-se que os eventos onde apresentam maiores acelerações possuem apenas o contributo do 2º modo de vibração, ou seja, as maiores acelerações ocorrem devido à flexão do palito metálico. Já os eventos não críticos apresentam contributos do 1º e 2º modo de vibração, porém com acelerações menores.

Ao analisar a resposta do vento, verificou-se que não é possível determinar sua direção, pois ocorreu um erro no sistema de aquisição, porém foi possível associar suas velocidades para cada evento. Foi possível analisar que os eventos críticos apresentam velocidade entre 15 e 30 km/h, o que mostra não ser uma velocidade alta, porém salienta um ponto importante já conhecido da dinâmica das estruturas, onde não é o maior esforço que vai gerar a maior excitação e sim suas características dinâmicas.

5.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Os estudos experimentais do comportamento dinâmico da torre sob a ação do vento requerem ainda novos desafios, nomeadamente:

- Com os dados da estação meteorológica será possível a obtenção de registros da temperatura interior e do ambiente, e correlacionar esta informação com a eventual variação dos valores das frequências de vibração da estrutura. Adicionalmente a instalação de um anemómetro na parte superior do palito poderá fornecer informações acerca da verdadeira grandeza da velocidade e direção do vento, isentas dos efeitos aerodinâmicos turbulentos da torre.
- Para uma análise mais precisa e rápida dos dados, será necessário a utilização de outro tipo de filtros uma vez que o recurso a um filtro digital clássico, neste caso o filtro de Chebyshev, não mostrou a eficiência devida na remoção dos efeitos indesejados não relacionados com a ação do vento.
- Após uma caracterização mais detalhada dos efeitos dinâmicos da ação do vento na estrutura será de interesse a concepção e dimensionamento de uma solução de atenuação de vibrações, baseada, por exemplo, num amortecedor de massas sincronizadas (TMD).
- Outra problemática de interesse será o estudo dos fenómenos de fadiga da ligação entre o palito metálico e o fuste de betão, devido, sobretudo, ao fato do 2º modo de vibração da torre estar a ser bastante mobilizado sob a ação do vento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augusto, José A. Soares. **Introdução ao Projecto de Filtros e a Funções de Aproximação**. 2011. 35 f. Monografia (Especialização) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011

Beirow, B., & Osterrieder, P. (2001). **Dynamic Investigations of TV Towers**. In Structural Engineering, Mechanics and Computation (Vol. 1) (Vol. 1, pp. 629–636).

Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., & Tarczyński, L. (2008). The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, 30(10), 2771–2781. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008> FEI, Qingguo; ZHOU, Honggang; HAN, Xiaolin. **Structural health monitoring oriented stability and dynamic analysis of long-span transmission tower-line system**. 2011.

Eak, Rickey Ting Pek; ABD, Nurhanafifi Binti; SAHLAN, Shafishuhaza. **Matlab based graphical user interface application for vibration of beam structure**. 2013.

Fei, Qingguo; ZHOU, Honggang; HAN, Xiaolin. **Structural health monitoring oriented stability and dynamic analysis of a long-span transmission tower-line system**. 2012., Department Of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, 2012.

Pauli, Rafael Augusto de. **Avaliação experimental dos efeitos dinâmicos da ação do vento na torre de telecomunicações do monte da virgem**. 2016. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politecnico do Porto, Porto, 2016.

Alves, Ana Paulo Neves; LOURENÇO, Igor Mancilla. **Análise do comportamento estrutural de uma torre eólica onshore**. 2016. 123 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Mauá, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2016.

Margarido, Diogo dos Remédios. **Metodologias para avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Feup, Universidade do Porto, Porto, 2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pastor, M., & Binda, M. **Modal Assurance Criterion**. (2012) 48, 543–548.

Ribeiro D., Leite J., de Pauli R., Alves V., Costa B. & Calçada R. (2017), **Calibration of the numerical model of a telecommunications tower based on genetic algorithms**, Chapter 3, Genetic Algorithms: Advances in Research and Applications, Nova Publishers, USA.

ANEXO I – ALGORITMOS MATLAB.

Algoritmo referente à filtragem do sinal dos acelerômetros:

```
%Carregar a coluna do acelerômetro a ser filtrado
xn = g54;

%Filtro Lowpass

Fs=1/0.0098;
Fn=Fs/2;
Fc=15;
Wn=Fc/Fn;
% Filtro de Chebyshev tipo II
% n->ordem do filtro;R->atenuação;
% Wn->frequência de corte normalizada
n=10;
R=40;
[b, a]=cheby2(n, R, Wn);

Fpontos=512;
[h, w]=freqz(b, a, Fpontos, Fs);
m=abs(h);
p=angle(h);

xn_f_f=filtfilt(b, a, xn);
```

ANEXO I

Algoritmo para realizar o gráfico a envolvente de acelerações.

```
%Carregar a coluna do acelerômetro a ser filtrado
xn = g2;

%Filtro Lowpass

Fs=1/0.0098;
Fn=Fs/2;
Fc=15;
Wn=Fc/Fn;
% Filtro de Chebyshev tipo II
% n->ordem do filtro;R->atenuação;
% Wn->frequência de corte normalizada
n=10;
R=40;
[b,a]=cheby2(n,R,Wn);

Fpontos=512;
[h,w]=freqz(b,a,Fpontos,Fs);
m=abs(h);
p=angle(h);

xn_f_f=filtfilt(b,a,xn);

if max(xn_f_f) >= abs(min(xn_f_f))
a1=max(xn_f_f)
else a1 = abs(min(xn_f_f))
end
```

Algoritmo para realizar o ajuste dos registros.

```
ajus = 0.0005;
eliminar = find(abs(xn_f_f)>ajus)
xn_f_f(eliminar) = 0;
```

Passagem do domínio do tempo para o domínio da frequência.

```
record=xn_f_f;

%record(3949:4096)=0;

%Auto-spectra

nfft=4096;
Fs=1/0.0098;
window= hanning(4096);
noverlap=0;
dflag='none';

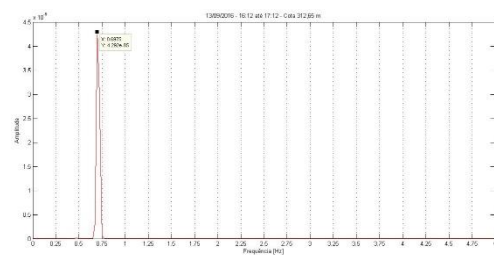
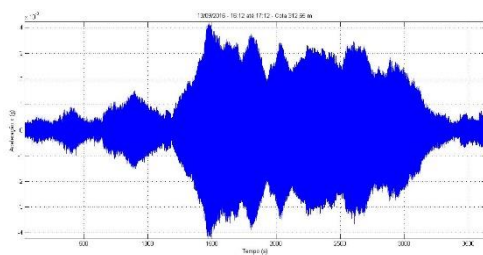
% Auto-espectro normalizado e medio de xn
[Pxx,f] = pwelch(record,window,noverlap,nfft,Fs);
aux_exp=[f,Pxx];
%save AUT_exp.txt aux_exp -ascii

% Figure = figure('PaperSize',[16 8],'Color',[1 1 1]);
plot(f,Pxx,'black','LineWidth',1,...
     'Color',[1 0 0]);
axis tight
%axis([0 10 0 0.6E-0]);
legend('v405-com irregularidades','v405-sem irregularidades')
xlabel('Frequência [Hz]')
ylabel('Amplitude')
hold on
```

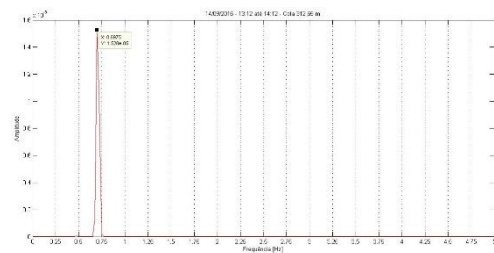
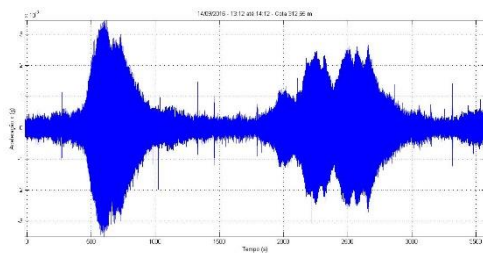

ANEXO II – EVENTOS CRÍTICOS E NÃO CRÍTICOS

A seguir é possível ver os gráficos correspondentes aos eventos críticos, para quais foram registradas as maiores acelerações, e os respectivos auto-espectros.

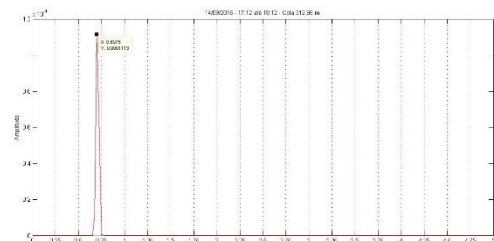
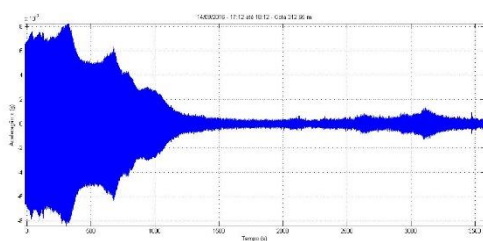
Aceleração e espectro de frequência do dia 13/09/2016 entre 16:12 e 17:12.



Aceleração e espectro de frequência do dia 14/09/2016 entre 13:12 e 14:12.

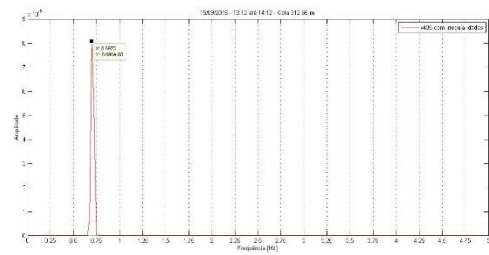
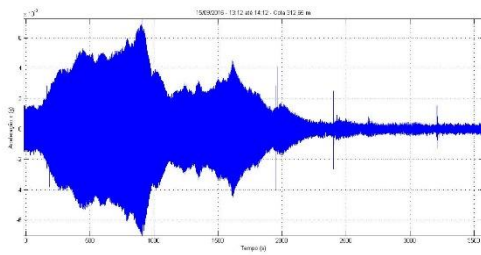


Aceleração e espectro de frequência do dia 14/09/2016 entre 17:12 e 18:12.



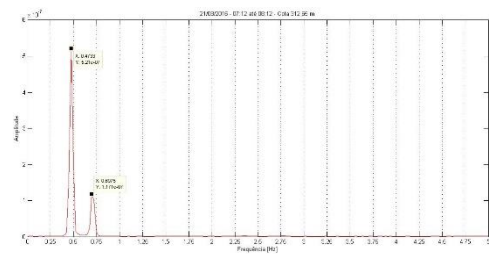
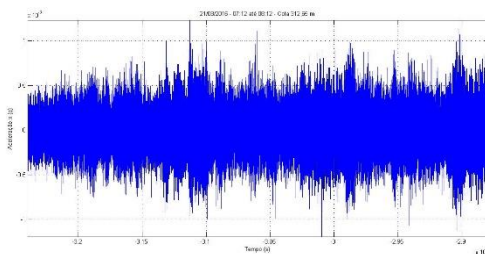
ANEXO II

Aceleração e espectro de frequência do dia 15/09/2016 entre 13:12 e 14:12.

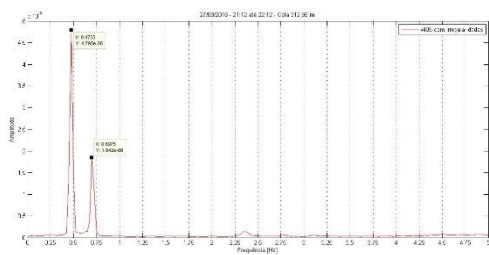
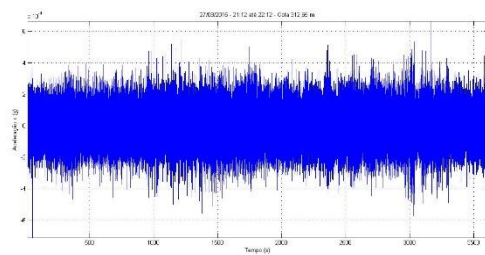


A seguir é possível ver os gráficos correspondentes aos eventos não críticos, para quais foram registradas as menores acelerações, e os respectivos auto-espectros.

Aceleração e espectro de frequência do dia 21/08/2016 entre 07:12 e 08:12.



Aceleração e espectro de frequência do dia 27/08/2016 entre 21:12 e 22:12.



Aceleração e espectro de frequência do dia 29/08/2016 entre 03:12 e 04:12.

