

Avaliação experimental dos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem baseada em modelos autorregressivos

Experimental evaluation of the wind-induced dynamic effects on Monte da Virgem telecommunications tower based on autoregressive models

Diogo Ribeiro
Jorge Leite
Rui Caçada

Resumo

Este artigo descreve a avaliação experimental dos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento numa torre de telecomunicações com base num sistema de monitorização contínua. A torre de telecomunicações do Monte da Virgem é composta por um fuste em betão armado e um mastro em aço, com uma altura total de 177 m. O sistema de monitorização inclui acelerómetros, anemómetros e uma estação meteorológica, permitindo a caracterização das acelerações máximas da estrutura e dos regimes de vento durante um período de 6 meses. A análise dos resultados possibilitou a identificação de eventos específicos, denominados de eventos extraordinários, para os quais a resposta dinâmica da torre sob ações do vento surge amplificada. A identificação automática dos eventos extraordinários baseou-se na aplicação aos registos de aceleração de um modelo autorregressivo (AR) e na estimativa da sua ordem de modelo ótima com base numa decomposição de valores singulares (SVD). Os resultados comprovaram a robustez e eficiência da técnica proposta na identificação do número, duração e amplitude máxima das acelerações associadas aos eventos extraordinários, visando a sua potencial integração em sistemas de monitorização da integridade estrutural (SHM).

Palavras-chave: Torre de telecomunicações / Sistema de monitorização contínua / Eventos extraordinários / Modelo autorregressivo / Decomposição em valores singulares

Abstract

This article describes the experimental evaluation of the wind-induced dynamic effects on a telecommunications tower based on a continuous monitoring system. Monte da Virgem telecommunications tower consists in a reinforced concrete shaft and a steel mast, with a total height of 177 m. The monitoring system includes accelerometers, anemometers and a meteorological station, allowing the characterization of the maximum accelerations of the structure and wind regimes during a period of 6 months. The analysis of the results enabled identifying specific events, denominated as extraordinary events, for which the dynamic response of the tower under wind actions appears significantly amplified due to wind aeroelastic instability phenomena in the steel mast. The automatic identification of the extraordinary events was based on the application to the acceleration's records of an autoregressive model (AR) and estimation of its optimal order number based on a singular value decomposition (SVD). The results proved the robustness and efficiency of the proposed technique in identifying the number, duration and maximum amplitude of accelerations associated to the extraordinary events, envisaging its potential integration in Structural Health Monitoring (SHM) systems.

Keywords: Telecommunication tower / Continuous monitoring system / Extraordinary events / Autoregressive model / Singular value decomposition

Diogo Ribeiro

Professor Adjunto
CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia do Porto
Porto, Portugal
drr@isep.ipp.pt

Jorge Leite

Investigador / Engenheiro Civil
CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia do Porto
Porto, Portugal
jleite.eng@gmail.com

Rui Calçada

Professor Catedrático
CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Porto, Portugal
ruiabc@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

RIBEIRO, D. [et al.] – Avaliação experimental dos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem baseada em modelos autorregressivos. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 10. ISSN 2183-8488. (julho 2019) 101-114.

1 Introdução

Nas últimas décadas, a aplicação de sistemas SHM a edifícios altos e torres de telecomunicações permitiu melhorar significativamente as suas condições de segurança e de operacionalidade [1]. Neste tipo de estruturas, os indicadores de desempenho contruídos a partir das respostas medidas através dos sistemas SHM têm sido utilizados em diferentes aplicações: a) na identificação de danos, possibilitando a otimização das operações de inspeção e manutenção, b) na avaliação das condições de operacionalidade das estruturas, sobretudo no que diz respeito a fenómenos de vibrações excessivas, e as suas consequências para o conforto, saúde e segurança dos utilizadores, segurança dos equipamentos e também ao nível da qualidade da comunicação e transmissão de sinal, e c) na avaliação do desempenho estrutural sob cenários de ações extraordinárias.

Breuer *et al.* [2] realizaram ensaios dinâmicos na torre de televisão de Estugarda, na Alemanha, que possibilitaram a medição dos deslocamentos no topo da torre causados pela ação do vento e pela influência combinada da radiação solar e da variação diária da temperatura do ar, durante diferentes estações do ano e condições climáticas. Os resultados dos ensaios demonstraram que os valores do deslocamento, assim como o valor frequência fundamental da torre (0,19 Hz), eram idênticos aos valores estimados experimentalmente 50 anos antes, revelando que a condição estrutural permanece inalterada.

Beirrow e Osterrieder [1] realizaram investigações experimentais na torre de televisão de Cottbus, na Alemanha, que contribuíram para um melhor conhecimento acerca dos fenómenos de vibrações excessivas induzidas pelo vento, e a sua influência na manutenção da estrutura. As vibrações excessivas da torre, em algumas situações da ordem de 3 m/s², e detetadas por intermédio de vários geofones posicionados ao longo do fuste em betão, foram associadas ao desprendimento de vórtices na antena metálica localizada na parte superior da torre. O estudo permitiu ainda a avaliação do conforto do pessoal técnico durante os eventos de vibração da torre, classificado de satisfatório, e viabilizou o aumento da sua capacidade de transmissão, por intermédio do aumento do número de plataformas externas, mesmo durante ocorrência de fenómenos de vibração excessiva.

Chen *et al.* [3] e Guo *et al.* [4] realizaram medições contínuas das vibrações ambientais da torre de televisão de Guangzhou, na China, com o objetivo de caracterizar o seu comportamento dinâmico em condições de normal operação. Com base nas acelerações medidas em diferentes locais ao longo da altura da torre, o sistema SHM detetou com sucesso vários tipos de eventos extraordinários nomeadamente relacionados com a ocorrência de sismos, ventos fortes e tufões. O desempenho da torre sob a ação de tufões foi considerado satisfatório considerando um intervalo de confiança de 90% em relação ao limite regulamentar.

Relativamente às metodologias de identificação de eventos extraordinários, a maioria dos autores omite ou fornece poucos detalhes acerca da sua implementação computacional e aplicação, no entanto, de entre os poucos estudos disponíveis são utilizadas geralmente ferramentas semiautomáticas ou manuais, que requerem a intervenção de um utilizador, com limitações ao nível do tempo de

processamento de dados, e por isso com dificuldades na integração em sistemas SHM. Neste contexto assume especial importância o desenvolvimento de metodologias automáticas de identificação de eventos extraordinários que permitam, por exemplo, o registo sistemático do número de eventos, da sua duração e dos valores das amplitudes máximas das acelerações, ao longo de períodos alargados de tempo e com a possibilidade de emissão de avisos e alarmes. Neste âmbito, importa ainda salientar a escassez de estudos experimentais que reportem cenários de amplificação da resposta dinâmica das estruturas devidos a fenómenos de instabilidade aeroelástica sob ação do vento, sobretudo em condições de normal operacionalidade das estruturas.

O presente artigo visa a caracterização da resposta dinâmica de uma torre de telecomunicações sob da ação do vento com base num sistema de monitorização contínua, complementado com um ensaio de vibração ambiental. O sistema de monitorização contínua possibilitou a caracterização das acelerações máximas da estrutura e dos regimes de vento atuantes durante um período de 6 meses. O processamento automático dos dados experimentais possibilitou a identificação automática de eventos extraordinários, associados a níveis de aceleração elevados da estrutura, com base num modelo autorregressivo (AR) e na estimativa do seu número de ordem ótimo a partir de uma decomposição de valores singulares (SVD). Esta técnica inovadora permitiu de uma forma precisa e eficiente registar o número, a duração e as acelerações máximas dos

eventos extraordinários ocorridos ao longo do período de medição, demonstrando potencialidades para a sua integração num sistema SHM.

2 A torre de telecomunicações do Monte da Virgem

A torre de telecomunicações do Monte da Virgem é uma torre de transmissão construída pela Teledifusora de Portugal (atual Altice) no ano de 1995 e localizada em Vila Nova de Gaia, no norte de Portugal. A estrutura da torre é composta por um fuste de betão armado com 126 m de altura, e uma torre metálica de 51 m de altura, perfazendo uma altura total de 177 m, constituindo a mais alta estrutura do género existente em Portugal (Figura 1a) [5].

O fuste de betão armado apresenta a forma de um hiperboloide, com uma secção circular oca, e um diâmetro variável entre 14,3 m, junto à base, e 7,7 m no topo. A fundação do fuste é do tipo direto e a sua base está localizada a 3,5m de profundidade em relação à cota do terreno. O fuste é dotado de cinco pisos técnicos, formados por uma laje em consola em betão pré-esforçado (Figura 1c). No interior do fuste existe uma caixa de elevadores e uma escada metálica, que se apoiam em perfis metálicos, distribuídos intercaladamente ao longo da altura do fuste, e por sua vez ligados a consolas metálicas fixadas na parede (Figura 1d).

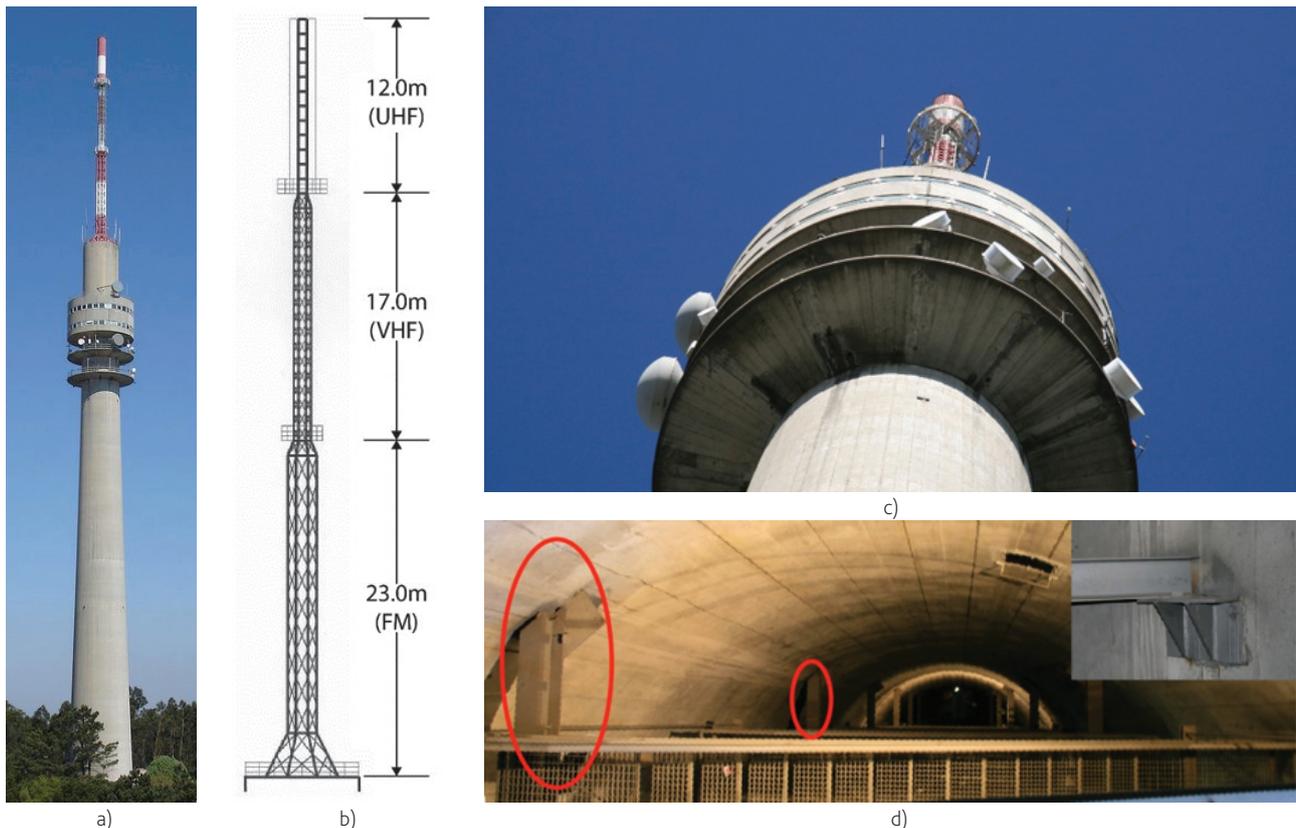


Figura 1 Torre de telecomunicações do Monte da Virgem: a) vista geral; b) torre metálica; c) pisos técnicos; d) vista de topo das vigas de travamento da parede do fuste e pormenor do apoio

A torre metálica é constituída por uma treliça espacial de barras metálicas e formada por três troços ao longo da sua altura (Figura 1b). O primeiro troço, para montagem do sistema de transmissão FM, tem 23 m de altura e uma dimensão transversal máxima de cerca de 2,20 m. O segundo troço, para montagem do sistema de transmissão VHF, apresenta 17 m de altura e uma dimensão transversal máxima de cerca de 1,20 m. O terceiro e último troço, para montagem do sistema de transmissão UHF, tem 12 m de altura e uma secção transversal quadrada de 0,64 m de lado, e está envolvido por uma manga cilíndrica, de secção circular e em polyester, de 1,80 m de diâmetro e com uma massa de 2 t. A torre tem uma base em forma octogonal e é fixada ao fuste de betão por intermédio de chumbadouros. A transição da torre metálica para o fuste é realizada por meio de uma laje de betão.

3 Ensaio de vibração ambiental

O ensaio de vibração ambiental teve como objetivo a identificação das propriedades modais da torre, em particular as frequências naturais e os modos de vibração.

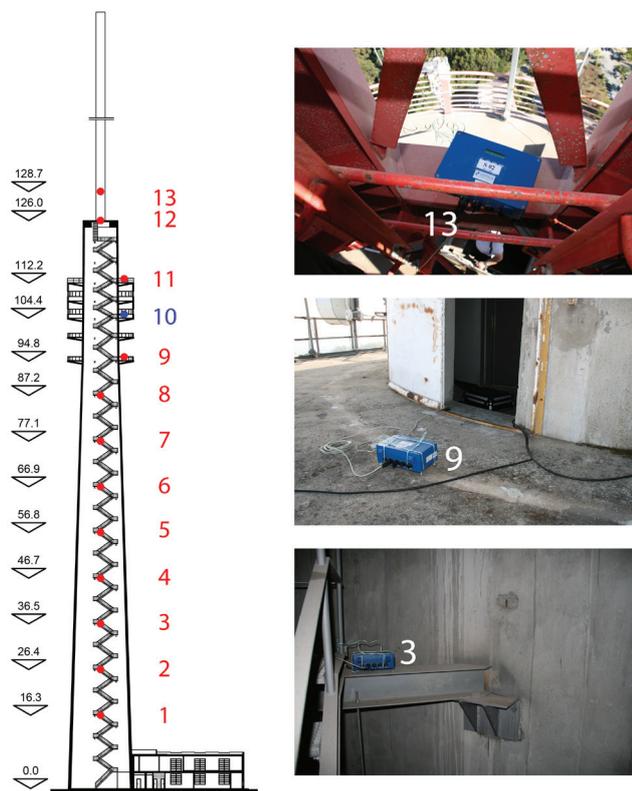


Figura 2 Ensaio de vibração ambiental: posicionamento dos sismógrafos e detalhes das posições 3, 9 e 13

O ensaio foi realizado com recurso a uma técnica com um ponto de referência fixo e pontos de medição móveis, envolvendo a utilização de 2 sismógrafos da marca GeoSIG, modelo GMS Plus+, munidos de acelerómetros triaxiais do tipo force-balanced. Os sismógrafos possuem uma gama de medição de $\pm 0,5$ g, sensibilidade igual a

2,5 V/g, uma frequência de aquisição de 200 Hz e um sistema de sincronização por GPS.

As acelerações foram medidas segundo duas direções radiais e ortogonais entre si, em correspondência com as direções Norte-Sul (N-S) e Este-Oeste (E-O), tendo sido instrumentados 13 pontos de medição: doze localizados no fuste de betão e um situado na torre metálica, conforme esquematizado na Figura 2.

O ensaio envolveu 12 configurações experimentais baseadas num ponto de referência fixo localizado no pavimento do piso técnico à cota 104,4 (ponto 10). Os pontos de medição móveis do fuste foram posicionados sobre as vigas metálicas de travamento (pontos 1 a 8), devido à impossibilidade de aceder diretamente à parede do fuste, e no pavimento dos pisos técnicos (pontos 9, 11 e 12). O ponto de medição móvel localizado na torre metálica foi posicionado a aproximadamente 4 m acima da sua base (ponto 13). A limitação do acesso a pontos da torre metálica localizados a cotas superiores prendeu-se com razões de segurança e devido a interferências eletromagnéticas no equipamento de medição causadas pela proximidade dos emissores dos sinais rádio. Na Figura 2 são apresentados os detalhes do posicionamento dos sismógrafos nos pontos de medição 3, 9 e 13.

A identificação dos parâmetros modais foi realizada por aplicação da versão melhorada do método da decomposição no domínio da frequência (EFDD) [6], com recurso ao programa comercial ARTeMIS [7]. Na Figura 3 apresentam-se as curvas dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros de todas as configurações experimentais, obtidas por aplicação do método EFDD, e considerando os registos de acelerações obtidos em duas direções ortogonais (N-S e E-O). Foram identificados 6 modos de vibração associados à torre em correspondência com os 6 picos assinalados nas curvas do primeiro valor singular. Adicionalmente, a análise das curvas do primeiro e segundo valores singulares permitiu identificar a existência de modos duplos (1-1a, 2-2a, 3-3a e 4-4a), isto é, pares de modos de vibração com valores idênticos de frequências naturais, configurações modais semelhantes, mas ocorrendo em direções ortogonais. A existência de modos duplos é justificada pelo facto de a torre ser uma estrutura axissimétrica. Os modos de vibração 1a, 2a, 3a e 4a estão associados à direção N-S enquanto os modos 1 a 6 estão associados à direção E-O.

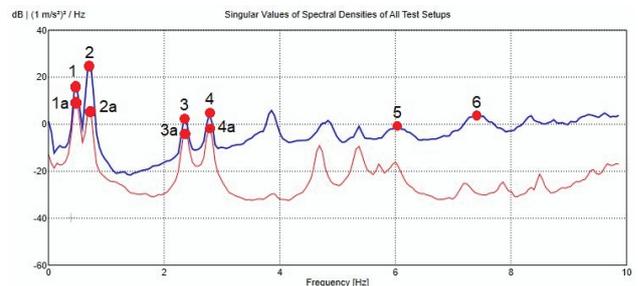


Figura 3 Método EFDD - valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros

Na Figura 4 são ilustrados os valores médios das frequências e as correspondentes configurações modais da torre obtidos com base nas curvas de valores singulares. O desvio-padrão das frequências é

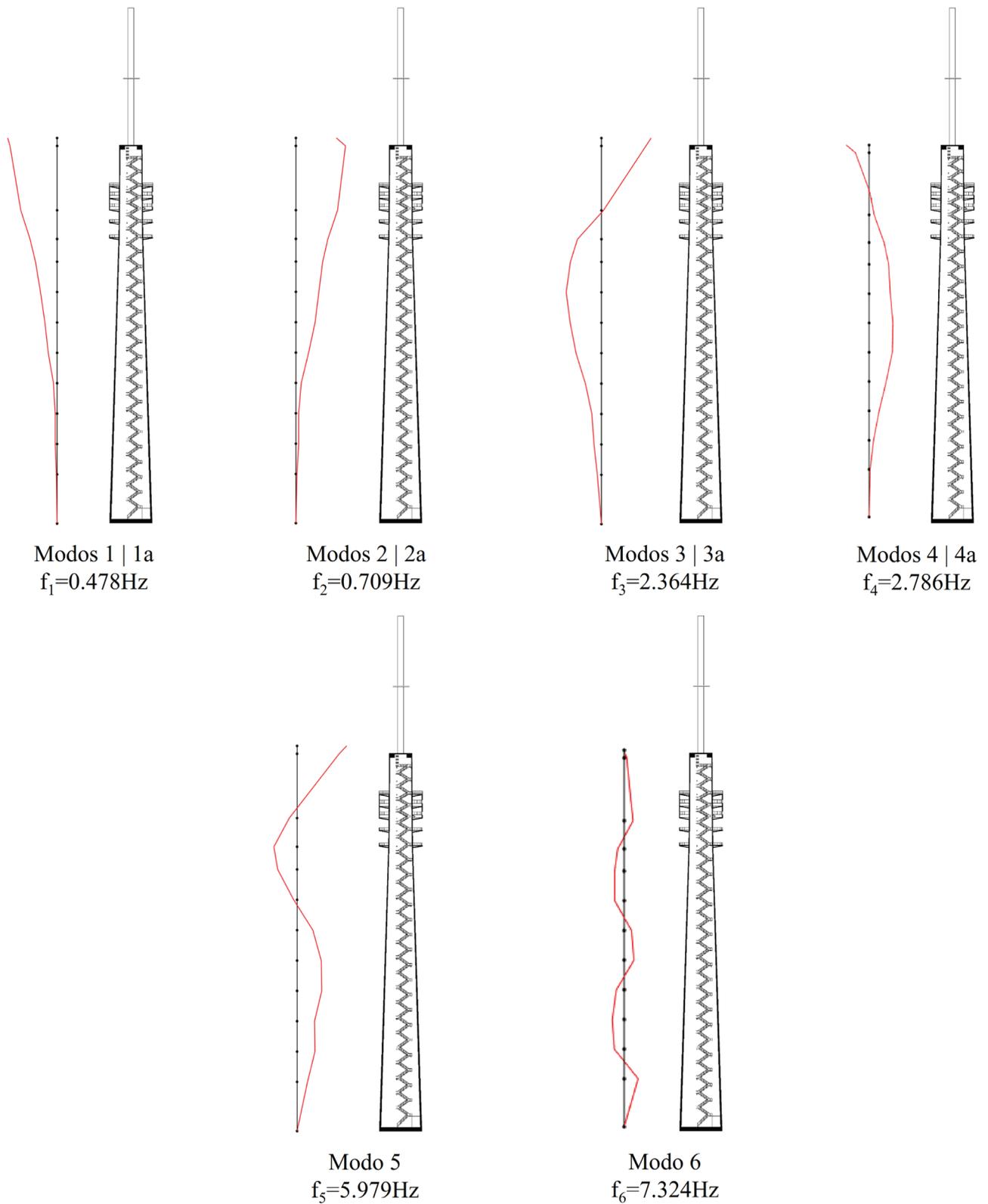


Figura 4 Parâmetros modais experimentais

inferior a 0,002 Hz em todos os modos de vibração identificados. Os constrangimentos nas medições na torre metálica condicionaram a representação das suas configurações modais que foram caracterizadas em um único ponto.

A análise das configurações permite identificar movimentos associados à flexão da estrutura. A distinção entre os modos 1 e 2 foi possível graças à informação modal recolhida no ponto de medição localizado na torre metálica. Esta informação possibilitou escalar os movimentos da torre em relação aos movimentos do fuste em betão, permitindo compreender que o modo 1 envolve movimentos do fuste enquanto o modo 2 é um modo de flexão local da torre metálica com repercussões nos movimentos do fuste, uma vez que ambas as subestruturas estão ligadas do ponto de vista estrutural. O mesmo se verifica com os modos 3 e 4, em que o modo 3 envolve movimentos do fuste, enquanto o modo 4 é um modo local da torre metálica. Os modos 5 e 6 envolvem sobretudo movimentos de flexão do fuste de betão.

4 Sistema de monitorização contínua

4.1 Descrição

O sistema de monitorização instalado na torre do Monte da Virgem tem como objetivo a caracterização das acelerações máximas da estrutura e dos regimes de vento atuantes.

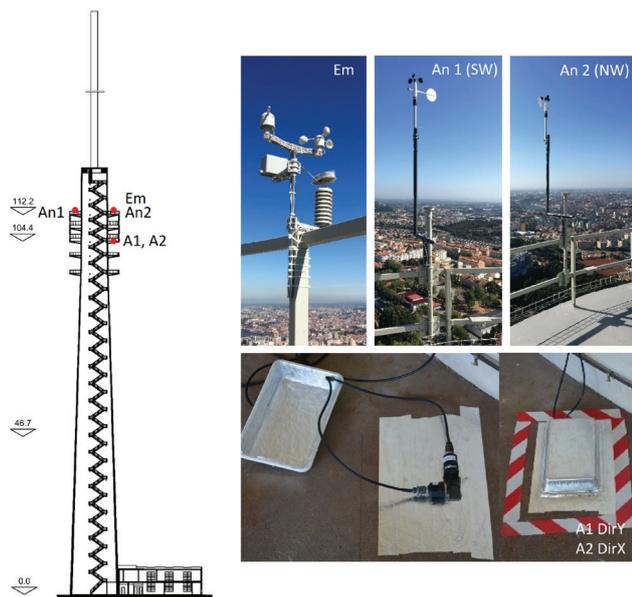


Figura 5 Sistema de monitorização contínua: posicionamento dos sensores

Para o efeito, foram instalados na torre 2 acelerómetros piezoelétricos, marca PCB modelo 393B12, 2 anemómetros, marca VAISALA modelo WM302, e uma estação meteorológica PCE-FWS-20 (Figura 5). Os acelerómetros foram posicionados à cota 104,4 (acelerómetros A1 e A2), fixos diretamente ao pavimento, e protegidos das radiações eletromagnéticas por intermédio de

uma caixa protetora em alumínio. Os anemómetros (An1 e An2) e a estação meteorológica (Em) foram instalados no piso exterior à cota 112,2 e em posições distintas, nomeadamente sudoeste (SW), noroeste (NW) e norte (N), e fixos ao guarda corpos por intermédio de estruturas auxiliares ou diretamente com abraçadeiras metálicas. A localização dos anemómetros foi definida de modo a minimizar as perturbações nas medições devidas aos efeitos turbulentos da ação do vento, por influência da geometria da torre. Esta decisão foi suportada com base num modelo numérico calibrado da torre e em análises de dinâmica computacional de fluidos (CFD) [8].

A aquisição dos sinais provenientes dos acelerómetros e anemómetros foi realizada através de um sistema de aquisição de dados cDAQ-9172 da National Instruments, por meio de módulos de entrada analógica, NI 9233 e NI 9205, respetivamente. Este sistema liga a um computador, através de um protocolo USB, que por sua vez está ligado à Web através de um router. A estação meteorológica transmite os dados através de um protocolo sem fios a um recetor local, que por sua vez envia a informação para o computador via protocolo USB.

4.2 Resultados

Com base na análise dos registos em acelerações medidos na estrutura durante um período de 6 meses, de 1 de agosto de 2017 a 31 de janeiro de 2018, foram identificados dois tipos de eventos, designados de eventos correntes e de eventos extraordinários.

Os eventos correntes estão relacionados com ocorrências frequentes, que ocorrem na grande maioria do tempo de vida da estrutura, e onde os picos máximos das acelerações variam entre 1,0 mg e 5,0 mg. A título exemplificativo, são apresentados nas Figs. 6 e 7 os registos de acelerações típicos de dois eventos correntes (C1 e C2), incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados entre DC e 5 Hz, e os registos da direção e velocidade do vento.

O evento C1 retrata uma ocorrência típica do período diurno, onde o vento é predominantemente oriundo de Norte, com muito ligeira variação de direção, e com uma velocidade variável entre 10 km/h e 35 km/h. O conteúdo em frequência da resposta dinâmica da estrutura distribui-se numa gama de frequências entre DC e 5 Hz, com preponderância para os modos de vibração 1 e 2, correspondentes à flexão do fuste e da torre metálica respetivamente.

Por sua vez, o evento C2 retrata uma ocorrência típica do período noturno, onde o vento é predominantemente oriundo de Sul, com variação de direção geralmente pouco pronunciada, e com uma velocidade variável entre 10 km/h e 30 km/h. O conteúdo em frequência da resposta dinâmica da estrutura, à semelhança do evento anterior, também se distribui numa banda de frequências entre DC e 5 Hz.

Os eventos extraordinários estão relacionados com ocorrências de menor frequência, associadas a uma amplificação da resposta dinâmica, e onde os picos máximos das acelerações variam entre 5,0 mg a 15,0 mg. A título exemplificativo, são apresentados nas Figuras 8 e 9 os registos de acelerações típicos de dois eventos extraordinários (E1 e E2), incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados entre DC e 5 Hz, e os registos da direção e velocidade do vento. São ainda apresentados detalhes de ambos os registos de acelerações para um intervalo de tempo de 10 s.

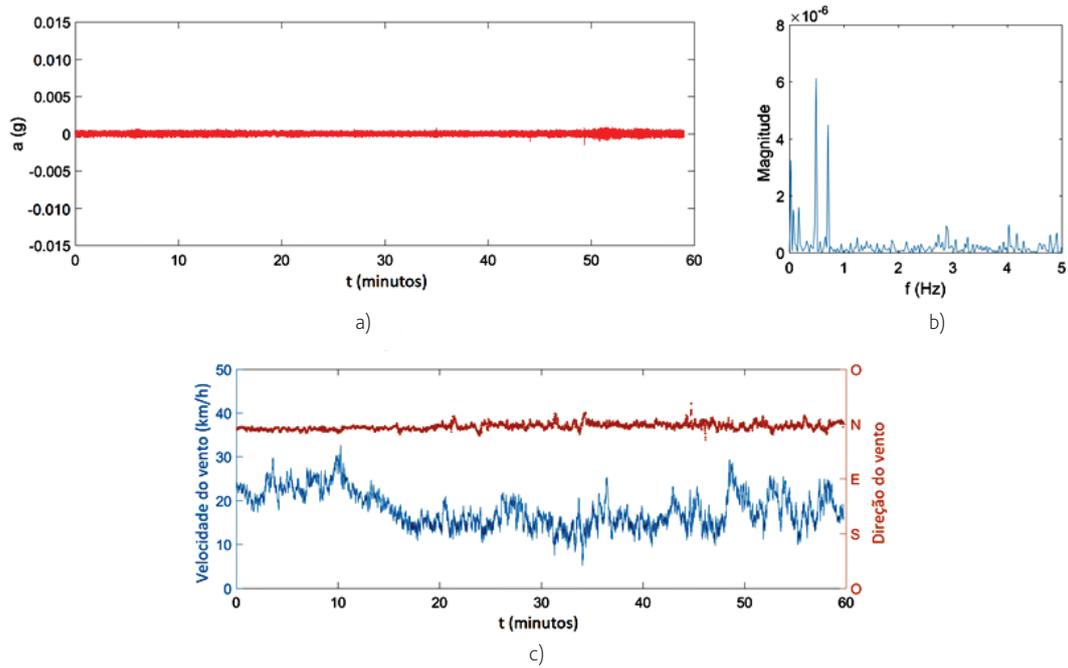


Figura 6 Evento corrente C1: a) registo de acelerações, b) auto espectro médio e normalizado das acelerações, e c) registo da velocidade e direção do vento

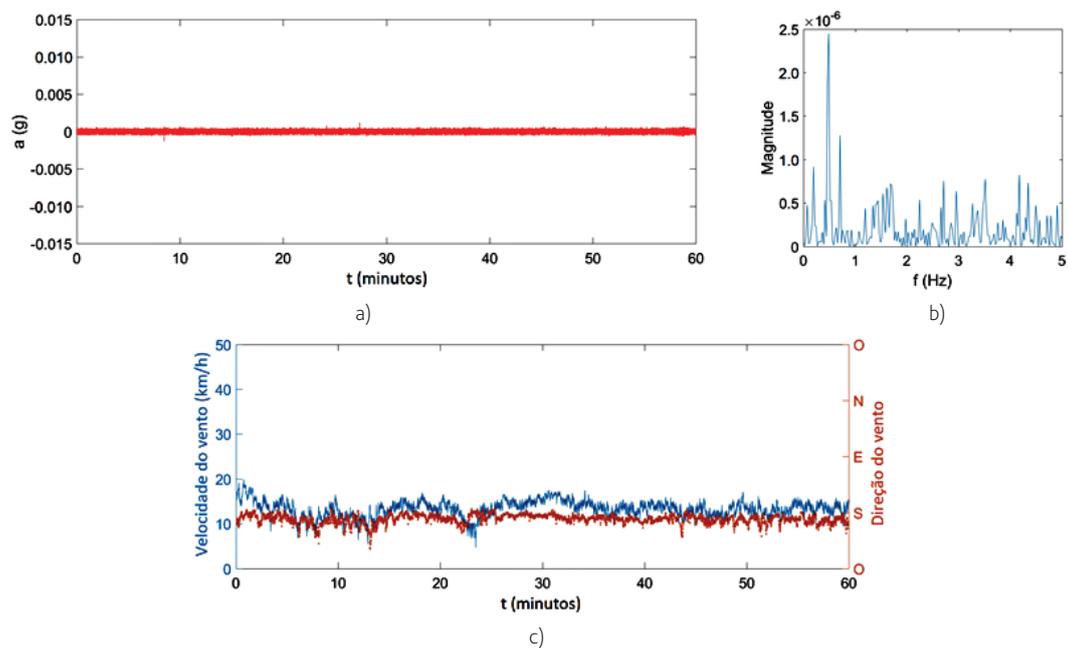


Figura 7 Evento corrente C2: a) registo de acelerações, b) auto espectro médio e normalizado das acelerações, e c) registo da velocidade e direção do vento

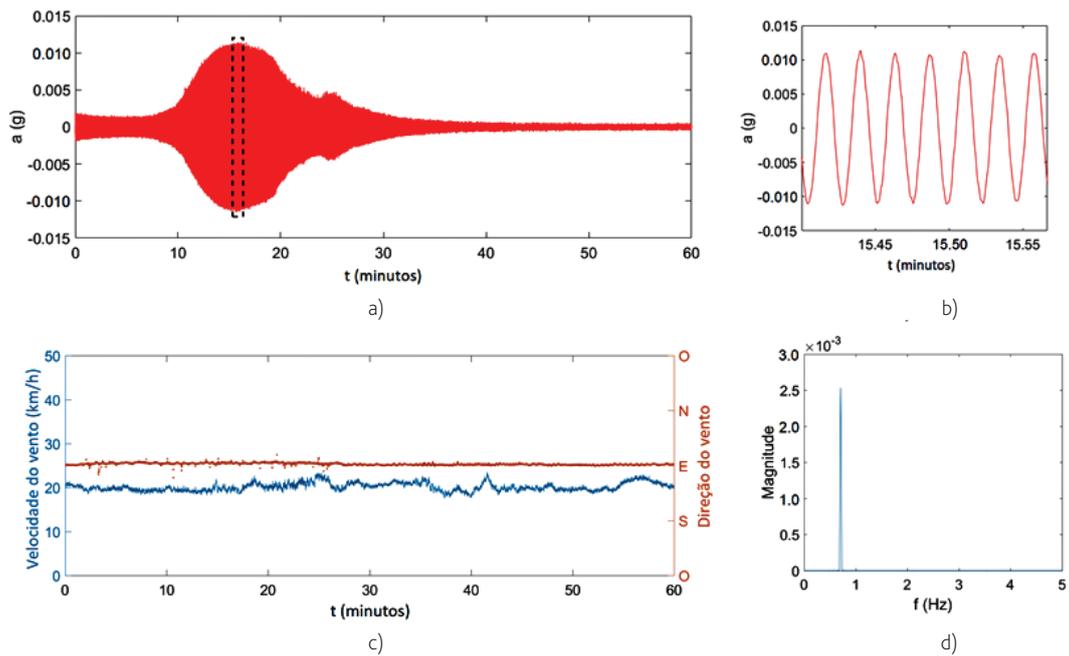


Figura 8 Evento extraordinário E1: a) registo de acelerações, b) detalhe do registo de acelerações durante 10s, c) registo da velocidade e direção do vento, e d) auto espetro médio e normalizado das acelerações

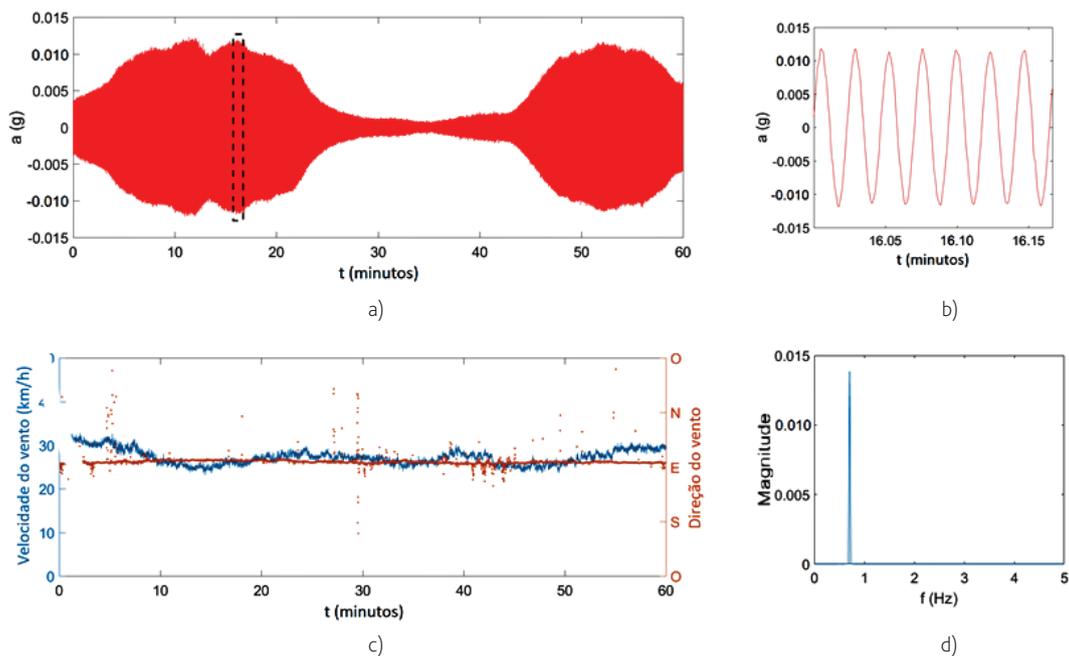


Figura 9 Evento extraordinário E2: a) registo de acelerações, b) detalhe do registo de acelerações durante 10s, c) registo da velocidade e direção do vento, e d) auto espetro médio e normalizado das acelerações

A observação das figuras permite constatar que a ocorrência de eventos extraordinários está geralmente associada a vento oriundo de Este, praticamente sem variação de direção, e com velocidades aproximadamente constantes e situadas no intervalo entre 20 km/h e 35 km/h. O conteúdo em frequência da resposta dinâmica da estrutura apresenta o contributo único do modo de vibração 2 ($f_2 = 0,709$ Hz) associado à flexão da torre metálica e com repercussões nos movimentos do fuste, uma vez que ambas as subestruturas estão ligadas do ponto de vista estrutural.

4.3 Análise da estabilidade aeroelástica sob ação do vento

A estabilidade aerodinâmica da torre metálica quanto solicitada pela ação do vento é essencialmente condicionada pelo involucro cilíndrico que envolve o troço UHF, na sua extremidade superior. Da interação entre o escoamento do vento com um corpo cilíndrico pode resultar, em algumas situações, e a jusante do corpo, a formação de uma zona de escoamento turbulento, fortemente perturbada, denominada estrada de von Kármán, e caracterizada pela distribuição organizada de pares de vórtices desfasados que se libertam da superfície do corpo [9]. A libertação alternada de vórtices, de um lado e outro do cilindro, modifica a distribuição de pressões em seu redor, gerando uma força transversal oscilante com a mesma frequência a que se libertam os vórtices. Os fenómenos de instabilidade aeroelástica ocorrem quando os movimentos induzidos, ou as forças aplicadas, conduzem ao aumento da amplitude do movimento. Nestas circunstâncias a frequência de libertação dos vórtices (f) é próxima da frequência natural do corpo (neste caso f_2) e as oscilações deste tornam-se de grande amplitude, condições ditas ressonantes, em que $f (= f_2)$ se mantém constante mesmo que U aumente, sendo a libertação de vórtices controlada pelo próprio movimento do corpo. Na Figura 10 apresenta-se a ilustração deste fenómeno denominado de *lock-in*.

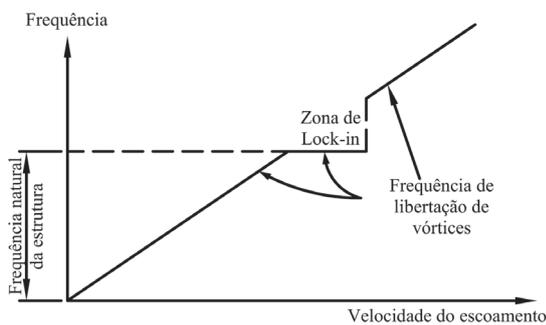


Figura 10 Variação da frequência de libertação de vórtices com a velocidade do vento e zona de *lock-in*

A caracterização dos fenómenos de instabilidade aeroelástica é realizada, de forma aproximada, com base num parâmetro adimensional, o número de Strouhal (St) que envolve os valores característicos da velocidade do escoamento (U), do diâmetro do cilindro (D) e da frequência de libertação dos vórtices (f):

$$St = \frac{fD}{U} \quad (1)$$

Considerando que $f = f_2 = 0,709$ Hz, $D = 1,8$ m e que para cilindros de secção circular o número de Strouhal toma o valor de 0,20 [9], resulta que a velocidade crítica do vento para a torre metálica é aproximadamente igual a 23,0 km/h.

5 Identificação automática de eventos extraordinários

5.1 Metodologia

A metodologia de identificação automática de eventos extraordinários tem como objetivo a quantificação do número de eventos, e da correspondente duração, além do valor máximo da amplitude da aceleração. Na Figura 11, ilustra-se, esquematicamente, os passos de aplicação da metodologia desenvolvida para a identificação automática de eventos extraordinários. A metodologia proposta assenta num modelo autorregressivo (AR) e na estimativa do seu número de ordem ótimo a partir de uma decomposição de valores singulares (SVD) [10]. A técnica SVD tem a vantagem de não requerer o conhecimento prévio dos coeficientes do modelo autorregressivo para as várias ordens do modelo, e por isso, é geralmente mais eficiente do ponto de vista computacional comparativamente a outras técnicas que o requerem, como é o caso da AIC (critério de informação de Akaike), PAF (função de autocorrelação parcial) e RMS (raiz do erro quadrático médio). Detalhes adicionais acerca da formulação matemática dos modelos autorregressivos e da decomposição em valores singulares são descritos em Farrar e Worden [11].

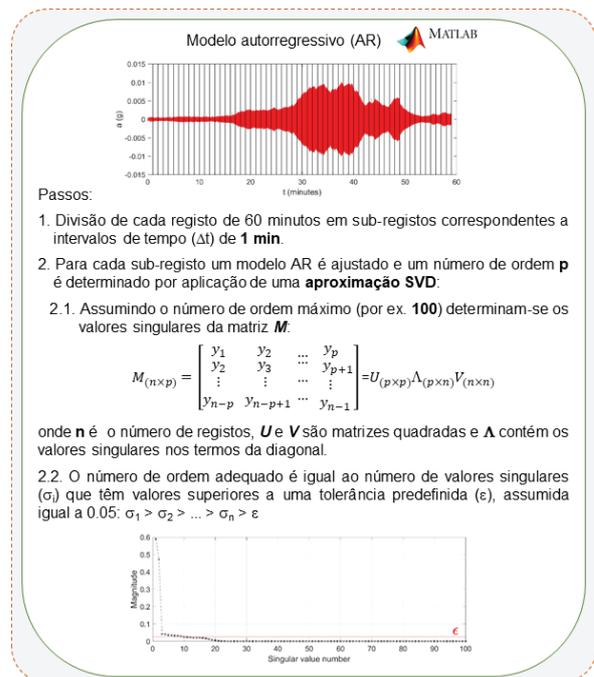


Figura 11 Metodologia de identificação automática de eventos extraordinários

A definição de limites para os números de ordem do modelo autorregressivo, especificamente para a classificação de eventos em correntes ou extraordinários, foi baseada numa avaliação preliminar do número de ordem ótimo de 23900 sub-registos, cada um com 1 min de duração, no período entre 15 e 31 de outubro de 2017, conforme apresentado na Figura 12.

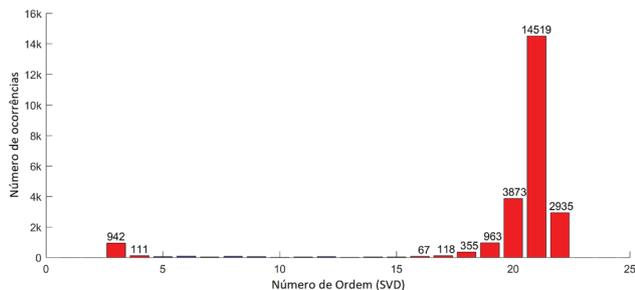


Figura 12 Número de ordem ótimo do modelo AR dos sub-registos de aceleração no período entre 15 e 31 de outubro de 2017

A observação do histograma permite identificar dois clusters principais, um relacionado com os eventos extraordinários, associado a números de ordem baixos, geralmente menores que 5, e outro relacionado a eventos correntes, associado a números de ordem mais altos, tipicamente entre 15 e 25.

5.2 Aplicação

Na Figura 13 apresenta-se o resultado da aplicação da metodologia de identificação de eventos extraordinários com base em dois eventos registados no período de análise e selecionados aleatoriamente (eventos E3 e E4). Na figura, apresenta-se, além dos registos temporais de acelerações, com a duração de 60 min, os histogramas que reúnem os valores dos números de ordem do modelo autorregressivo correspondentes a cada sub-registo, além da identificação do limite para o número de ordem 5.

No registo apresentado na Figura 13a foi identificado um evento extraordinário com a duração de 19 min e com uma amplitude máxima de vibração igual a 6,6 mg. No caso do registo apresentado na Figura 13b foram identificados três eventos extraordinários com as durações de 15 min, 18 min e 20 min, a que correspondem amplitudes máximas de vibração iguais a 7,4 mg, 8,7 mg e 11,2 mg respetivamente.

Nas Figs. 14 e 15 apresentam-se os resultados da identificação de eventos extraordinários com base nos registos de acelerações recolhidos durante um período de 6 meses, que decorreu de

1 de agosto de 2017 a 31 de janeiro de 2018. Na Figs. 14a e 14b ilustram-se os valores máximos das acelerações dos eventos extraordinários identificados, em mg, enquanto nas Figs. 15a e 15b as correspondentes durações temporais, em min. No caso de existir mais de um evento extraordinário no período de 1 hora a duração dos eventos refere-se à soma da duração de cada um dos eventos identificados.

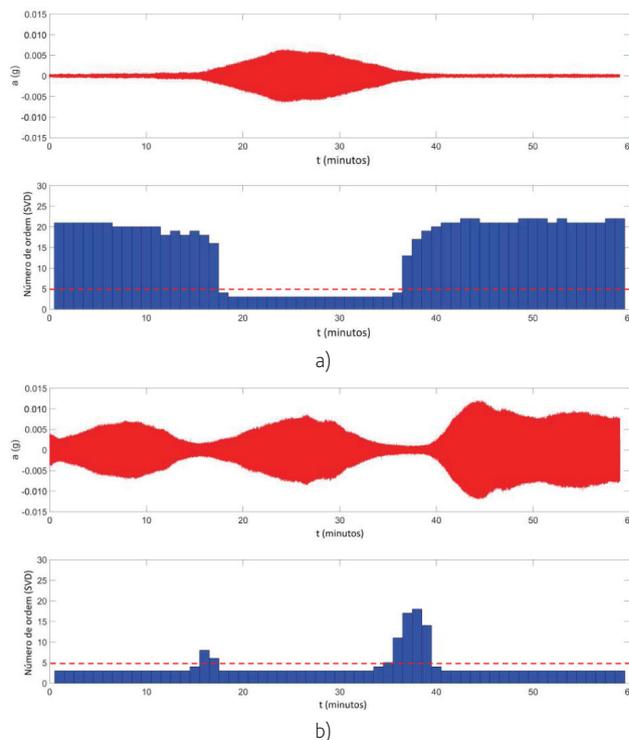
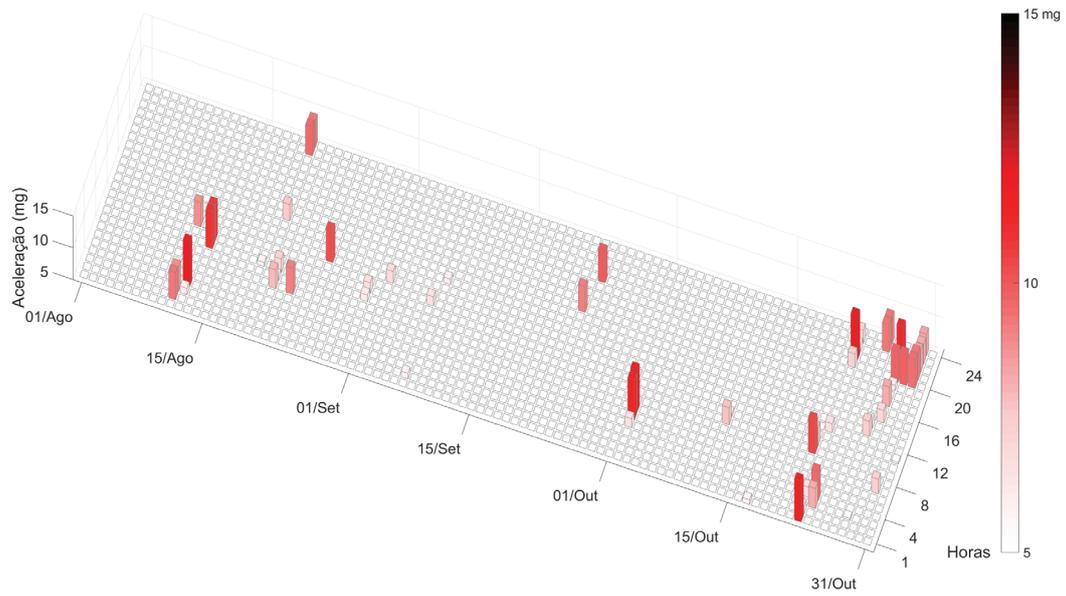
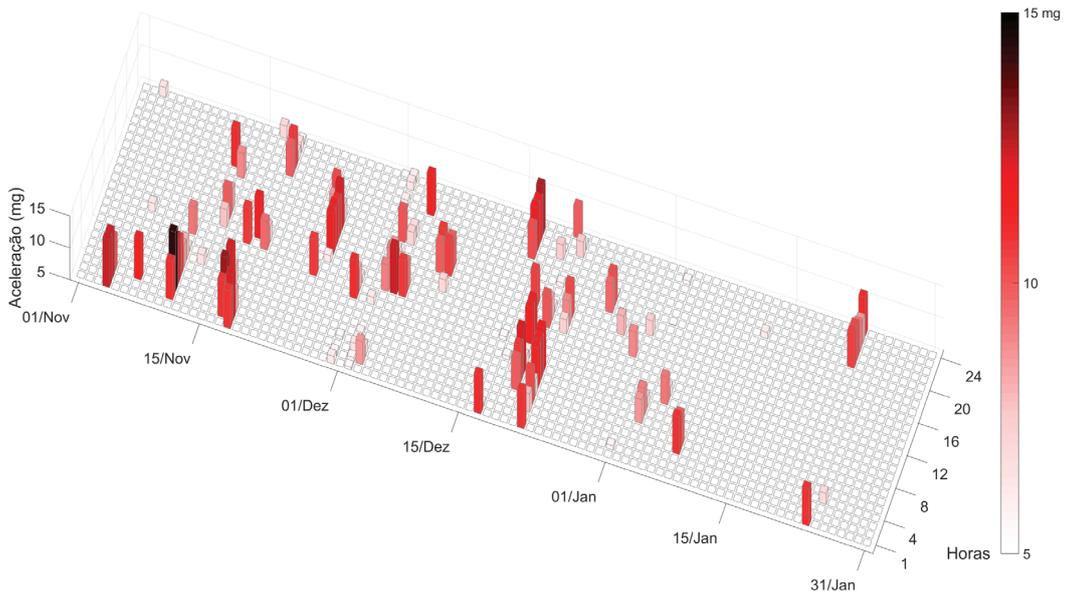


Figura 13 Aplicação da metodologia de identificação de eventos extraordinários: a) evento E3, b) evento E4

No período em análise foram identificados 258 eventos extraordinários sendo que aceleração máxima registada foi de 14,4 mg. A duração total dos eventos foi de 6359 min, aproximadamente 2,4 % do período de tempo das medições. Importa também notar que a maioria dos eventos extraordinários, cerca de 70%, decorreu em período noturno, entre as 20h00-07h00, enquanto que cerca de 30% decorreram em período diurno, entre as 08h00-20h00. A distribuição dos eventos extraordinários pelos meses analisados revelou que o mês onde foi registado o maior número de eventos foi dezembro, enquanto que o mês de setembro registou o menor número de eventos.

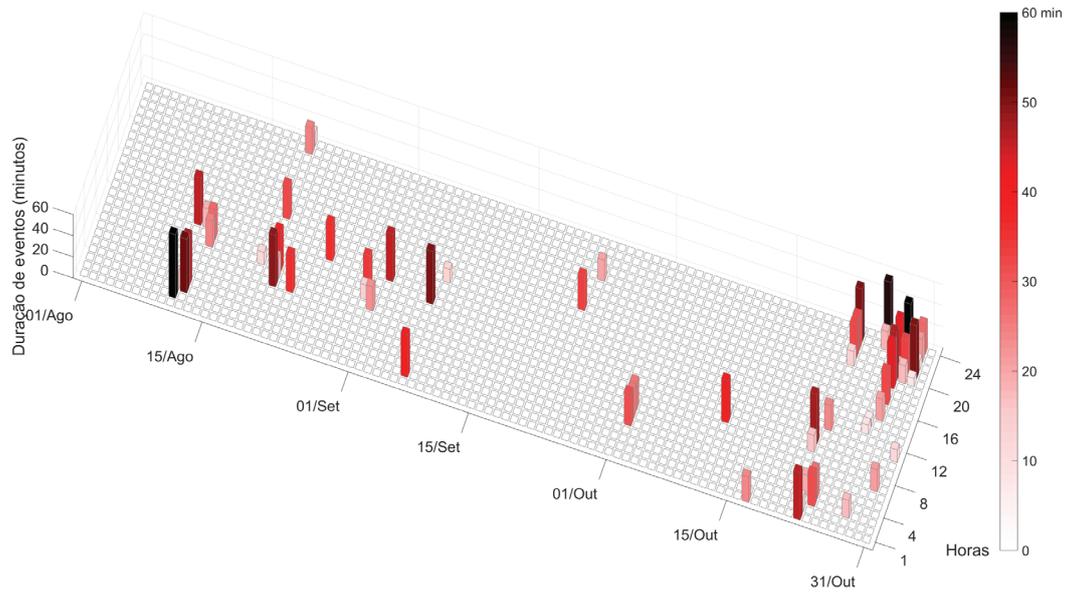


a)

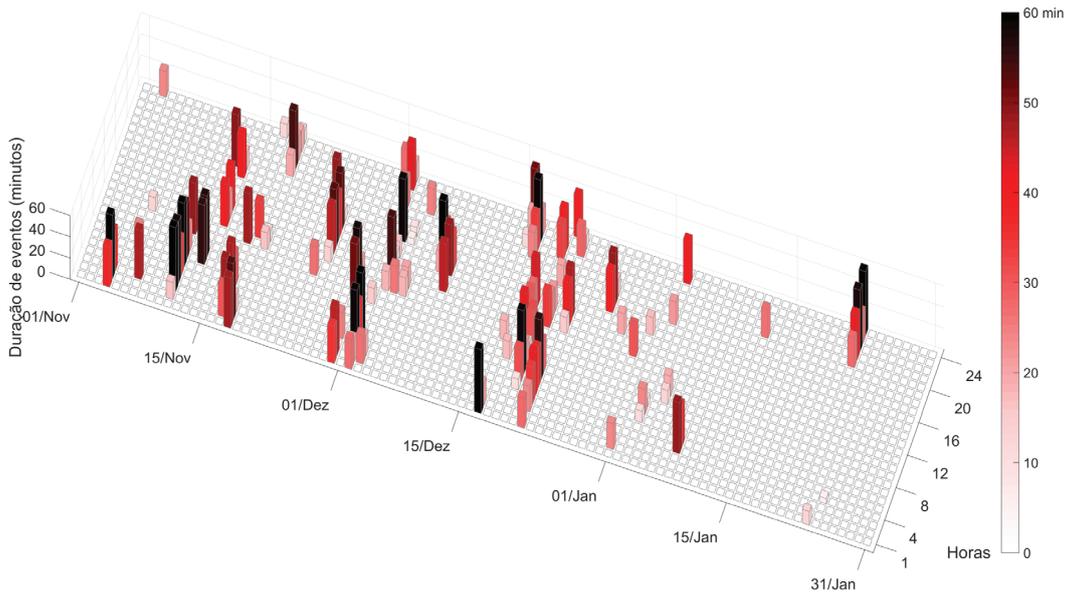


b)

Figura 14 Valores das acelerações máximas dos eventos extraordinários no intervalo 5-15 mg: a) período 1 agosto a 31 outubro 2017; b) período 1 novembro 2017 a 31 janeiro 2018



a)



b)

Figura 15 Duração dos eventos extraordinários no intervalo 0-60 min: a) período 1 agosto a 31 outubro 2017; b) período 1 novembro 2017 a 31 janeiro 2018

6 Conclusões

No presente artigo foi apresentada a avaliação dos efeitos dinâmicos da ação do vento na torre de telecomunicações do Monte da Virgem com base num sistema de monitorização contínua.

A campanha experimental da torre envolveu a realização de um ensaio de vibração ambiental, com vista à identificação das frequências naturais e modos de vibração, e a medição contínua das acelerações, e da velocidade e direção do vento, por meio de um sistema de monitorização contínua, instalado na torre durante um período de 6 meses.

O ensaio de vibração ambiental permitiu a identificação de 6 modos de vibração da estrutura, envolvendo sobretudo movimentos de flexão do fuste em betão e da torre metálica, com frequências compreendidas entre os 0,478 Hz e 7,324 Hz.

O sistema de monitorização contínua possibilitou a identificação de eventos extraordinários associados a fenómenos de amplificação da resposta dinâmica da estrutura com valores máximos da aceleração compreendidos entre 5 mg e 15 mg, e associados a um importante contributo do modo de vibração local associado aos movimentos da torre metálica, com repercussões nos movimentos do fuste de betão. Os eventos extraordinários ocorrem sobretudo para regimes de vento oriundos de Este, praticamente sem variação de direção, e para velocidades aproximadamente constantes ao longo do tempo e situadas no intervalo entre 20 km/h e 35 km/h. No entanto, a existência destas condições específicas de velocidade e direção do vento não é condição suficiente para a ocorrência de eventos extraordinários. Essa constatação é ainda uma questão em aberto e faz parte dos trabalhos de pesquisa em curso.

Os efeitos de ressonância observados parecem estar relacionados com fenómenos de instabilidade aeroelástica da torre metálica, nomeadamente devido ao desprendimento alternado de vórtices no cilindro do troço UHF. A análise da instabilidade aeroelástica foi realizada, de forma aproximada, com base no número de Strouhal, que para cilindros de secção circular toma o valor de 0,20, resultando uma velocidade crítica do vento igual a 23 km/h, e que poderá estender-se para velocidades superiores em virtude do fenómeno de lock-in. Este valor enquadra-se na gama de velocidades identificadas experimentalmente como estando associadas à ocorrência dos eventos extraordinários.

A metodologia desenvolvida para a identificação automática de eventos extraordinários baseou-se na aplicação aos registos de acelerações de um modelo autorregressivo (AR), e na estimativa do seu número de ordem ótimo a partir de uma decomposição de valores singulares (SVD). A metodologia demonstrou eficiência e robustez na quantificação do número de eventos, e da sua duração e máxima amplitude. Ao longo de um período de 6 meses foram identificados 258 eventos extraordinários, com a duração total de 6359 min, sendo a aceleração máxima registada igual a 14,4 mg. Os eventos extraordinários ocorreram tipicamente em período noturno e sobretudo nos meses de outubro, novembro e dezembro.

A informação recolhida e a metodologia desenvolvida neste estudo têm sido de especial importância para o dono da infraestrutura no âmbito da gestão otimizada das operações de inspeção e das intervenções de manutenção.

Como desenvolvimentos futuros ao presente trabalho importa ainda destacar o estudo da influência dos fenómenos de vibrações excessivas na estabilidade e segurança da estrutura, sobretudo ao nível do comportamento à fadiga dos elementos de ligação da torre metálica com o fuste, além do estudo de um sistema de controlo das vibrações.

Agradecimentos

Os autores manifestam o seu agradecimento à Altice, em particular ao Eng. Jorge Garcia, por todas as informações fornecidas acerca da torre de telecomunicações do Monte da Virgem e pelo apoio nas campanhas experimentais.

Referências

- [1] Beirrow, B.; Osterrieder, P. – "Dynamic investigations of TV towers", *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 1, 629–636, 2001.
- [2] Breuer, P.; Chmielewski, T.; Górski, P.; Konopka, E.; Tarczynski, L. – "The Stuttgart TV Tower — displacement of the top caused by the effects of sun and wind", *Engineering Structures*, 30, 2771–2781, 2008.
- [3] Chen, W. H.; Lua, Z. R.; Lin, W.; Chena, S. H.; Ni, Y. Q.; Xia, Y.; Liao, W. Y. – "Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower", *Engineering Structures*, 33, 3628–3646, 2011.
- [4] Guo, Y.; Kareem, A.; Ni, Y.; Liao, W. – "Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104–106, 116–128, 2012.
- [5] ENGIL – *Teledifusora de Portugal – torre do emissor do Porto*, Memória justificativa do dimensionamento e peças desenhadas, Lisboa, 1993.
- [6] Magalhães, F. – *Identificação modal estocástica para validação experimental de modelos numéricos*, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [7] SVS, *ARTEMIS Modal 2018 – Academic license*, Release 5.3.1.3. SVS: Aalborg, Denmark, 2018.
- [8] Ribeiro, D.; Leite, J.; Pinto, N.; Costa, B.; Calçada, R. – "Avaliação experimental dos efeitos dinâmicos da ação do vento em uma torre de telecomunicações de elevada altura," *CILAMCE 2017*, Florianópolis, Brasil, 2017.
- [9] Simiu, E. – "Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design", *J. Wiley & Sons*, ISBN 0-471-12157-6, 1996.
- [10] Figueiredo, E.; Figueiras, J.; Park, G.; Farrar, C.; Worden, K. – "Influence of the autoregressive model order on damage detection", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26, 225–238, 2011.
- [11] Farrar, C.; Worden, K. – "Structural Health Monitoring. A machine learning perspective", *Wiley*, 2013.

