

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

*EXPERIMENTAL EVALUATION OF WIND-INDUCED DYNAMIC EFFECTS IN
MONTE DA VIRGEM TELECOMMUNICATIONS TOWER*

RIBEIRO, Diogo

CONSTRUCT/ISEP-IPP, Porto, Portugal
drr@isep.ipp.pt

LEITE, Jorge

CONSTRUCT/ISEP-IPP, Porto, Portugal
jleite.eng@gmail.com

PINTO, Nuno

CONSTRUCT/FEUP, Porto, Portugal
npinto@fe.up.pt

CALÇADA, Rui

CONSTRUCT/FEUP, Porto, Portugal
ruiabc@fe.up.pt

RESUMO

Este artigo descreve a avaliação experimental dos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento numa torre de telecomunicações de elevada altura com base num sistema de monitorização permanente. A torre de telecomunicações do Monte da Virgem está localizada em VN Gaia, e a sua estrutura 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 3 meses. A análise dos resultados possibilitou a identificação de eventos específicos, denominados de eventos críticos, para os quais a resposta dinâmica da torre sob ações do vento surge amplificada. A identificação automática dos eventos críticos 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 críticos, visando a sua potencial integração em sistemas SHM.

Palavras-chave: torre de telecomunicações, sistema de monitorização, efeitos dinâmicos, vento, eventos críticos, modelo autorregressivo.

ABSTRACT

This article describes the experimental evaluation of the dynamic effects induced by wind on a high-rise telecommunications tower based on a permanent monitoring system. Monte da Virgem telecommunications tower is located in V.N. Gaia, and its structure 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 3 months. The analysis of the results enabled identifying specific events, denominated as critical events, for which the dynamic response of the tower under wind actions appears amplified. The automatic identification of the critical events was based on the application to the acceleration's records of an autoregressive model (AR) and estimation of its optimal model order 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 critical events, envisaging its potential integration in SHM systems.

Keywords: telecommunications tower, monitoring system, dynamic effects, wind, critical events, autoregressive model.

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 (Beirow e Osterrieder, 2001; Qiusheng et al., 2018). Neste tipo de estruturas, os indicadores de desempenho fornecidos pelos sistemas SHM têm sido utilizados em diferentes aplicações: i) na identificação de danos, possibilitando a otimização das operações de inspeção e manutenção, ii) 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 iii) na avaliação do desempenho estrutural sob cenários de ações extraordinárias.

Breuer et al. (2008) realizaram ensaios dinâmicos na torre de televisão de Estugarda, na Alemanha, que possibilitaram a medição dos deslocamentos no topo da torre causados pela ação do vento e pela influência combinada da radiação solar e da variação diária da temperatura do ar, durante diferentes estações do ano e condições climáticas. Os resultados dos ensaios demonstraram que os valores do deslocamento, assim como o valor frequência fundamental da torre (0,191 Hz), eram idênticos aos valores estimados experimentalmente 50 anos antes, revelando que a condição estrutural permanece inalterada.

Beirrow e Osterrieder (2001) 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, 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. (2011) e Guo et al. (2012) 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 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.

O presente artigo visa a caracterização da resposta dinâmica de uma torre de telecomunicações de elevada altura sob da ação do vento com base num sistema de monitorização permanente, complementado com um ensaio de vibração ambiental. O sistema de monitorização permanente inclui acelerómetros, anemómetros e uma estação meteorológica, permitindo a caracterização das acelerações máximas da estrutura e dos regimes de vento atuantes durante um período de 3 meses. O processamento automático dos dados experimentais possibilitou a identificação automática de eventos críticos, 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 permitiu de uma forma precisa e eficiente registar o número, a duração e as acelerações máximas dos eventos críticos ocorridos ao longo do período de medição, demonstrando potencialidades para a sua integração num sistema SHM.

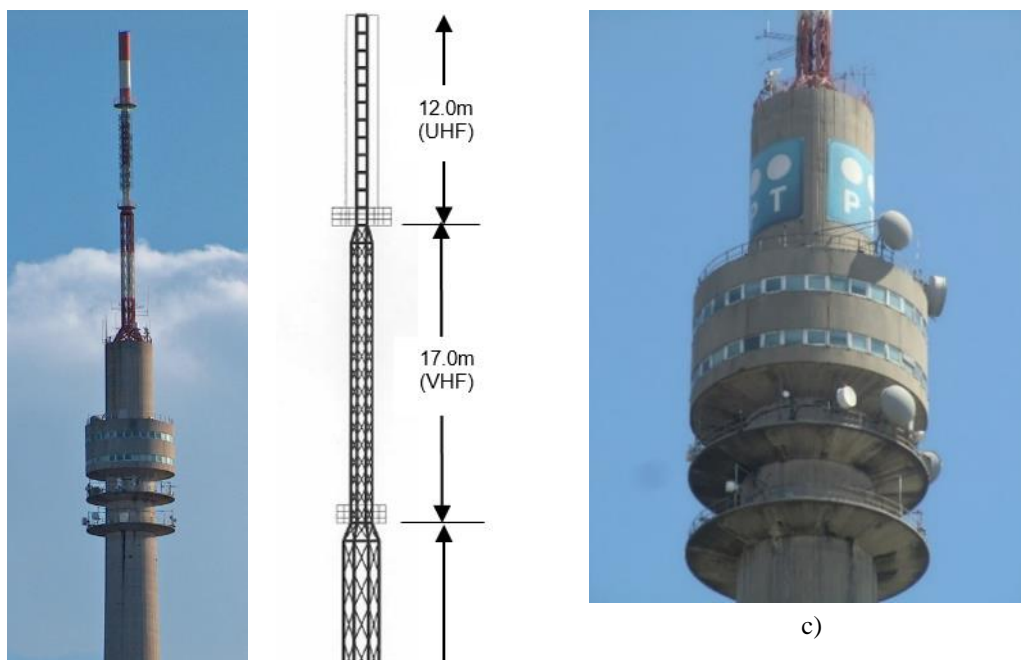
2. A TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM

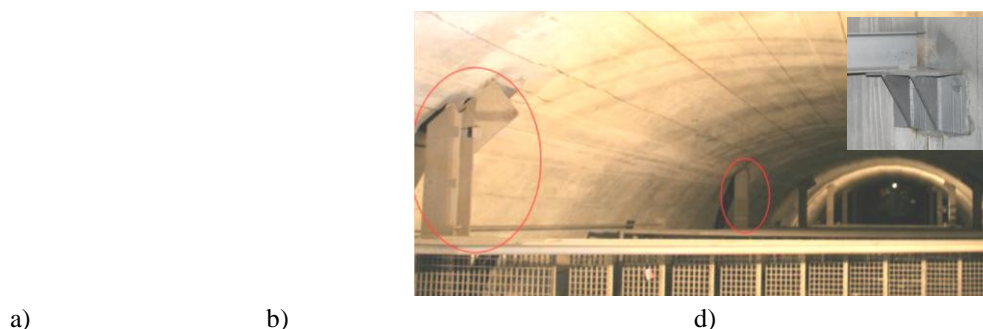
A torre de telecomunicações do Monte da Virgem é uma torre de transmissão construída pela Portugal Telecom/Altice no ano de 1995 e localizada em VN Gaia. A estrutura

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 (Fig. 1a).

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. O fuste é dotado de cinco pisos técnicos, formados por uma laje em consola em betão pré-esforçado (Fig. 1c). Os pisos estão localizados entre as cotas 94.9 m e 112 m em relação à base do fuste, sendo que dois deles são cobertos e com fachadas exteriores, e os restantes exteriores e com guarda corpos no seu contorno. 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 (Fig. 1d). A torre metálica é constituída por uma treliça espacial de barras metálicas e formada por três troços ao longo da sua altura que dão suporte aos sistemas de transmissão FM, VHF e UHF (Fig. 1b). O acesso à torre é realizado por meio de uma escada interior e complementadas por meio de duas plataformas intermédias munidas de guarda. 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.

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





3. ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

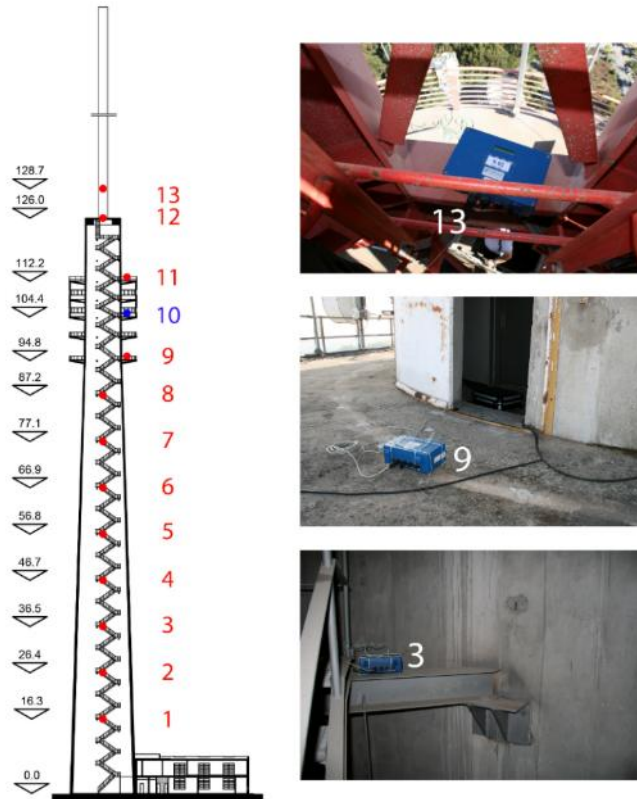
O ensaio de vibração ambiental teve como objetivo a identificação das propriedades modais da torre, em particular as frequências naturais e os modos de vibração.

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 e sistema de sincronização por GPS.

As acelerações foram medidas segundo duas direções radiais e ortogonais entre si, tendo sido instrumentados 13 pontos de medição: doze localizados no fuste de betão e um situado na torre metálica. O 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 Fig. 2 são apresentados os detalhes do posicionamento dos sismógrafos nos pontos de medição 3, 9 e 13.

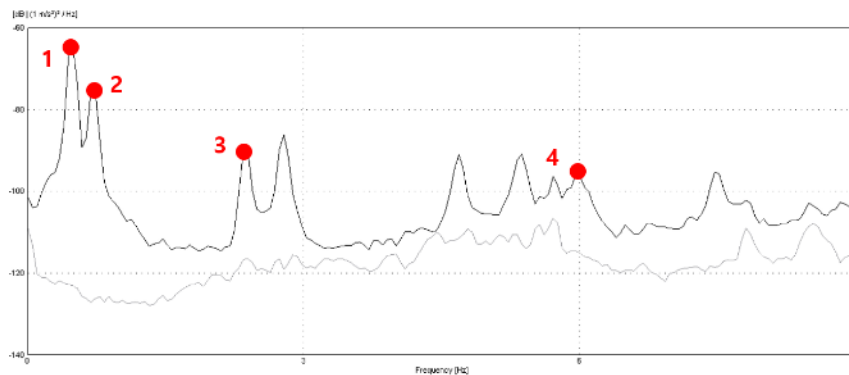
Figura 2: Ensaio de vibração ambiental: posicionamento dos sismógrafos e detalhes das posições 3, 9 e 13

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS INDUZIDOS PELO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM
Diogo Ribeiro



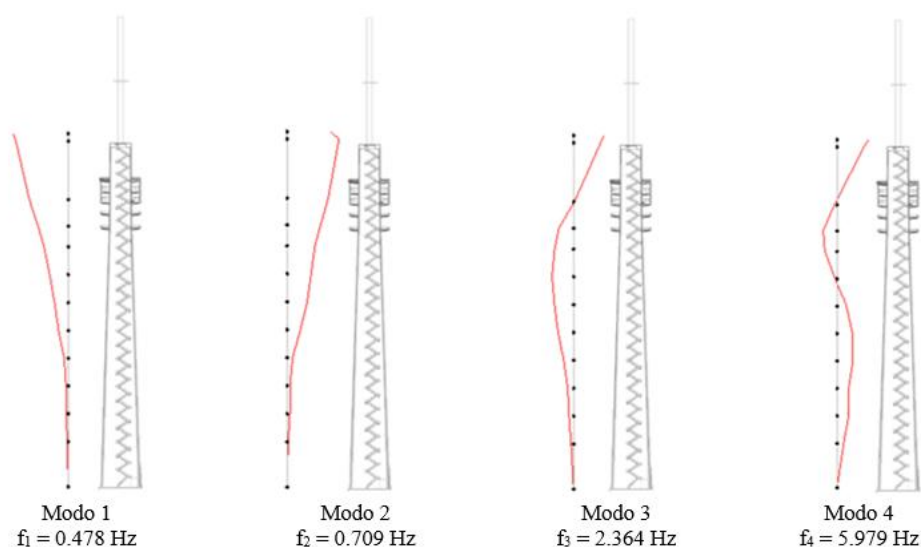
A identificação dos parâmetros modais foi realizada por aplicação da versão melhorada do método da decomposição no domínio da frequência (EFDD), com recurso ao programa comercial ARTeMIS (SVS, 2018). Na Fig. 3 apresentam-se as curvas dos valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros de todas as configurações experimentais, obtidas por aplicação do método EFDD, e considerando os registos de acelerações obtidos em uma das direções. Foram identificados 4 modos de vibração associados à torre em correspondência com os 4 picos assinalados nas curvas do primeiro valor singular.

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



Na Fig. 4 são ilustrados os valores médios das frequências e as correspondentes configurações modais da torre obtidos com base na curva de valores singulares. A análise das configurações permite identificar movimentos associados à flexão da estrutura com muito boa definição. 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 que por compatibilidade estrutural induz movimentos no fuste. Os modos 2 e 3 são envolvidos sobretudo movimentos de flexão do fuste de betão.

Figura 4: Parâmetros modais experimentais



4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PERMANENTE

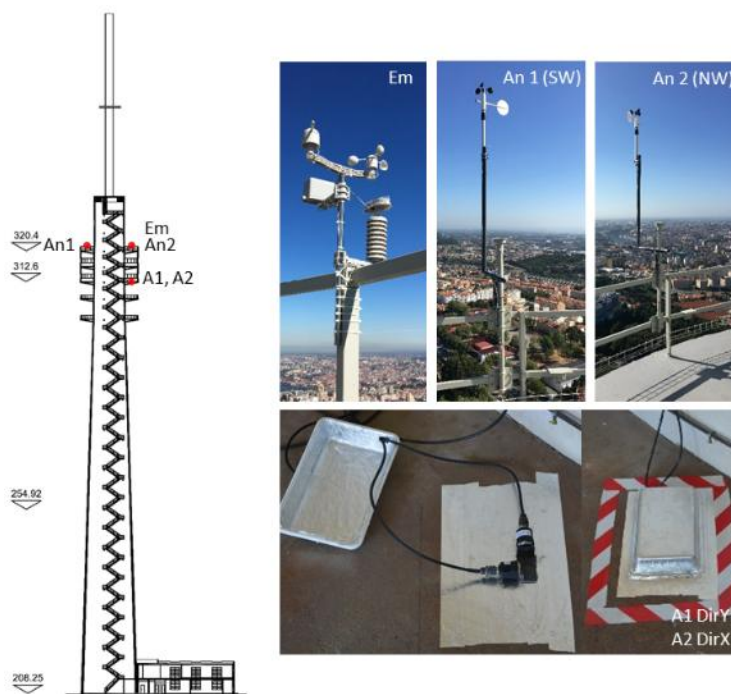
4.1. DESCRIÇÃO

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

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 (Fig. 5). Os acelerómetros foram posicionados à cota 312.6 (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 320.4 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.

Figura 5: Sistema de monitorização permanente: posicionamento dos sensores



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 via wireless a um recetor local, que por sua vez envia a informação para o computador via protocolo USB.

4.2. RESULTADOS

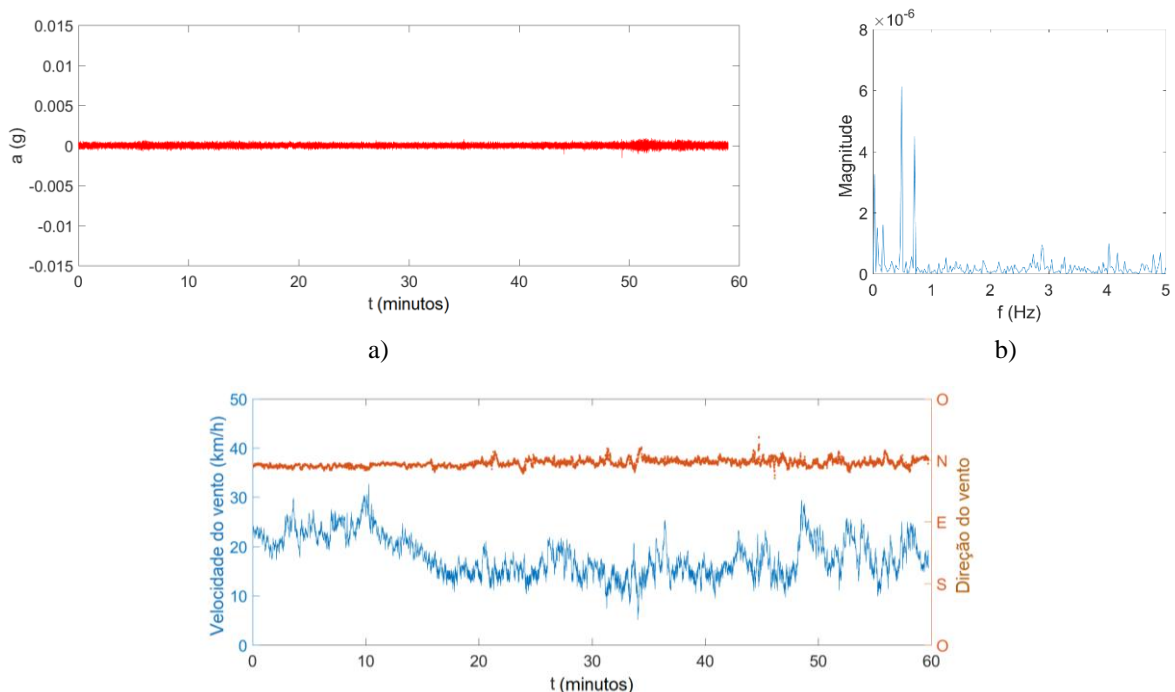
Com base na análise dos registos em acelerações medidos na estrutura durante um período de 3 meses, de 1 de setembro a 30 de novembro de 2017, foram identificados dois tipos de eventos, designados de eventos não-críticos e de eventos críticos.

Os eventos não críticos 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. Os eventos críticos estão relacionados com ocorrências de

menor frequência, associadas a importantes amplificações da resposta dinâmica, e onde os picos máximos das acelerações variam entre 5.0 mg a 15.0 mg.

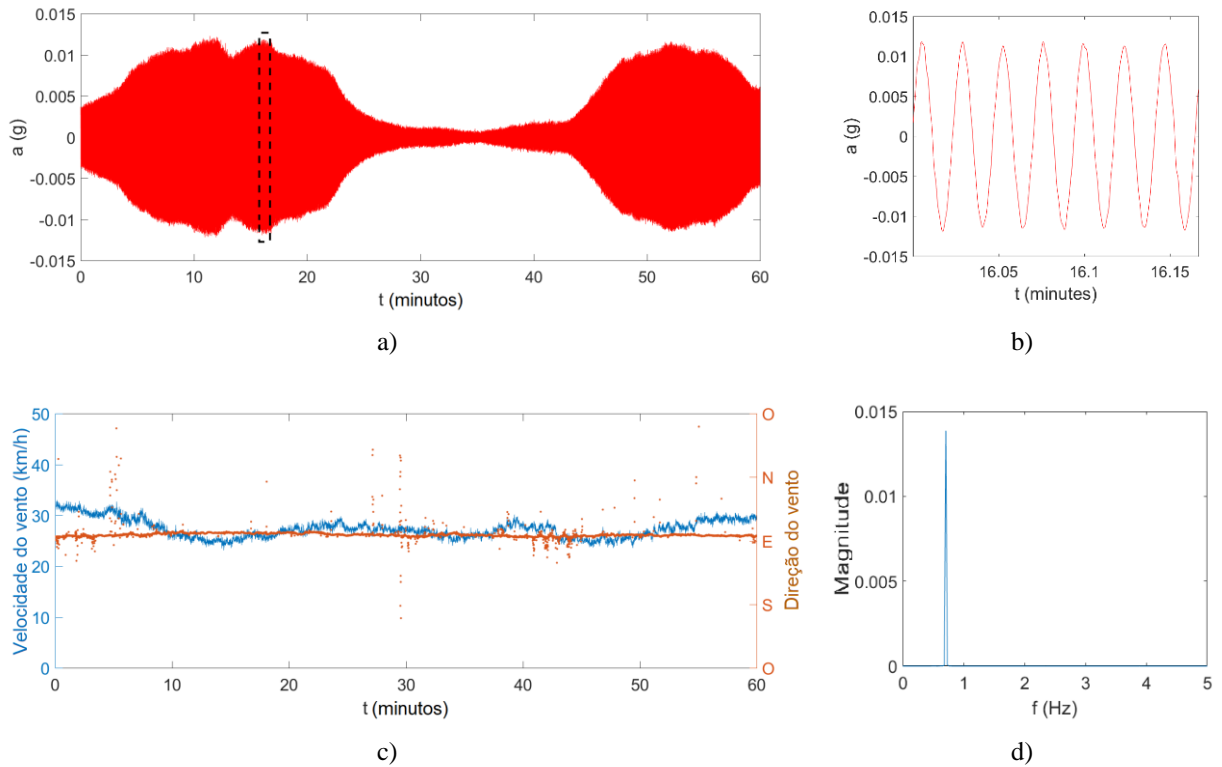
A título exemplificativo, são apresentados nas Figs. 6 e 7 os registos de acelerações típicos de um evento não crítico (NC1) e de um evento crítico (C1), respetivamente, incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados, e os registos da direção e velocidade do vento. No caso do evento crítico é ainda apresentado um detalhe do registo de acelerações para um intervalo de tempo de 10 s. O evento NC1 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 compreende uma gama de frequências alargada, 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 crítico C1 retrata está 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 que por compatibilidade estrutural gera movimentos do fuste.

Figura 6: Evento não-crítico NC1: a) registo de acelerações, b) auto espectro médio e normalizado das acelerações, e c) registo da velocidade e direção do vento



c)

Figura 7: Evento crítico C1: a) registo de acelerações, b) detalhe do registo de acelerações durante 10s, c) auto espectro médio e normalizado das acelerações, e d) registo da velocidade e direção do vento

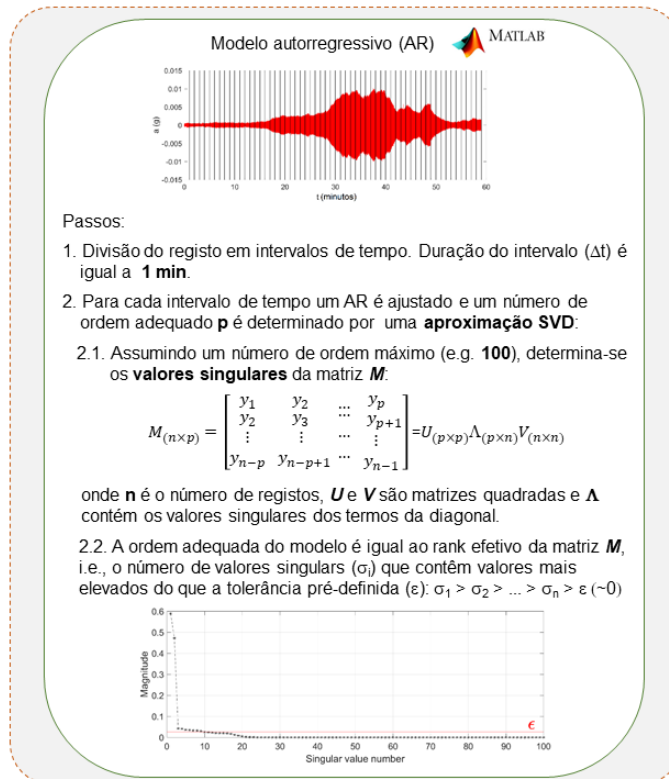


4.3. IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE EVENTOS CRÍTICOS

A metodologia de identificação automática de eventos críticos tem como objetivo a quantificação do número de eventos, e da correspondente duração, além do valor máximo das acelerações. Na Fig. 8, ilustra-se, esquematicamente, os passos de aplicação da metodologia desenvolvida para a identificação automática de eventos críticos. 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) (Figueiredo et al., 2011).

Figura 8: Metodologia de identificação automática de eventos críticos

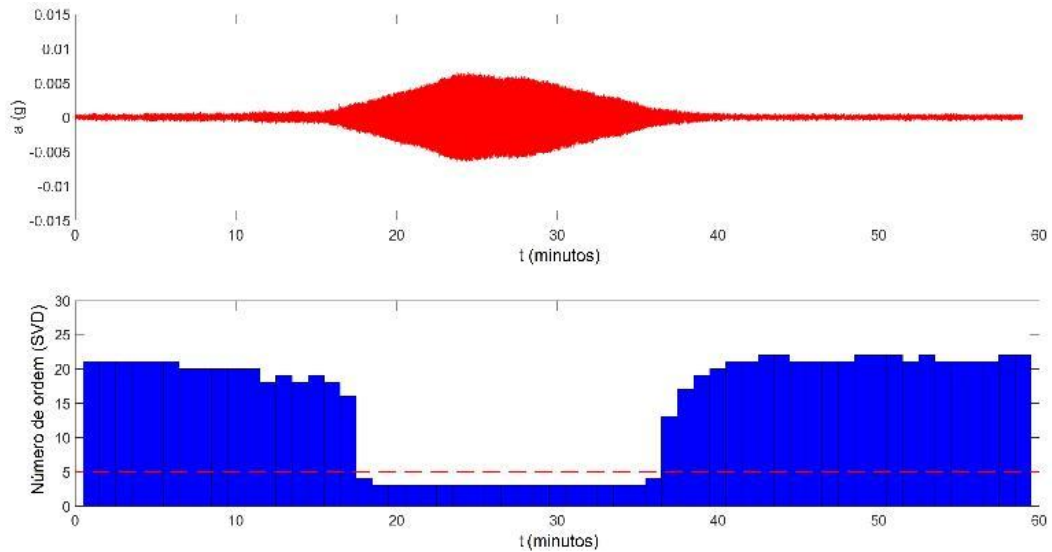
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS INDUZIDOS PELO VENTO NA TORRE DE
TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM
Diogo Ribeiro



Na Fig. 9 apresenta-se o resultado da aplicação da metodologia de identificação de eventos críticos com base num evento registado no período de análise e selecionado aleatoriamente. Na figura, apresenta-se, além do registo de acelerações, com a duração de 60 min, o histograma que reúne os valores dos números de ordem do modelo autorregressivo correspondentes a cada sub-registo, além da identificação do threshold definido para o número de ordem 5. No registo apresentado foi identificado um evento crítico com a duração de 19 min e com uma amplitude máxima de vibração igual a 6.6 mg.

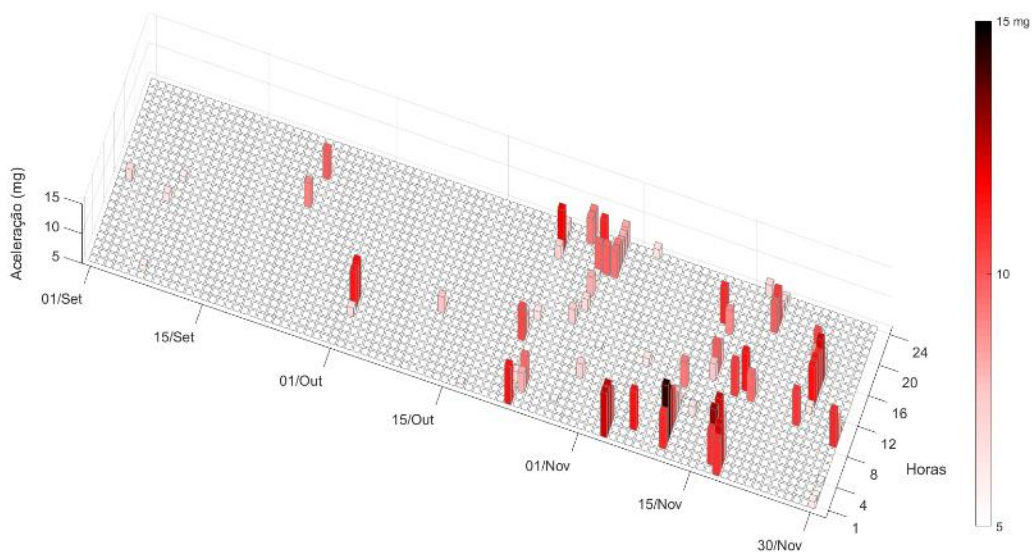
Figura 9: Aplicação da metodologia de identificação de eventos críticos

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS INDUZIDOS PELO VENTO NA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DO MONTE DA VIRGEM
Diogo Ribeiro



Na Fig. 10 ilustram-se os valores máximos das acelerações dos eventos críticos identificados no período de medição. No total foram identificados 114 eventos críticos sendo a aceleração máxima registada igual a 14.4 mg. A duração total dos eventos foi de 3004 minutos, aproximadamente 2.3% do período de medições. Importa também notar que a maioria dos eventos críticos, cerca de 75%, decorreu em período noturno, entre as 20h00-07h00, enquanto que cerca de 25% decorreram em período diurno, entre as 08h00-20h00. A distribuição dos eventos críticos pelos meses analisados revelou que o mês onde foi registado o maior número de eventos foi novembro, enquanto que o mês de setembro registou o menor número de eventos.

Figura 10: Valores das acelerações máximas dos eventos críticos no período 1 setembro a 30 novembro 2017



5. 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 permanente.

A campanha experimental da torre envolveu a realização de um ensaio de vibração ambiental, com vista à estimativa 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 permanente, instalado na torre durante um período de 3 meses.

O ensaio de vibração ambiental permitiu a identificação de 4 modos de vibração operacionais da estrutura, envolvendo sobretudo movimentos de flexão do fuste em betão e da torre metálica, com frequências compreendidas entre os 0.478 Hz e 5.979 Hz.

O sistema de monitorização permanente possibilitou a identificação de eventos críticos associados a fenómenos de amplificação da resposta dinâmica da estrutura, com valores máximos da aceleração compreendidos entre 5 mg e 15 mg, e tipicamente associados a um importante contributo do modo de vibração local associado aos movimentos da torre metálica, que por compatibilidade estrutural induz movimentos no fuste de betão. Os eventos críticos 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 entre 20 km/h e 35 km/h. A metodologia desenvolvida para a identificação automática de eventos críticos demonstrou eficiência e robustez na quantificação do número de eventos, e da sua duração e máxima amplitude. Ao longo de um período de 3 meses foram identificados 114 eventos críticos, com a duração total de 3004 min, sendo a aceleração máxima registada igual a 14.4 mg. Os eventos críticos ocorreram tipicamente em período noturno e sobretudo no mês de novembro.

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, além de poder servir de base para o estudo de um eventual sistema de atenuação de vibrações.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento à Altice, em particular ao Engenheiro

Jorge Garcia, por todas as informações fornecidas acerca da torre de telecomunicações do Monte da Virgem e por todo o apoio e facilidades concedidas nas campanhas experimentais.

REFERÊNCIAS

BEIROW, B., OSTERRIEDER, P., **Dynamic investigations of TV towers**, Structural Engineering, Mechanics and Computation, 1, 629–636, (2001).

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).

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).

FIGUEIREDO, E., PARK, G., FIGUEIRAS, J., FARRAR, C., WORDEN, K., **Structural health monitoring algorithm comparisons using standard data sets**, Report No. LA-14393, Los Alamos National Laboratory, USA, (2009).

GUO, Y., KAREEM, A., NI, Y., LIAU, 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).

QIUSHENG, L., YINGHOU, H., KANG, Z., XULIANG, H., YUNCHENG, H., ZHENRU, S., **Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper**, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 27 (12), (2018).

SVS, **ARTEMIS Modal 2018** – Academic license, Release 5.3.1.3. SVS: Aalborg, Denmark, (2018).