



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DINÂMICOS DA AÇÃO DO VENTO EM TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES DE ELEVADA ALTURA

Jorge Leite¹

Diogo Ribeiro^{1,2}

Nuno Pinto²

Bruno Costa²

Rui Calçada²

¹ Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto

² CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo. O presente artigo descreve a avaliação experimental dos efeitos dinâmicos da ação do vento em uma torre de telecomunicações de elevada altura. Para o efeito foi realizado um ensaio de vibração ambiental e instalado um sistema de monitorização permanente na estrutura. O ensaio de vibração ambiental possibilitou estimar as principais frequências naturais de vibração da torre e as respetivas configurações modais. O sistema de monitorização permanente inclui acelerómetros, anemómetros e uma estação meteorológica, possibilitando, nesta fase inicial da investigação, a caracterização das acelerações máximas da estrutura e dos regimes de vento ao longo de um período de 3 semanas. O posicionamento ótimo dos sensores foi realizado com base em análises numéricas assentes na mecânica computacional de fluidos (CFD), no caso dos anemómetros, e numa análise modal, no caso dos acelerómetros. O processamento automático dos dados experimentais foi realizado através de uma rotina desenvolvida em Matlab e envolveu a aplicação de uma análise de componentes principais (PCA) de modo a remover dos registos de acelerações a influência de alguns fatores operacionais, nomeadamente os associados aos movimentos do elevador, do pessoal técnico e de equipamentos em funcionamento. A análise dos resultados possibilitou identificar eventos pontuais para os quais a resposta dinâmica da torre sob ação do vento surge amplificada, além de se ter demonstrado a eficiência e robustez da análise PCA na estimativa dos valores máximos da aceleração da torre.

Palavras-chave: torre de telecomunicações, ensaio de vibração ambiental, parâmetros modais, sistema de monitorização permanente, PCA, desempenho estrutural.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas de monitorização estrutural em torres de telecomunicações, tem possibilitado, nos últimos anos, uma considerável melhoria das suas condições de segurança e operacionalidade. Estes sistemas são geralmente capazes de produzir avisos e alarmes, na eventualidade de ocorrência de danos ou deterioração, permitindo desta forma auxiliar as operações de manutenção ou mesmo evitar situações de colapso.

No âmbito do estudo experimental da torre de Cottbus (Alemanha), Beirow e Osterrieder (2001) identificaram uma correlação entre os regimes de ventos atuantes e a resposta vibratória da estrutura. Os autores concluíram que as maiores oscilações foram registadas para regimes de vento que atuaram na direção da oscilação, e que os menores níveis de desempenho no que toca ao conforto foram devidos a fenómenos de libertação de vórtices na antena aérea localizada sobre a torre. Breuer et al. (2008) realizaram a monitorização da torre de Estugarda (Alemanha) tendo concluído que a parcela quase-estática dos deslocamentos da torre era sobretudo devida ao efeito combinado da radiação solar e da variação diária da temperatura do ar, enquanto a parcela dinâmica dos deslocamentos era devida à ação do vento. Chena et al. (2011) conduziram medições de vibração ambiental contínuas na torre de Guangzhou (China) durante as fases de construção e de serviço. O estudo possibilitou a identificação dos modos de vibração que mais contribuem para as respostas dinâmicas sob condições de atuação de um tufão (0,2-0,6 Hz) e sismo (0,8-1,0 Hz), além de ter permitido a deteção de uma dependência linear das frequências naturais com a temperatura do ar.

No âmbito deste trabalho serão descritos os trabalhos experimentais realizados na torre de telecomunicações do Monte da Virgem (Portugal) tendo em vista a caracterização do seu comportamento dinâmico sob ação do vento. Especial destaque será dado à conceção e implementação de um sistema de monitorização permanente e que envolveu a instalação de um conjunto alargado de sensores na estrutura, nomeadamente, acelerómetros, anemómetros e uma estação meteorológica. Os resultados das medições efetuadas durante um período de 3 semanas, permitiram, nesta fase inicial da investigação, identificar um conjunto de eventos críticos associados a vibrações mais elevadas da torre. Para o efeito foi desenvolvida e testada uma metodologia automática de pós-processamento da informação experimental, assente, sobretudo, em uma análise de componentes principais, e permite remover dos registos de acelerações a influência de fatores operacionais da estrutura.

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 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 2a).

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 diâmetro da parede é também variável entre 0.40 m, junto à base, e 0.30 m no topo. O fuste é dotado de cinco pisos técnicos, formados por uma laje em consola em betão pré-esforçado (Figura 2c). 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 da série HEA, distribuídos intercaladamente ao longo da altura do fuste, e por sua vez ligados a consolas metálicas fixadas na parede (Figura 2d).



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. 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. O acesso 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. O alçado esquemático da torre metálica é apresentado na Figura 2b.

3 O ENSAIO DE VIBRAÇÃO AMBIENTAL

O ensaio de vibração ambiental teve como objetivo a identificação das propriedades modais da torre de telecomunicações, 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*. Os sismógrafos possuem uma gama de medição de ± 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 (X e Y), tendo sido instrumentados 13 pontos de medição: doze localizados no fuste de betão e um situado na torre metálica, conforme esquematizado na Figura 2.

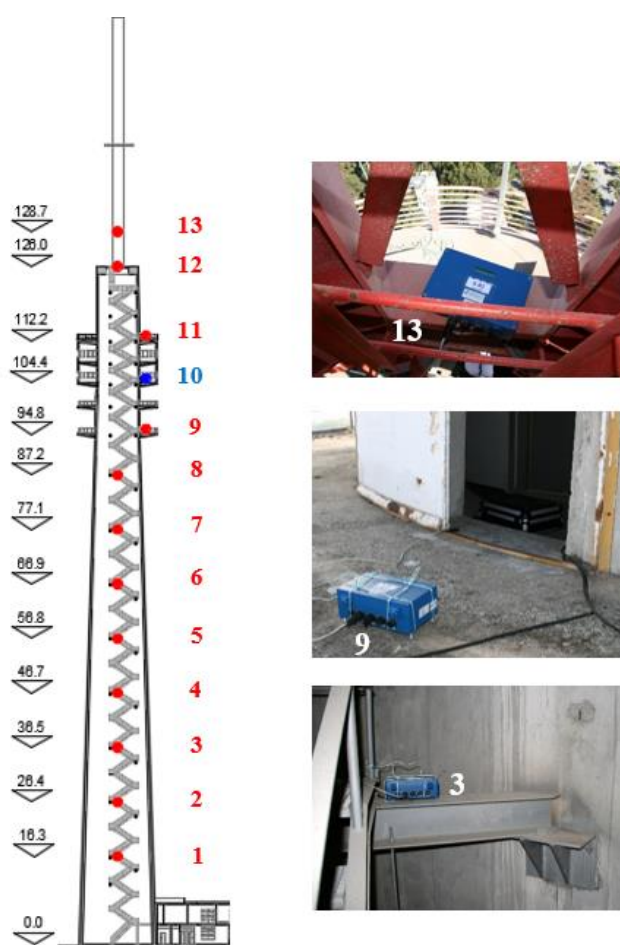


Figura 2. Ensaio de vibração ambiental: posicionamento dos sismógrafos e detalhes das posições 3, 9 e 13

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 1-8), 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), com recurso ao programa comercial ARTEMIS (SVS, 2011).

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 na direção X. Foram identificados 4 modos de vibração associados à torre em correspondência com os 4 picos assinalados nas curvas do primeiro valor singular.

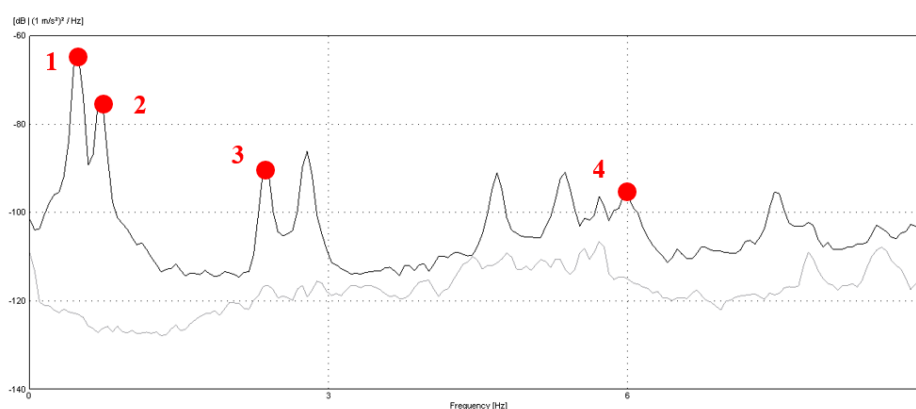


Figura 3. Método EFDD: valores singulares médios e normalizados da matriz dos espectros na direção X

Na Figura 4 são ilustrados os valores médios das frequências e as correspondentes configurações dos modos de vibração da torre de telecomunicações obtidos com base na curva de valores singulares da direção X. 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, que por compatibilidade estrutural conduz a movimentos na torre, enquanto o modo 2 é um modo de flexão local da torre metálica. Os modos 2 e 3 são envolvidos sobretudo movimentos de flexão do fuste de betão.

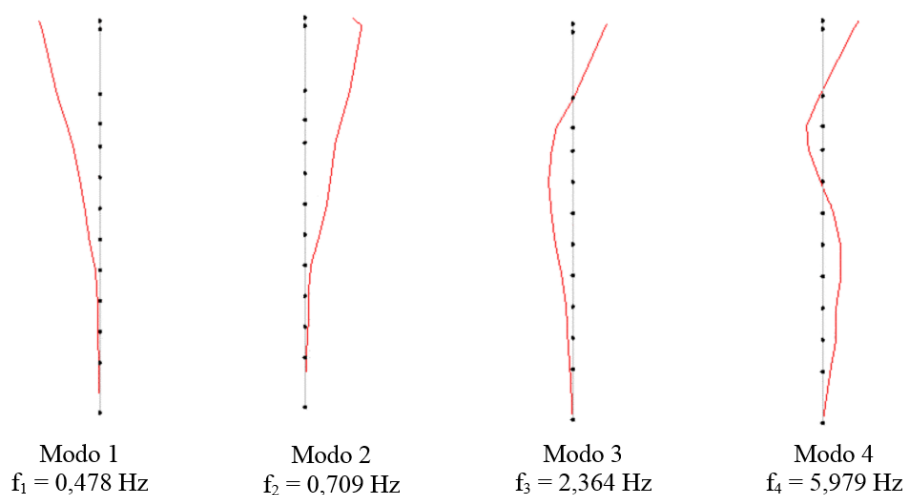


Figura 4. Parâmetros modais obtidos por via experimental

4 O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO PERMANENTE

4.1 Descrição

O sistema de monitorização instalado na torre do Monte da Virgem tem como objetivo a caracterização dos efeitos dinâmicos da ação do vento sobre a estrutura.

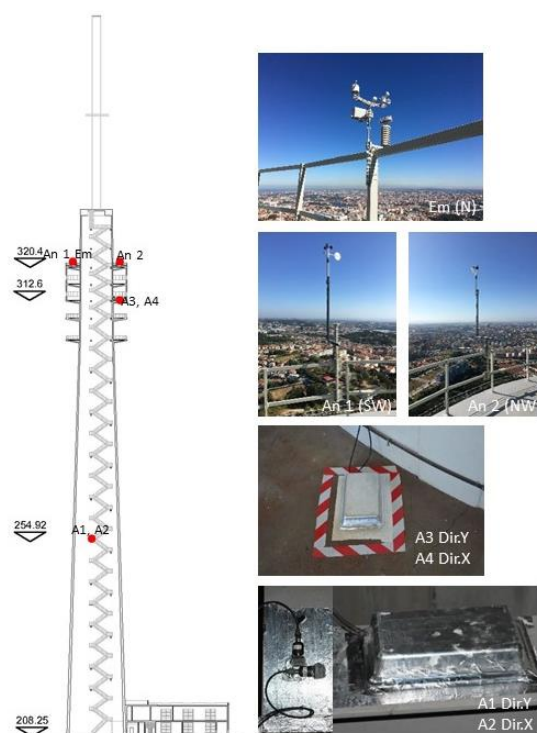


Figura 5. Sistema de monitorização permanente: posicionamento dos sensores

Para o efeito, foram instalados na torre 4 acelerómetros piezoelétricos, marca PCB modelo 393B12, 2 anemómetros, marca VAISALA modelo WM302, e uma estação

meteorológica PCE-FWS-20. Os acelerómetros foram posicionados à cota 254.9 m (acelerómetros A1 e A2), fixos diretamente ao pavimento, e à cota 312.6 m (acelerómetros A3 e A4), fixos a uma viga metálica de travamento, conforme os detalhes da Figura 5. Os anemómetros (An1 e An2) e a estação meteorológica (E_m) foram instalados no piso exterior à cota 320.4 m e em posições distintas, nomeadamente sudoeste (SW), noroeste (NW) e norte (N), e fixos ao guarda corpos por intermédio de abraçadeiras metálicas (Figura 5).

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. Na Figura 6 pode observar-se o esquema geral do sistema de monitorização permanente.

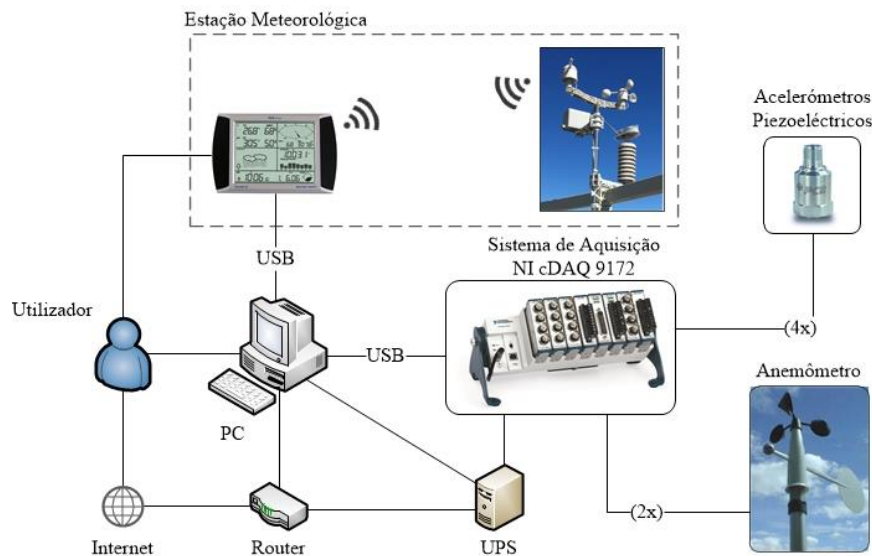


Figura 6. Esquema geral do sistema de monitorização permanente

4.2 Posicionamento ótimo dos sensores

O posicionamento ótimo dos acelerómetros e dos anemómetros foi realizado com o apoio de um modelo numérico calibrado da torre (Ribeiro et al., 2016) e baseou-se nos resultados de uma análise modal, no caso dos acelerómetros, e na dinâmica computacional de fluidos (CFD), no caso dos anemómetros.

No caso dos acelerómetros os pontos escolhidos correspondem a localizações onde o somatório, em módulo, dos deslocamentos associados a três das configurações modais da torre apresenta o valor máximo, assegurando a não inclusão de pontos com deslocamentos modais nulos (Figura 7a).

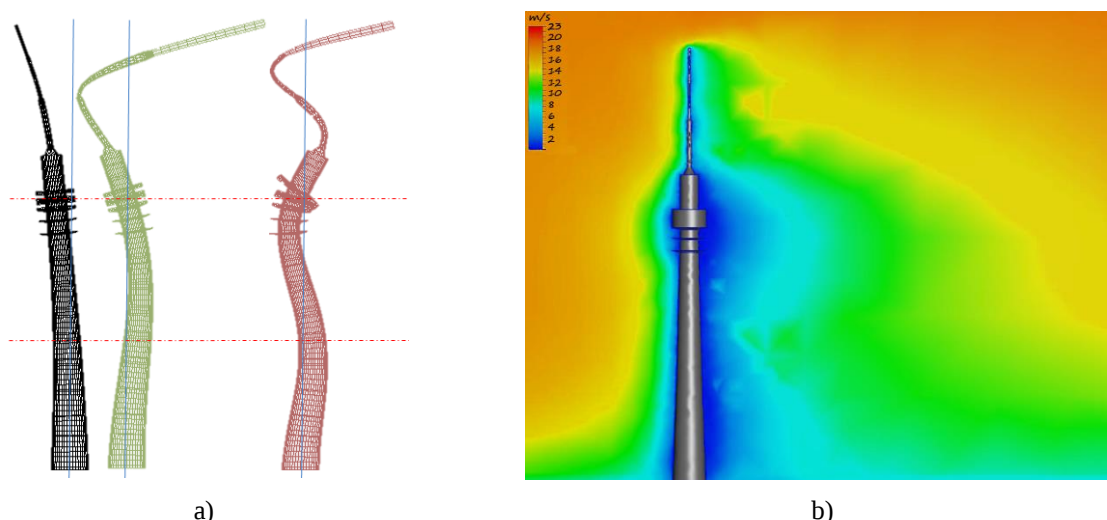


Figura 7. Posicionamento ótimo dos sensores com base em modelo numérico calibrado da torre: a) análise modal; b) análise CFD

Por sua vez, a localização dos anemômetros foi definida de modo a garantir que os efeitos turbulentos da ação do vento fossem minimizados, por forma a garantir a caracterização da velocidade e direção do vento em verdadeira grandeza. Para o efeito foi simulado o fluxo de ar gerado pela ação do vento na sua direção preponderante, neste caso de Norte para Sul, com base no programa Autodesk CFD (Autodesk CFD, 2017). A análise foi realizada para uma velocidade do vento igual a 60 km/h e considerando o modelo da torre inserido num volume com dimensões (largura $\times$ profundidade $\times$ altura) iguais a $500 \times 500 \times 280$ m. Na Figura 7b ilustra-se o campo de velocidades gerado pelo fluxo de ar em torno da estrutura.

5 RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO CONTÍNUA

5.1 Metodologia

Na Figura 8 apresenta-se um fluxograma que ilustra a metodologia proposta para o pós-processamento da informação experimental, em particular dos registos dos acelerómetros. Esta metodologia inclui um conjunto de ferramentas avançadas de processamento de sinal que permitem a remoção da influência de alguns fatores operacionais, nomeadamente os associados aos movimentos do elevador, do pessoal técnico de manutenção e de equipamentos em funcionamento.

Numa primeira fase, aos registos de acelerações medidos é aplicado um filtro digital do tipo passa-baixo, tipo Butterworth e com frequência de corte igual a 10 Hz, além da remoção de eventuais tendências lineares.

Seguidamente, é realizada uma análise de componentes principais (PCA) através da qual são extraídos os componentes principais de cada registo de acelerações (Ballabio, 2015). Alguns dos componentes principais são depois removidos do registo de modo a serem retirados os contributos espúrios associados aos fatores operacionais. Geralmente os componentes principais associados aos fatores operacionais são os de ordem inferior e estão associados a parcelas do registo tipicamente de maior amplitude e duração limitada. Por sua

vez, os componentes principais relacionados com a resposta dinâmica sob ação do vento são de ordem superior e estão associados a parcelas do registo de menor amplitude e maior duração. O número de componentes principais de ordem superior a serem incluídos foi determinado por aplicação do indicador de correlação KP (Ballabio, 2015).

Após a determinação do número de componentes principais a considerar é aplicada uma análise de componentes principais na sua forma inversa sendo obtidos os registos de aceleração reconstruídos (Alves, 2016).

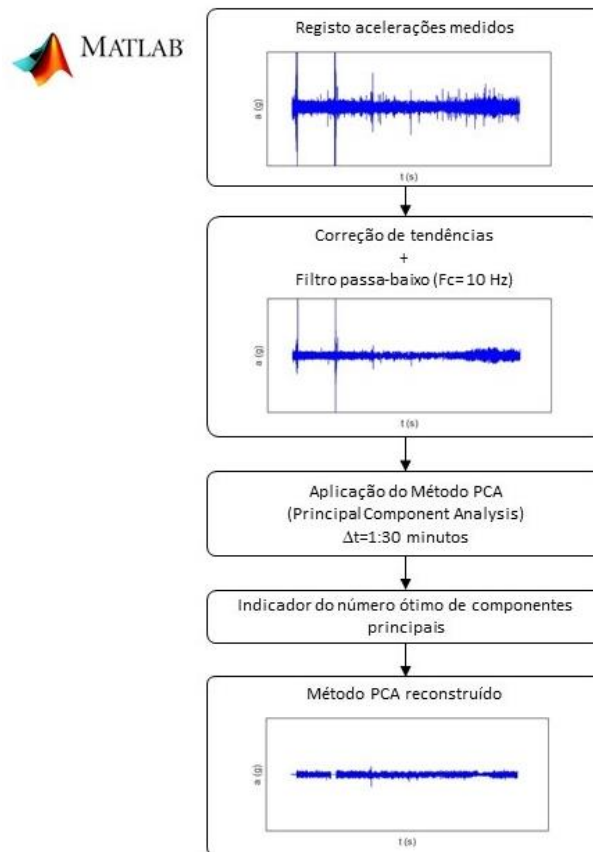


Figura 8. Metodologia de pós-processamento dos registos experimentais de acelerações

5.2 Análise de resultados

Na Figura 9 apresentam-se os valores máximos das acelerações registados nos acelerómetros A1 a A4, durante um período de tempo de 3 semanas, antes (curva azul) e após (curva vermelha) a aplicação da análise de componentes principais. Os valores máximos reportam-se a intervalos de tempo de 1 h.

A observação da figura permite constatar que a aplicação da análise PCA permitiu uma correção eficiente da envolvente máxima das acelerações, sobretudo através da redução de inúmeros valores de pico, e deste modo facilitar a identificação dos eventos críticos causados pela ação do vento.

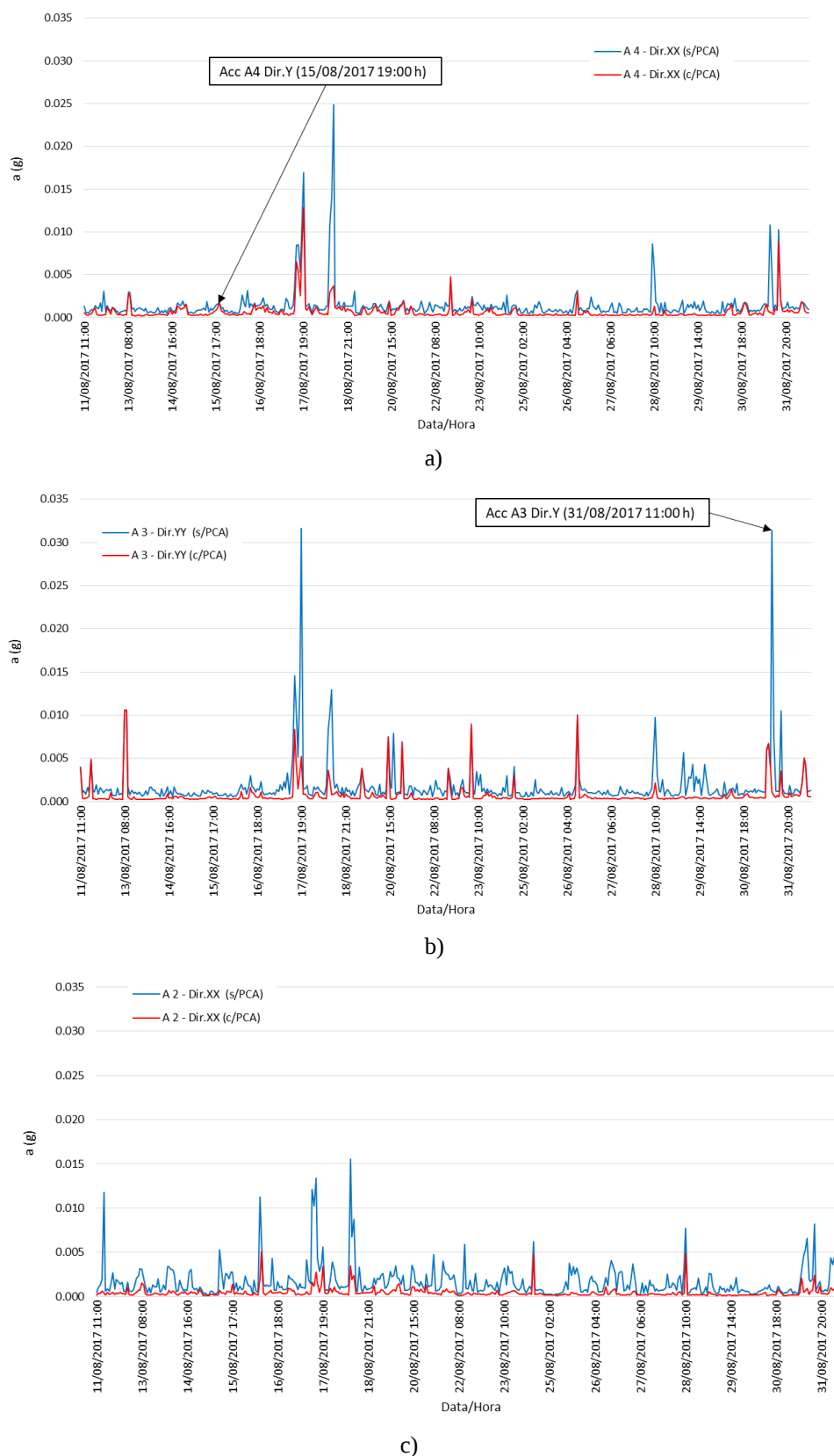
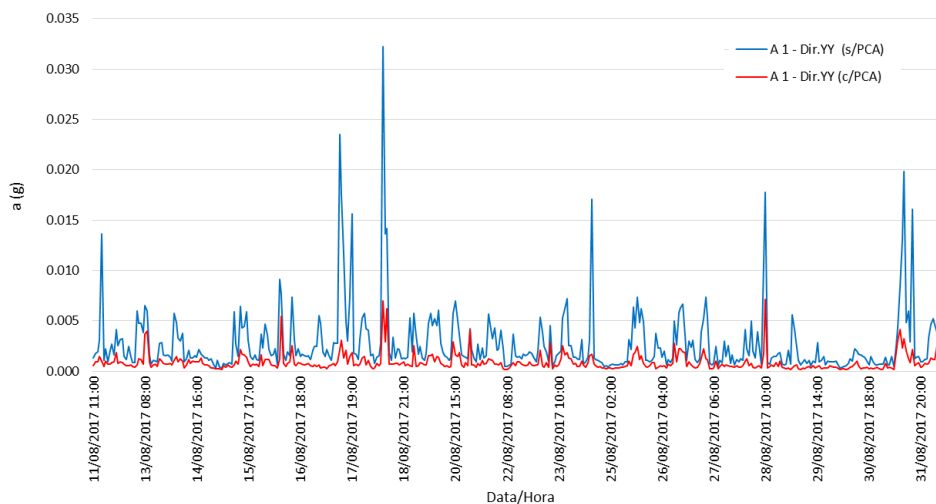


Figura 9. Valores máximos das acelerações medidas na torre, antes e após a aplicação da análise de componentes principais, nas localizações: a) A4; b) A3; c) A2; d) A1



d)

Figura 9 (continuação). Valores máximos das acelerações medidas na torre, antes e após a aplicação da análise de componentes principais, nas localizações: a) A4; b) A3; c) A2; d) A1

Também é possível constatar que as acelerações máximas da torre são registadas à cota 312.6, ou seja, à cota mais elevada, onde foram registados alguns eventos esporádicos com valores da aceleração máxima na ordem dos 10-15 mg. À cota mais baixa os valores da aceleração máxima não excederam os 7 mg.

Na Figura 10 apresentam-se dois registos de acelerações medidos nos acelerómetros A4 (Figura 10a) e A3 (Figura 10b), antes e após a aplicação do PCA, no decorrer de um período de 1 h, e correspondentes aos pontos assinalados na Figura 9a e 9b, respetivamente. Adicionalmente, para o caso do registo do acelerómetro A4 é também apresentado o correspondente auto-espectro médio e normalizado.

O registo do acelerómetro A4 é exemplificativo de um evento típico que ocorre na torre devido à atuação do vento, e por isso a aplicação do PCA não conduziu a qualquer alteração no aspeto do registo. Curiosamente, a análise do correspondente auto-espectro demonstra que a resposta dinâmica é predominantemente influenciada pelo contributo do 2º modo de vibração da torre com uma frequência igual a 0.71 Hz, associado a movimentos da torre metálica, e em muito menor grau pelo contributo do 1º modo de vibração com uma frequência igual a 0.48 Hz, associado a movimentos do fuste em betão. No que toca ao registo do acelerómetro A3, é possível verificar que o seu valor máximo ocorreu num instante onde nitidamente existiu uma influencia associada a fatores operacionais. Nesta situação a aplicação da análise PCA permitiu a remoção eficiente do evento esporádico, permitindo a posterior análise do valor máximo da resposta.

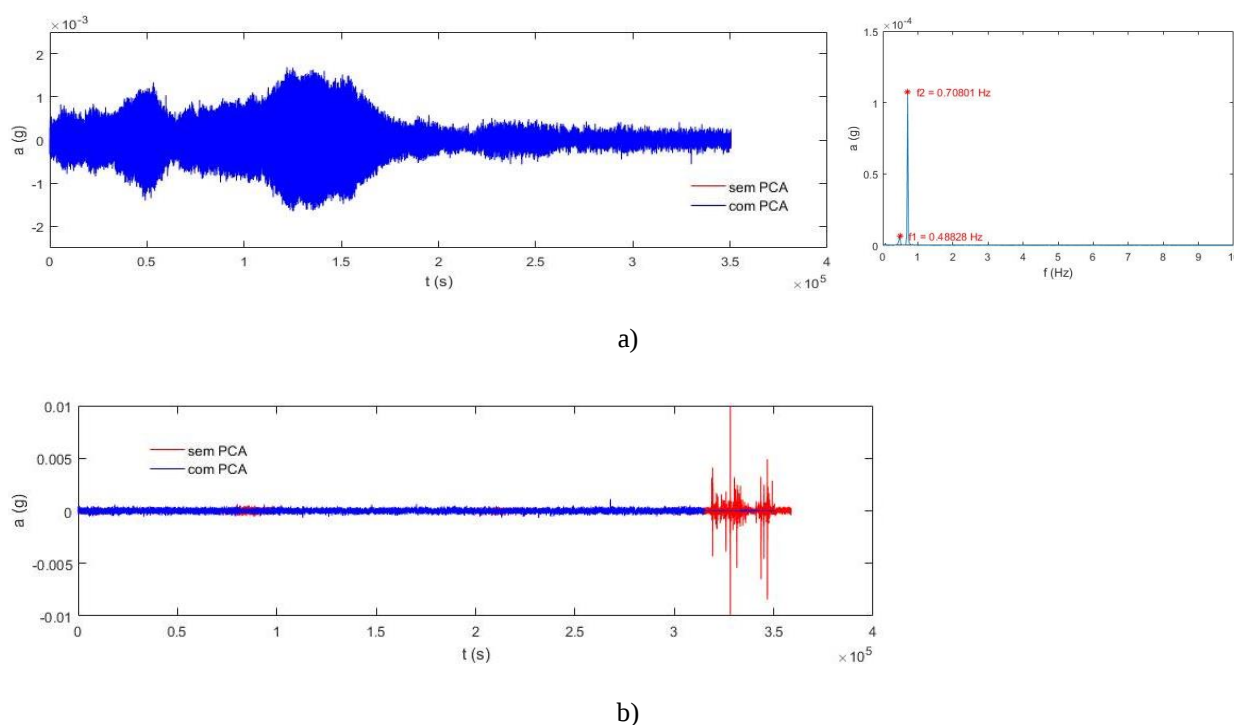


Figura 10. Registos temporais de acelerações, antes e após a aplicação da análise de componentes principais, nas localizações: a) A4 e correspondente auto-espectro; b) A3

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente artigo descreve os trabalhos experimentais levados a cabo na torre de telecomunicações do Monte da Virgem (Portugal) tendo em vista a caracterização do seu comportamento dinâmico sob ação do vento.

O ensaio de vibração ambiental permitiu identificar as frequências naturais associadas a quatro modos de vibração que envolvem movimento do fuste em betão e da torre metálica e compreendidas entre 0.48 Hz e 5.98 Hz.

A instalação de um sistema de monitorização permanente na torre possibilitou a identificação e caracterização de um conjunto de eventos críticos associados a vibrações mais significativas da torre. Para o sucesso da identificação destes eventos foi decisivo o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia automática de pós-processamento da informação experimental baseada em uma análise de componentes principais (PCA). A técnica desenvolvida possibilitou a remoção eficiente da influência de alguns fatores operacionais dos registos de acelerações. Adicionalmente foi também demonstrado que os eventos críticos estão tipicamente associados ao contributo preponderante do 2º modo de vibração da estrutura e que está associado a movimentos localizados da torre metálica.

Em trabalhos futuros, pretende-se, com base num período de medições mais alargado, a identificação e caracterização dos regimes de ventos causadores das vibrações excessivas da torre, além da identificação da dependência entre os valores das frequências naturais de vibração da estrutura e os valores medidos da temperatura e da velocidade do vento.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento à Portugal Telecom, particularmente ao Engenheiro Jorge Garcia, por todas as informações fornecidas sobre a torre de telecomunicações do Monte da Virgem e por todo o apoio e facilidades concedidas durante as campanhas experimentais.

REFERÊNCIAS

- Alves V. (2016), Estudo de estratégias de monitoramento de estruturas civis e detecção de danos, Plano de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Autodesk CFD (2017), Users Guide, *Autodesk Incorporation*, USA.
- Ballabio D. (2015), A MATLAB toolbox for Principal Component Analysis and unsupervised exploration of data structure, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149 Part B, 1-9.
- Beirrow, B., & Osterrieder, P. (2001). Dynamic investigations of TV towers. *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 1, 629–636.
- Breuer, P., Chmielewski, T, Górski, P., Konopkaa, E. and Tarczynski, L. (2008). The Stuttgart TV Tower - displacement of the top caused by the effects of sun and wind. *Engineering Structures*, 30, 2771–2781.
- Chena, W.H., Lua, Z.R., Lin, W., Chena, S.H., Ni, Y.Q., Xia, Y. and Liao W.Y. (2011). Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower. *Engineering Structures*, 33, 3628–3646.
- 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.
- SVS, ARTeMIS Extractor Pro 2011 - Academic licence, Release 5.4, Aalborg, Denmark: SVS, 2011.
- Todeschini,R., (1997), Data correlation, number of significant principal components and shape of molecules. The K correlation index, *Anal. Chim. Acta*, 348, pp. 419-430.