

## **METODOLOGIA ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DOS EFEITOS OPERACIONAIS DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DE UMA TORRE DE TELECOMUNICAÇÕES**

**D. Ribeiro**

**J. Leite**

*drr@isep.ipp.pt*

*jleite.eng@gmail.com*

*CONSTRUCT-LESE, Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto, Portugal*

**A. Meixedo**

**N. Pinto**

**R. Calçada**

*ameixedo@fe.up.pt*

*npinto@fe.up.pt*

*ruiabc@fe.up.pt*

*CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal*

**Abstract.** This paper describes a statistical methodology for removing the influence of operational factors from the dynamic responses of a telecommunications tower. The characterization of the dynamic responses of the structure, over a period of 3 months, was based on a continuous monitoring system that included accelerometers and anemometers. The analysis of the results allowed to identify a significant number of critical events, for which the dynamic response under wind action is amplified, as well as sporadic events, associated with high peak acceleration values, due to the influence of operational factors related to the lift movements, technical staff and equipment. Automatic identification of critical events based on extreme acceleration values requires the prior removal of operational effects from the records, which was performed using a methodology based on the crest factor (CF) and autoregressive models (AR). The methodology demonstrated efficiency and robustness in eliminating acceleration peaks due to operational factors, as well as being computationally efficient, minimizing the possibility of false positives in the identification of critical events. The developed methodology has potential to be integrated in a Structural Health Monitoring (SHM) system in order to evaluate the safety and operational conditions of the tower.

**Keywords:** telecommunications tower, monitoring system, sporadic events, operational effects, crest factor, autoregressive models.

## **1 Introdução**

As torres de telecomunicações de elevada altura são estruturas onde os efeitos dinâmicos induzidos pela ação de vento podem colocar em risco as condições de operacionalidade, sobretudo devido à ocorrência de fenómenos de vibrações excessivas. Estes fenómenos vibratórios condicionam geralmente o conforto, saúde e segurança dos utilizadores, a segurança dos equipamentos e a qualidade da comunicação e transmissão de sinal [1, 2].

Existem inúmeros casos, alguns deles recentes, de torres de telecomunicações onde foram reportados fenómenos de vibrações excessivas induzidos por ventos específicos, e que têm vindo a ser observados continuamente com o apoio de sistemas de monitorização [1, 3-4].

No caso de torres de telecomunicações, os fatores operacionais, associados, por exemplo, à circulação de tráfego na vizinhança da estrutura, funcionamento de equipamentos de telecomunicações e elevadores, execução de trabalhos de manutenção, utilização da estrutura por visitantes, entre outros, podem condicionar significativamente a avaliação das respostas dinâmicas medidas sob ação do vento, nomeadamente os seus valores extremos.

A remoção da influência dos fatores operacionais dos registos dinâmicos é uma tarefa complexa, sobretudo nos casos em que os seus conteúdos em frequência surgem sobrepostos, ou próximos, aos conteúdos em frequência da estrutura e da ação do vento, inviabilizando a sua remoção com recurso a filtros digitais [5].

Também os fatores ambientais, relacionados com as variações de temperatura, radiação solar, humidade, gelo, entre outros, poderão influenciar as respostas dinâmicas deste tipo de estruturas, sobretudo pelo facto de as propriedades mecânicas dos materiais apresentarem variações, por vezes significativas, com a variação das condições ambientais, além de possíveis variações do estado de tensão, da geometria e das condições fronteira [5-6].

O presente trabalho visa dar um contributo em relação a alguns aspetos que atualmente não estão suficientemente abordados na bibliografia existente, particularmente, no desenvolvimento de uma metodologia de remoção da influência de fatores operacionais das respostas dinâmicas, computacionalmente eficiente, e especificamente direcionada para as condições operacionais em torres de telecomunicações.

Assim, o presente artigo descreve uma metodologia estatística para remover os efeitos operacionais das medições dinâmicas obtidas por intermédio de um sistema de monitorização contínua instalado na torre de telecomunicações do Monte da Virgem. O sistema de monitorização possibilita a caracterização das acelerações máximas da estrutura e do regime de ventos durante um período de 3 meses. O processamento automático dos dados experimentais permitiu a identificação de eventos críticos, relacionados com a ações do vento específicas, e eventos esporádicos, também associados a elevados níveis de aceleração, mas resultantes da influência de fatores operacionais. Para remover os efeitos operacionais, que comprometem a identificação dos eventos críticos, uma metodologia automática baseada no fator de pico (CF) e em modelos autorregressivos (AR) foi desenvolvida e aplicada com sucesso.

## **2 A torre de telecomunicações do Monte da Virgem**

A torre de telecomunicações do Monte da Virgem é uma torre de transmissão construída 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 (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 constituídos 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, destinados à montagem dos sistemas de transmissão FM, VHF e UHF, conforme alçado esquemático apresentado na Fig. 1b. 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 com uma espessura de 1.20 m.

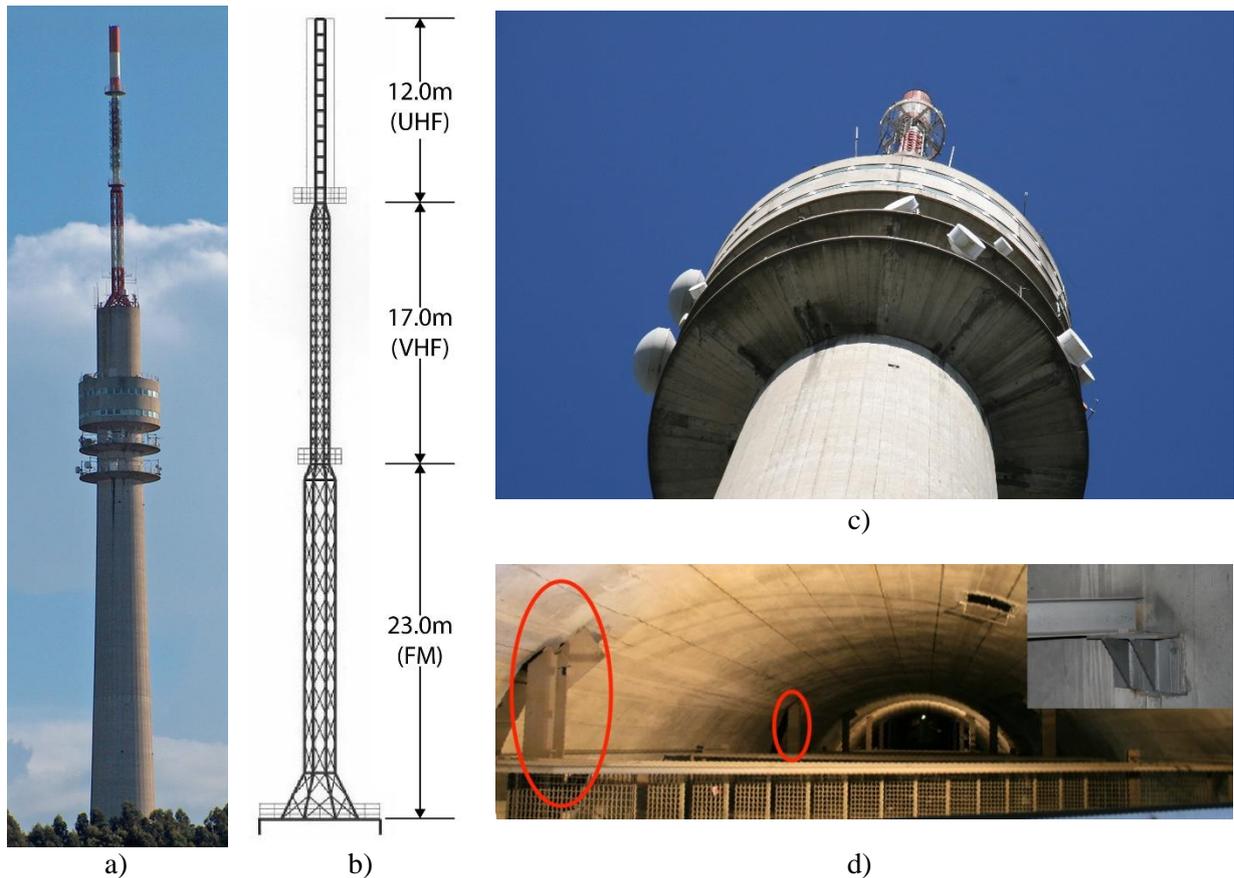


Figura 1. Torre de telecomunicações do Monte da Virgem: a) vista geral; b) torre metálica; c) pisos técnicos; d) vista de topo das vigas de travamento da parede do fuste e pormenor do apoio

### 3 Sistema de monitorização contínua

#### 3.1 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.

Para o efeito, foram instalados na torre 2 acelerómetros piezoelétricos, marca PCB modelo 393B12, e 2 anemómetros, marca VAISALA modelo WM302. Os acelerómetros (A1 e A2) foram posicionados à cota 104.4 e fixos diretamente ao pavimento, conforme os detalhes da Fig. 2. As acelerações foram medidas segundo duas direções radiais e ortogonais entre si. Os anemómetros (An1 e An2) foram instalados no piso exterior à cota 112.2 e em posições distintas, nomeadamente sudoeste (SW) e noroeste (NW), e fixos ao guarda corpos por intermédio de abraçadeiras metálicas (Fig. 2). 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.

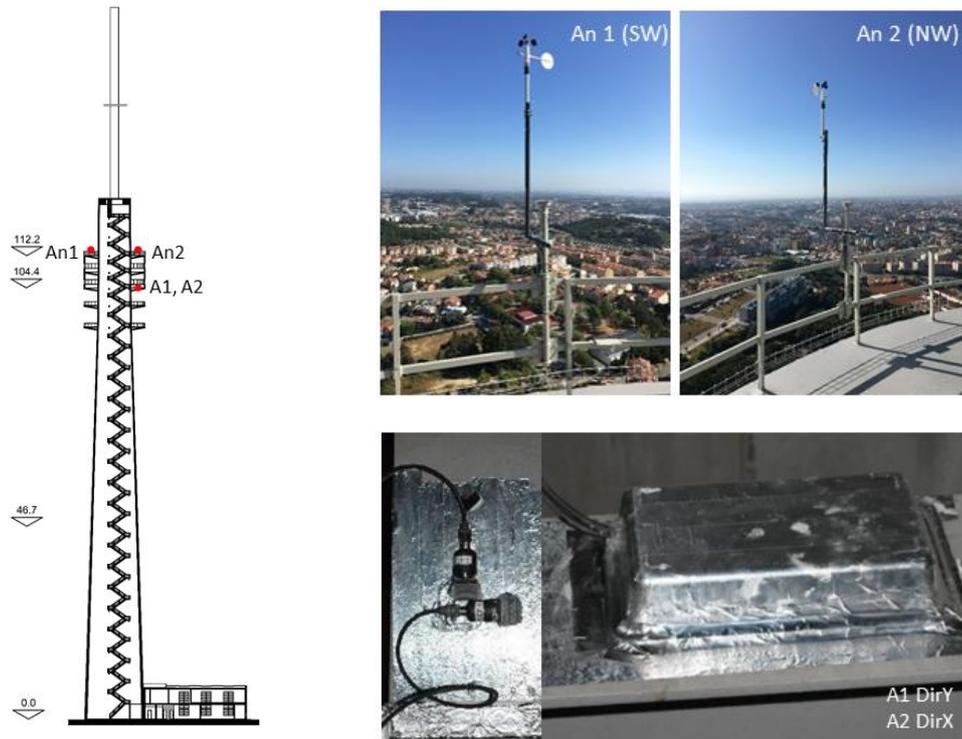


Figura 2. Sistema de monitorização contínua: posicionamento dos sensores

### 3.2 Resultados

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

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. A título exemplificativo, é apresentado na Fig. 3 o registo de acelerações típico de um evento não-crítico, incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados entre DC e 5 Hz, e os registos da direção e velocidade do vento. O evento 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 20 km/h. O conteúdo em frequência da resposta dinâmica da estrutura compreende uma gama de frequências alargada, com preponderância para os modos de vibração correspondentes à flexão do fuste e da torre metálica [3].

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, é apresentado na Fig. 4 o registo de acelerações típico de um evento crítico, incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados entre DC e 5 Hz, e os registos da direção e velocidade do vento. É ainda apresentado um detalhe do registo de acelerações para um intervalo de tempo de 10 s. A observação da figura permite constatar que a ocorrência de eventos críticos 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 associado à flexão da torre metálica, com uma frequência igual a 0.709 Hz, que por compatibilidade estrutural gera movimentos do fuste.

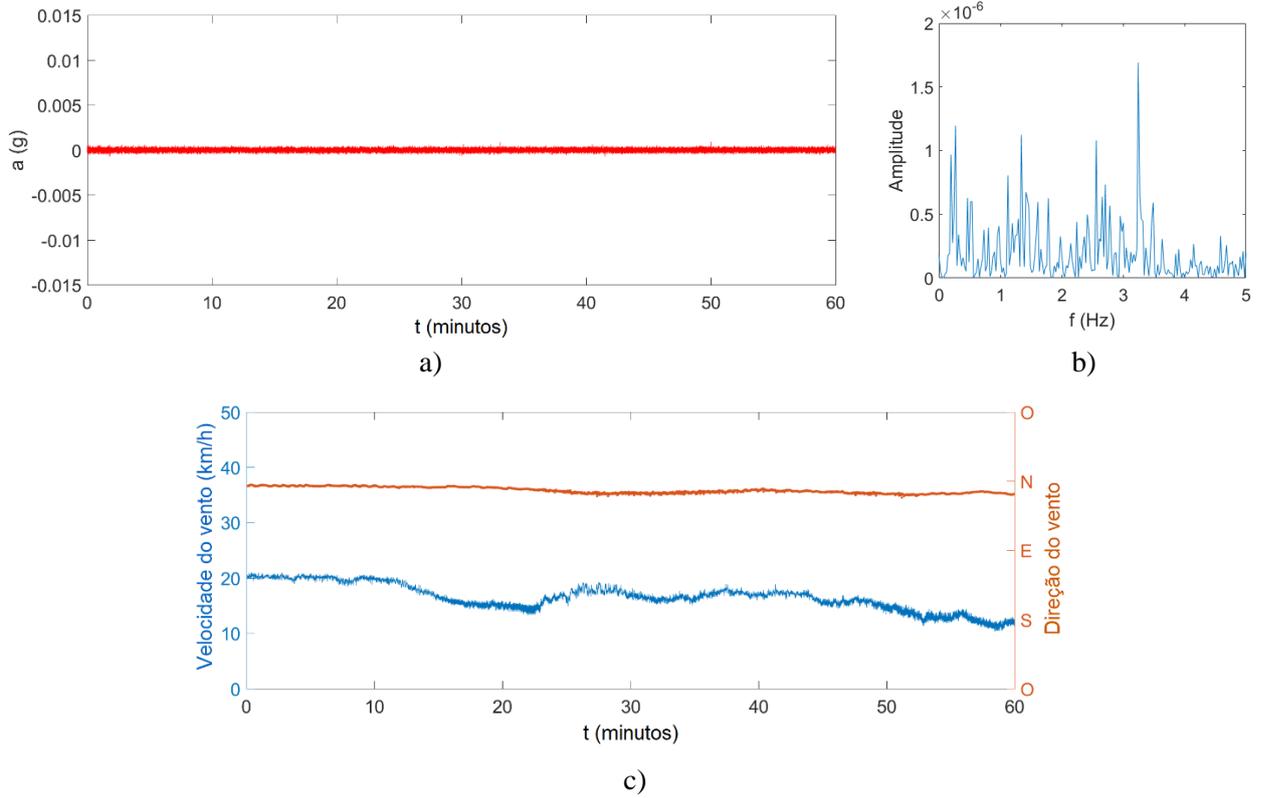


Figura 3. Evento não-crítico: a) registo de acelerações, b) auto espetro médio e normalizado das acelerações, e c) registo da velocidade e direção do vento

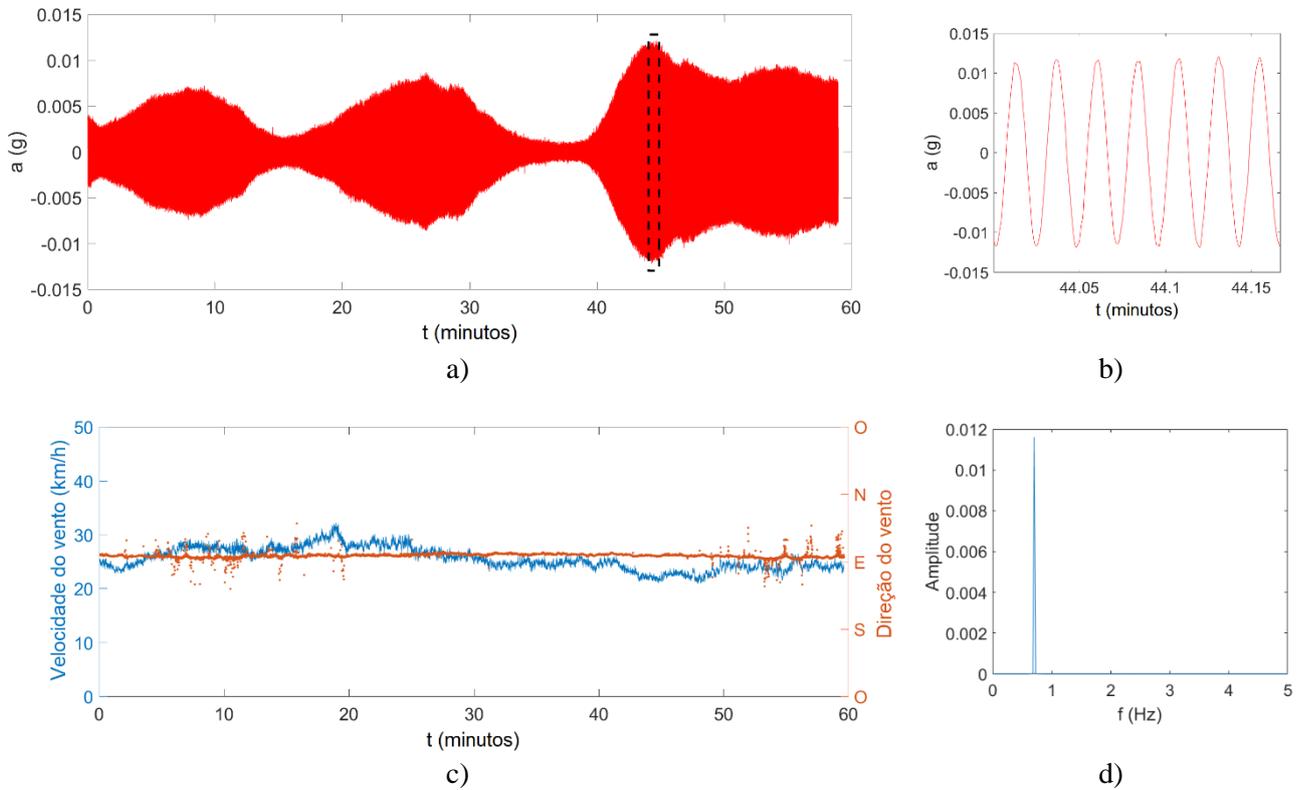


Figura 4. Evento crítico: a) registo de acelerações, b) detalhe do registo de acelerações durante 10s, c) registo da velocidade e direção do vento, e d) auto espetro médio e normalizado das acelerações

Os eventos esporádicos estão associados a situações ocasionais em que a resposta dinâmica da estrutura sob ação do vento é influenciada por fatores operacionais, nomeadamente, os movimentos do elevador, equipamentos em funcionamento e pessoal técnico em trabalhos de manutenção. Estes eventos são caracterizados por picos de aceleração com valores máximos que podem atingir 100-150 mg, ultrapassando largamente os valores máximos registados nos eventos críticos. A título exemplificativo, é apresentado na Fig. 5 o registo de acelerações típico de um evento esporádico, incluindo os correspondentes auto espetros médios e normalizados entre DC e 5 Hz. O registo foi filtrado por intermédio de um filtro digital passa-baixo do tipo Chebyshev e com uma frequência de corte igual a 10 Hz. O registo de acelerações apresentado na Fig. 5, entre outros registados, inclui um exemplo da influência do movimento do elevador (ascendente e descendente) e de pessoal técnico em trabalhos de manutenção, que decorreram ao longo de um período de aproximadamente 20 min. A análise do autoespectro das acelerações mostra ainda que os efeitos operacionais mobilizam uma gama de frequências próxima das frequências naturais da torre, sobretudo as associadas à flexão do fuste e da torre metálica, o que impossibilita a sua remoção por intermédio da aplicação de filtros digitais [3].

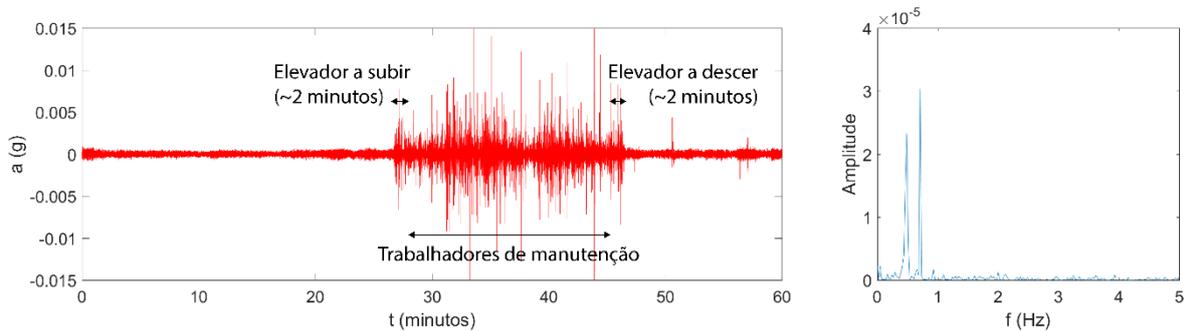


Figura 5. Registos de acelerações de um evento esporádico e correspondente auto espetro médio e normalizado

## 4 Metodologia de remoção automática da influência de fatores operacionais

O desenvolvimento de uma metodologia robusta e eficiente que permita remover automaticamente a influência de fatores operacionais é crucial num sistema SHM, caso contrário, vários eventos podem ser incorretamente identificados como críticos. Para atingir esse objetivo, uma metodologia baseada no fator de pico (CF) e em modelos autoregressivos (AR) foi desenvolvida e aplicada aos registos de acelerações medidos.

### 4.1 Enquadramento teórico

A metodologia proposta envolve, primeiro, o uso do fator de pico (CF) para remover as partes dos registos de aceleração influenciadas pelos fatores operacionais e, segundo, a aplicação de um modelo autoregressivo (AR) para reconstruir as partes removidas do sinal.

Os registos de aceleração utilizados resultam da divisão em partes iguais do sinal de aceleração de apenas um sensor. Cada uma das partes do registo original, denominada de evento, inclui  $n$  observações em correspondência com os valores da aceleração medidos.

Assim, considerando uma série temporal de aceleração dividida em  $v$  eventos, cada um com  $n$  observações, a matriz de dados original ( $\mathbf{X}$ ) pode ser descrita como:

$$\mathbf{X}_{(n \times v)} = [\mathbf{X}^1 \quad \mathbf{X}^2 \quad \mathbf{X}^3 \quad \dots \quad \mathbf{X}^v] = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & x_1^3 & \dots & x_1^v \\ x_2^1 & x_2^2 & x_2^3 & \dots & x_2^v \\ x_3^1 & x_3^2 & x_3^3 & \dots & x_3^v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & x_n^3 & \dots & x_n^v \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde  $x_i^v$  representa a observação  $i$  do evento  $v$ , enquanto  $\mathbf{X}^v$  é o vetor que reúne as  $n$  observações associadas ao evento  $v$ .

O fator de pico (CF) é a razão entre a amplitude de pico de um registo de acelerações e o seu valor RMS (*Root Mean Square*) de acordo com a seguinte expressão:

$$CF_v = \frac{\max |\mathbf{X}^v|}{\mathbf{X}_{RMS}^v} \quad (2)$$

onde  $\mathbf{X}_{RMS}^v$  é o valor RMS do vetor associado ao evento  $v$  dado por:

$$\mathbf{X}_{RMS}^v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i^v|^2} \quad (3)$$

CF é uma quantidade adimensional definida por um número real positivo. Valores de CF próximos a 1.0 indicam similaridade entre os picos de uma série temporal. No caso de uma onda sinusoidal pura, o valor de CF é igual a 1.41. Valores elevados de CF indicam a presença de eventos esporádicos no registo temporal. A Fig. 6 ilustra graficamente o conceito de fator de pico.

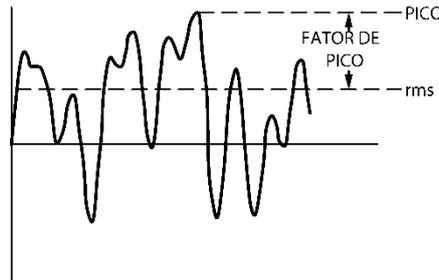


Figura 6. Fator de pico (CF)

Em relação ao modelo autoregressivo, geralmente designado por  $AR(p)$ , em que  $p$  é a ordem do modelo, é um modelo linear das séries temporais definido por:

$$x_i = \sum_{j=1}^p x_{i-j} a_j \quad (4)$$

em que o valor atual da resposta,  $x_i$ , é definido como uma combinação linear dos  $p$  valores de respostas anteriores multiplicados pelos coeficientes do modelo autoregressivo  $a_j$ .

A ordem apropriada do modelo pode ser determinada por vários métodos, como o critério de informação de Akaike (AIC), função de autocorrelação parcial (PAF), decomposição dos valores singulares (SVD) ou critério de informação Bayesiano (BIC) [5].

Em formato matricial, o modelo AR pode ser representado por:

$$\begin{bmatrix} x_{p+1} \\ x_{p+2} \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_p \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{p+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n-p} & x_{n-p+1} & \cdots & x_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_{p-1} \\ \vdots \\ a_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para séries temporais típicas resulta um sistema sobredeterminado de equações que deve ser resolvido de modo a obterem-se as estimativas dos coeficientes do modelo autoregressivo. Existem diversos métodos que podem ser utilizados para calcular o sistema de equações, nomeadamente os métodos de Yule-Walker e dos mínimos quadrados [5].

## 4.2 Metodologia proposta

A Fig. 7 apresenta, esquematicamente, as etapas da metodologia baseada no fator de pico e modelos autorregressivos para a remoção automática dos fatores operacionais de registros de acelerações, e que foi desenvolvida no programa Matlab.

No presente estudo, os registros horários de aceleração foram divididos em 60 intervalos, com duração de 60 s cada. A tolerância associada ao fator de pico foi considerada igual a 5.0. A ordem do modelo autorregressivo foi considerada igual a 25 por aplicação do critério SVD [3], sendo que os coeficientes do modelo autorregressivo foram calculados com base nas partes dos registros de aceleração imediatamente anteriores às partes removidas.

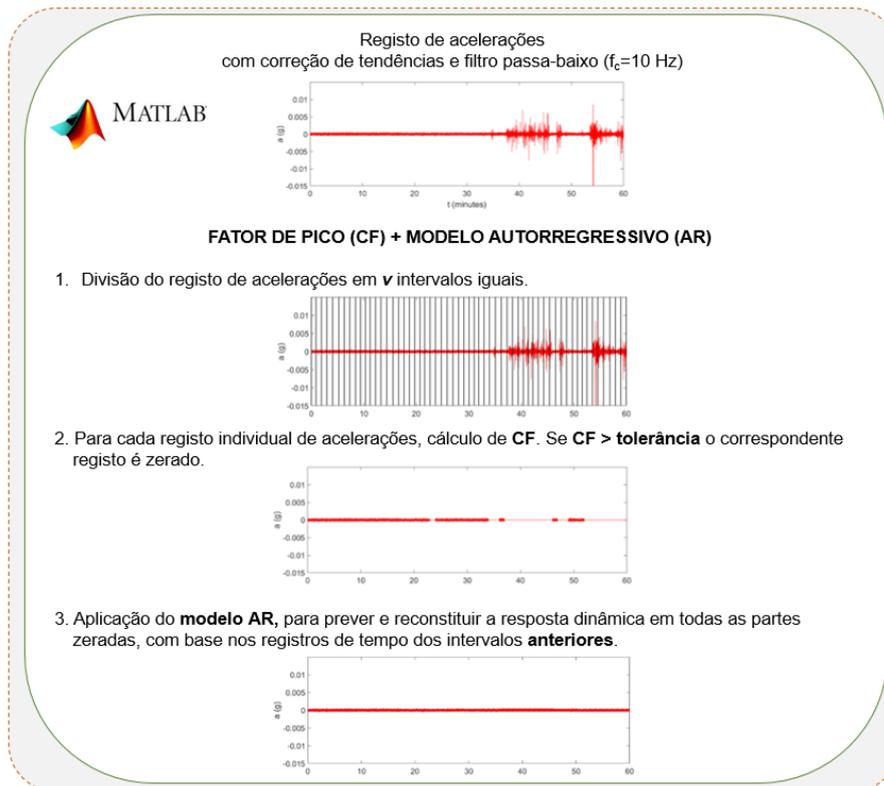


Figura 7. Fluxograma de implementação do modelo CF + AR

## 4.3 Aplicação

Na Fig. 8 ilustra-se o resultado da aplicação da metodologia de remoção dos efeitos operacionais ao caso do evento esporádico apresentado na Fig. 5. O registo de aceleração do evento esporádico é apresentado no intervalo de tempo [20-60]s de modo a melhorar o detalhe na zona onde os efeitos operacionais são mais visíveis, sendo o registo original representado a vermelho, e o registros transformados representados a azul. No caso dos registros transformados apresentam-se os resultados faseados, nomeadamente do passo 2 (após a aplicação do CF – Fig. 8a) e dos passos 2 e 3 (após a aplicação do CF e do modelo AR – Fig. 8b), seguindo as indicações da Fig. 7.

A aplicação do parâmetro CF revelou ser extremamente eficiente na remoção das partes dos registros que são influenciadas pelos fatores operacionais, como se pode constatar pela eliminação da totalidade dos picos de maior amplitude, e a quase totalidade dos picos de menor amplitude, com exceções pontuais quase imperceptíveis. Também o modelo AR demonstrou uma elevada robustez na reconstrução das partes dos registros de acelerações afetados pelos fatores operacionais. Os resultados obtidos para este evento esporádico é representativo do que se verificou para outros eventos esporádicos registados na torre.

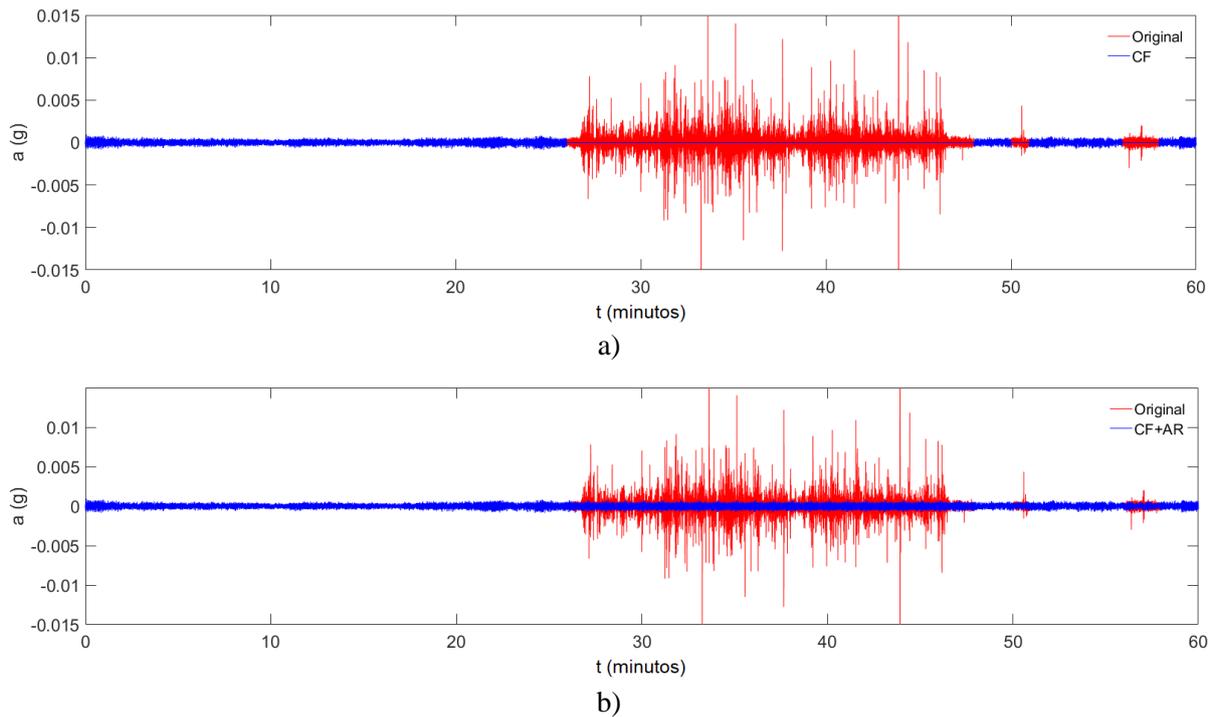


Figura 8. Aplicação faseada da metodologia de remoção dos efeitos operacionais ao caso do registo de acelerações de um evento esporádico: a) passo 2 (apenas CF), b) passo 3 (CF + AR)

Na Fig. 9 apresenta-se o resultado da aplicação da metodologia de remoção dos efeitos operacionais ao caso de um evento crítico (Fig. 9a) e de um evento não-crítico (Fig. 9b). São ainda apresentados os detalhes dos registos de acelerações para uma janela temporal de 10 s. Em ambos os casos, os resultados demonstraram a robustez da metodologia baseada no CF e modelo AR que mantém inalterados os registos de aceleração originais.

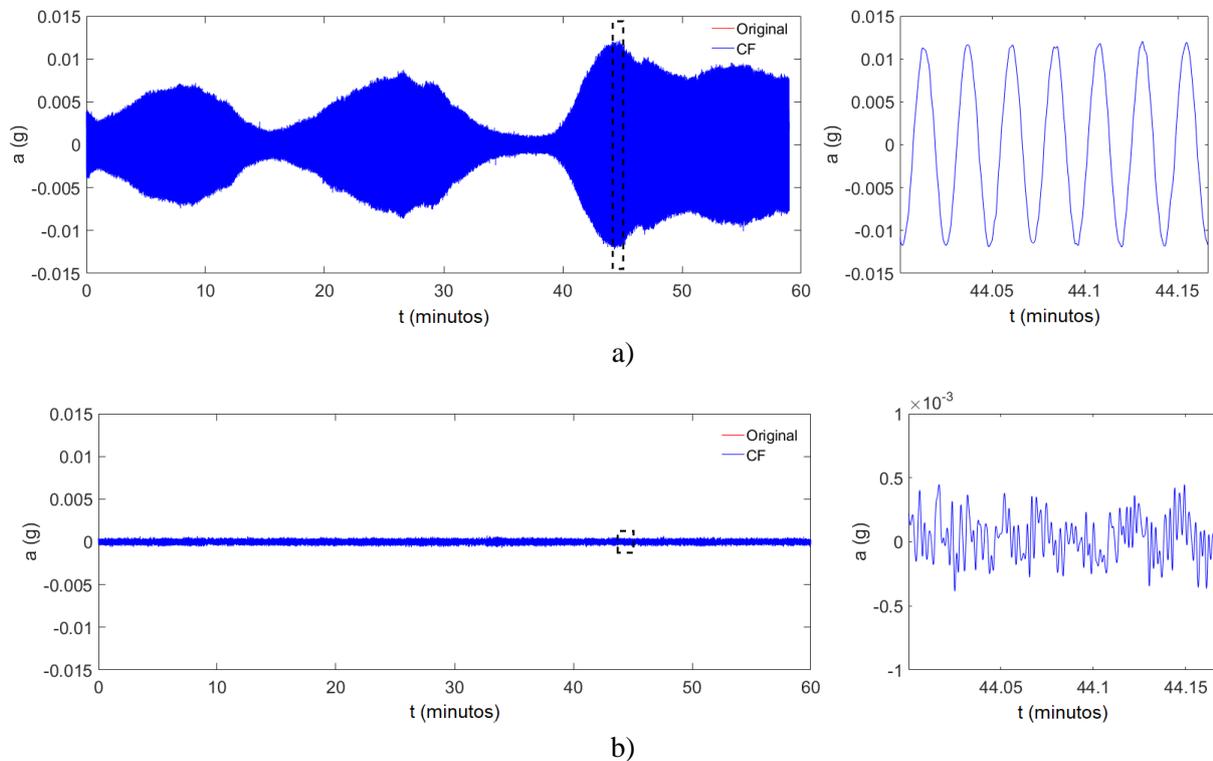


Figura 9. Metodologia de remoção dos efeitos operacionais CF+AR ao caso dos registos de acelerações de um evento: a) crítico, b) não-crítico

Na Fig. 10 são apresentados os valores de pico da aceleração, em mg, dos eventos críticos identificados com base nos dados originais (Fig. 10a) e no método CF+AR (Fig. 10b), a partir dos dados recolhidos durante um período de três meses, de 1 setembro a 30 novembro de 2017.

Os resultados permitem identificar, especialmente nos registos originais, um número muito significativo de eventos com elevadas acelerações de pico, em alguns casos atingindo valores superiores a 30 mg, os quais com a aplicação do método CF+AR foram corrigidos para valores substancialmente inferiores, uma vez que se tratavam de eventos com influência das condições operacionais. Estes falsos-positivos estão relacionados a eventos que seriam classificados como críticos, com base nos dados originais, mas que na maioria das vezes, após a aplicação do método CF+AR, são classificados como eventos não críticos. Por sua vez, para outros eventos identificados, os valores de pico de aceleração dos registos originais e dos registos após aplicação do método CF+AR são os mesmos, demonstrando que esses são os verdadeiros eventos críticos devidos à ação do vento.

No período analisado foram identificados 113 eventos críticos e a aceleração máxima registrada foi de 14.4 mg.

## **5 Conclusões**

O presente estudo descreveu o desenvolvimento e a aplicação de uma metodologia estatística para a remoção dos efeitos operacionais das respostas dinâmicas da torre de telecomunicações do Monte da Virgem.

A caracterização das respostas dinâmicas da estrutura, ao longo de um período de 3 meses, foi baseada num sistema de monitorização contínua.

A análise dos resultados permitiu identificar vários eventos críticos, associados a amplificações significativas da resposta dinâmica, com valores de pico entre 5 mg e 15 mg, e ocorrendo tipicamente para ventos de Este com velocidades variando entre 20 km/h e 35 km/h. Estes eventos ocorrem devido a um fenómeno de desprendimento alternado de vórtices na torre metálica, que mobiliza movimentos locais do mastro, que indiretamente, por compatibilidade estrutural, induz movimentos no fuste. Além disso, foram identificados um número significativo de eventos esporádicos, associados a fatores operacionais devidos ao movimento do elevador, equipas técnicas de manutenção e equipamentos. Estes eventos específicos são caracterizados por picos de aceleração com valores máximos que podem atingir 100-150 mg, excedendo amplamente os valores máximos registados para os eventos críticos.

A identificação automática dos eventos críticos é extremamente importante para a avaliação das condições de segurança e operacionalidade da torre. Normalmente, essa identificação é realizada com base na avaliação dos valores extremos de aceleração, e, por isso, tornou-se necessária a remoção prévia dos efeitos operacionais dos registos.

A remoção dos efeitos operacionais dos registos de aceleração foi realizada usando uma metodologia baseada no fator de pico (CF) e modelos autoregressivos (AR). A metodologia proposta envolve, primeiro, o uso do CF para remover as partes dos registos de aceleração influenciadas pelos fatores operacionais, e segundo, a aplicação de um modelo AR para reconstruir as partes removidas do sinal. Esta abordagem comprovou eficiência e robustez na eliminação dos picos de aceleração devido aos fatores operacionais, conforme atestado pelo reduzido número de ocorrências de falsos-positivos na identificação de eventos críticos. Acresce que esta metodologia não afeta a identificação dos eventos críticos e não-críticos.

A identificação de eventos críticos com base nos registos de acelerações originais conduziria a uma sobre estimação do número de eventos críticos. A aplicação do método CF+AR estimou para o período de três meses em análise, um total de 113 eventos críticos e uma aceleração máxima registrada igual a 14.4 mg.

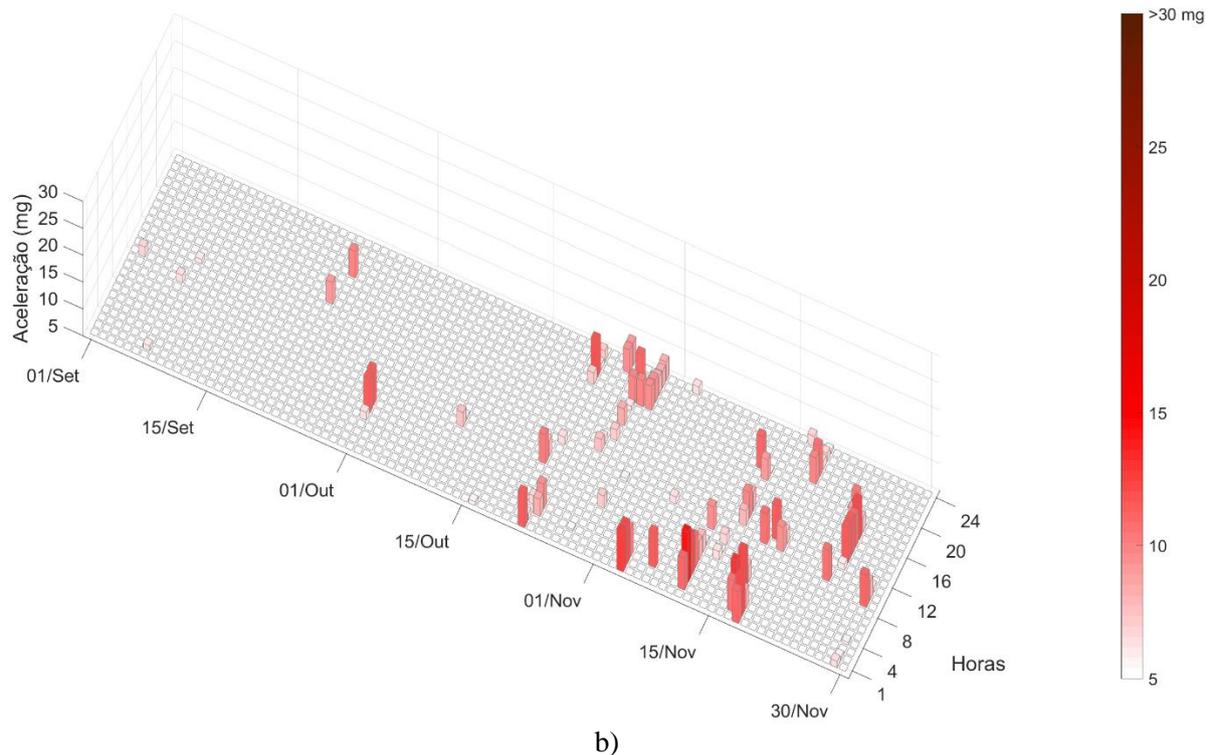
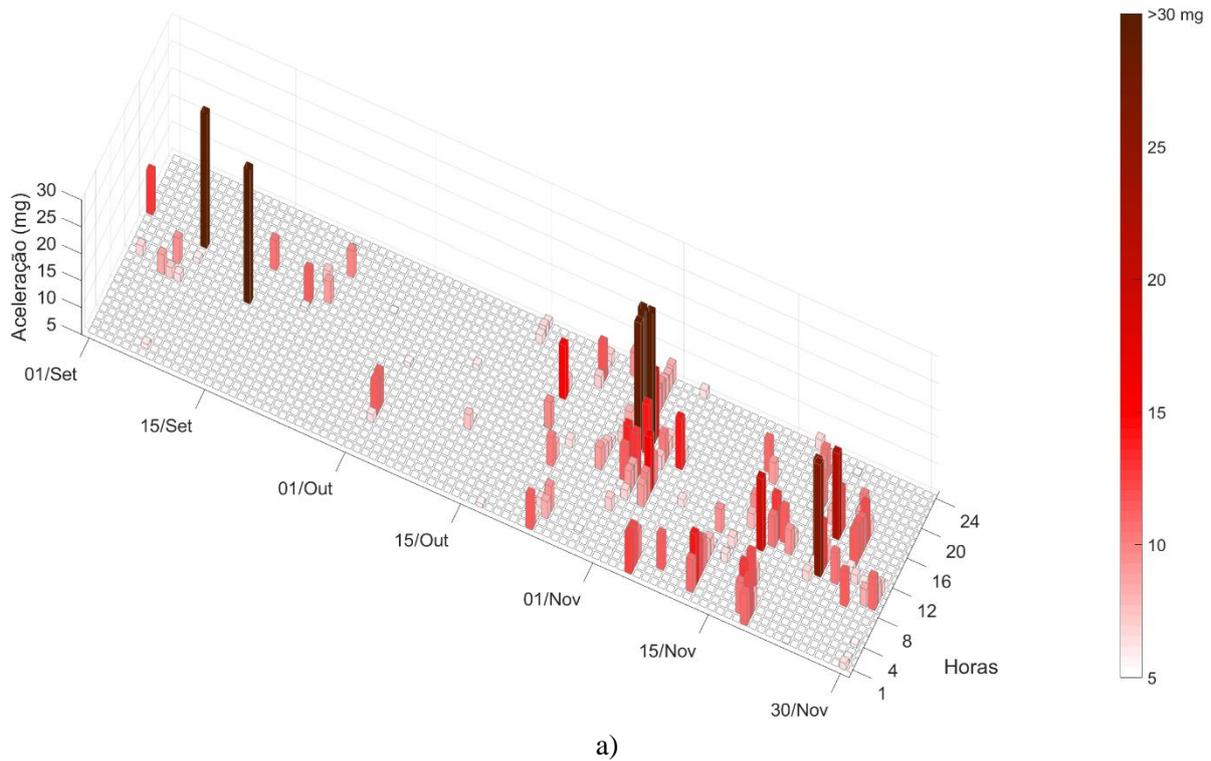


Figura 10. Valores máximos de aceleração de eventos críticos, na faixa de 5 mg a >30 mg, entre 1 de setembro e 30 de novembro de 2017, com base em: a) dados originais, b) dados processados pelo método CF+AR

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Altice, em especial ao Eng. Jorge Garcia, pelas informações fornecidas sobre a torre de telecomunicações do Monte da Virgem e por todo o apoio assegurado durante a monitorização contínua da torre.

## **Referências**

- [1] B. Beirrow, P. Osterrieder (2001). Dynamic investigations of TV towers. *Structural Engineering, Mechanics and Computation*, 1: 629–636.
- [2] L. Qiusheng, H. Yinghou, Z. Kang, H. Xuliang, H. Yuncheng, S. Zhenru (2018). Structural health monitoring for a 600 m high skyscraper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 27 (12): e1490.
- [3] D. Ribeiro, J. Leite, N. Pinto, R. Calçada (2019). Continuous monitoring of the dynamic behaviour of a high-rise telecommunications tower. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28 (11): e1621.
- [4] Y. Guo, A. Kareem, Y. Ni, W. Liao (2012). Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106: 116-128.
- [5] C. Farrar, K. Worden (2013). *Structural Health Monitoring – A machine learning approach*, 1st edition, John Wiley & Sons Ltd, UK.
- [6] J. Moughty, J. Casas (2017). A State of the Art Review of Modal-Based Damage Detection in Bridges: Development, Challenges, and Solutions. *Applied Sciences*, 7: 510.