



## DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE TORRES DE TELECOMUNICAÇÕES

Anton Taigildin<sup>a</sup>, Luís Macedo<sup>b,c</sup>, José Miguel Castro<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

<sup>b</sup> SimpleAxis, Porto, Portugal

<sup>c</sup> Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

**Resumo.** Neste artigo descreve-se o desenvolvimento de uma ferramenta de dimensionamento automático e otimizado de torres tubulares de telecomunicações sujeitas a ações gravíticas e do vento. Recorrendo a um algoritmo de otimização meta-heurístico, a ferramenta permite obter duas soluções otimizadas que cumprem os requisitos impostos pelo Eurocódigo 1 e Eurocódigo 3, utilizando a menor quantidade de material possível. As duas soluções diferem na forma como é tratado o fenómeno de desprendimento de vórtices (*vortex-shedding*). Enquanto que numa das soluções a verificação de segurança aos efeitos do referido fenómeno é atingida através do controlo da rigidez da torre, na outra solução as vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices são controladas através da incorporação de um amortecedor de massa sintonizada (TMD). Por fim, para testar a ferramenta desenvolvida e comparar as soluções geradas, foi realizado um caso de estudo de uma torre de telecomunicações localizada em Portugal.

### 1. Introdução

Atualmente, o uso de algoritmos de otimização é uma prática cada vez mais comum nos trabalhos de investigação na área de engenharia civil. Contudo, a falta de *software* no mercado, que recorra a algoritmos de otimização, não permite aos projetistas usufruir de otimização estrutural nos projetos do dia-a-dia. Para demonstrar a aplicabilidade de algoritmos de otimização nos projetos correntes, o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automático para o dimensionamento otimizado de torres de telecomunicações sujeitas a cargas gravíticas e do vento.

A ferramenta de cálculo apresentada neste artigo foi desenvolvida em *Python*, uma linguagem de programação de alto nível que facilitará o eventual desenvolvimento futuro desta ferramenta. A utilização de *OpenSeesPy* [1], um intérprete de *Python 3* da *OpenSees* [2], possibilitou efetuar análises dinâmicas que permitiram obter amplitudes de vibração induzidas por desprendimento de vórtices mais confiáveis, em comparação com os métodos propostos no Eurocódigo 1 [3].

## 2. Dimensionamento otimizado de torres de telecomunicações

### 2.1 Eurocódigo 1

De acordo com a Parte 1-4 do Eurocódigo 1 (EC1-1-4) [3] a força exercida pelo vento para a análise da estrutura na direção longitudinal pode ser representada através da Eq. (1).

$$F_w(z) = c_s c_d * c_f * q_p(z) * A_{ref} \quad (1)$$

Em que:

$c_s c_d$  – coeficiente estrutural;

$c_f$  – coeficiente de força;

$q_p$  – pressão dinâmica de pico;

$A_{ref}$  – área de referência.

As torres de telecomunicações caracterizam-se pela sua flexibilidade, leveza e possuem uma capacidade de amortecimento reduzida, o que as torna suscetíveis ao fenómeno de desprendimento de vórtices. A ação do desprendimento de vórtices (*vortex shedding*) em estruturas tubulares como postes, mastros, chaminés, torres, ou outros corpos rombos, caracteriza-se pela separação das camadas limites eólicas em torno da secção transversal. Estas camadas aparecem, uma de cada lado de estrutura, quando o ar entra em contacto com o corpo rombo e divide-se em torno deste. À medida que ocorre a libertação dos vórtices de um lado da estrutura, acontece o aumento da pressão do ar do outro, provocando assim, uma variação da distribuição de pressões na torre. Esta distribuição de pressões, provoca o aparecimento de uma força transversal à direção do vento, originando uma ação dinâmica, devido ao carácter cíclico do fenómeno do desprendimento de vórtices.

No Anexo E do EC1-1-4 [3] apresentam-se dois critérios de suscetibilidade ao desprendimento de vórtices e dois métodos analíticos para a quantificação do deslocamento máximo, caso a estrutura seja suscetível a este fenómeno.

Uma vez que o Anexo E tem caráter informativo, considerou-se vantajoso quantificar a amplitude máxima de vibração induzida por desprendimento de vórtices através de uma análise dinâmica, uma vez que esta permite obter a resposta dinâmica da estrutura e é aplicável a estruturas com secções variáveis em altura. A análise dinâmica foi realizada na *OpenSeesPy* [1], um intérprete de *Python 3* da *OpenSees* [2], que inclui a modelação numérica da torre e a quantificação da ação do desprendimento de vórtices, sendo que esta tem comportamento harmónico. Informações adicionais relativamente à análise dinâmica e ao procedimento de quantificação da ação do desprendimento de vórtices são apresentadas em [4].

Uma vez que o desprendimento de vórtices pode provocar amplitudes de vibrações elevadas no topo de estrutura, é importante considerar os meios da mitigação destas vibrações. No âmbito deste artigo a mitigação das vibrações provocadas pelo desprendimento de vórtices na segunda solução é realizada através de instalação de um amortecedor de massa sintonizada (TMD). TMDs são dispositivos de amortecimento constituídos por uma massa ligada à estrutura por

meio de uma mola e de um amortecedor, em geral viscoso, funcionando como um sistema de um grau de liberdade. Um TMD exerce o seu efeito sobre a estrutura através da mobilização de forças elásticas instaladas na mola e de forças de amortecimento viscoso. Estas forças atuam no sentido oposto ao do movimento da estrutura, contribuindo para a atenuação das vibrações induzidas pelo fenómeno de desprendimento de vórtices[5].

O procedimento do dimensionamento de um TMD é um processo iterativo e consiste na determinação das suas propriedades ótimas: massa, rigidez e amortecimento. O processo inicia-se com a escolha do parâmetro  $\mu$ , que corresponde à razão entre a massa do TMD e a massa do oscilador. A partir deste parâmetro são calculados os valores ótimos das propriedades do TMD e avalia-se a resposta dinâmica da estrutura ao fenómeno do desprendimento de vórtices. Caso as vibrações no topo da estrutura continuem a não satisfazer as limitações impostas, escolhe-se um valor maior do parâmetro  $\mu$  e repete-se o procedimento.

Destaca-se que o processo do dimensionamento depende, primeiro, do tipo de solicitação a atuar na estrutura e, segundo, do tipo de estrutura. No âmbito deste trabalho adotou-se o procedimento de dimensionamento proposto por Hartog [6], para definição de um TMD a acoplar a um sistema de um grau de liberdade não amortecido, sujeito a uma ação harmónica, uma vez que a ação do desprendimento de vórtices pode ser representada como uma ação harmónica e, devido ao seu amortecimento reduzido, as torres de telecomunicações são passíveis de ser tratadas como estruturas não amortecidas.

O procedimento de dimensionamento de um TMD, desenvolvido por Hartog [6], é válido para osciladores de um grau de liberdade. Uma vez que as estruturas em estudo consistem em múltiplos graus de liberdade, torna-se necessário transformá-las num oscilador de um grau de liberdade capaz de representar corretamente o comportamento da estrutura real na direção de movimento que se pretende controlar.

Uma vez que com a instalação de um TMD se pretende evitar a ocorrência de ressonância num modo de vibração específico, a modelação da estrutura, sujeita a uma solicitação em regime de ressonância, através de um oscilador de um grau de liberdade poderá ser feita utilizando as propriedades modais da estrutura correspondentes ao modo de vibração específico. Isto baseia-se nos seguintes conceitos:

- A sobreposição modal permite obter a resposta dinâmica de uma estrutura;
- A resposta de uma estrutura em ressonância é caracterizada somente pelo contributo de um modo de vibração.

Sendo assim, a massa do oscilador a considerar no processo do dimensionamento de um TMD é a massa modal do modo de vibração que se encontra em ressonância com a ação do desprendimento do vórtices.

## **2.2 Eurocódigo 3**

De acordo com a Parte 3-2 do Eurocódigo 3 (EC3-3-2)[7], que define as regras de dimensionamento para as torres tubulares e chaminés, os valores de coeficientes parciais de segurança relativos às ações são definidos em função de classe de importância da estrutura.

As secções transversais devem ser classificadas em função da esbelteza dos elementos constituintes e a distribuição de tensões.

De acordo com a norma, devem ser verificados dois estados limites: o estado limite último, que inclui a verificação do equilíbrio estático, da resistência das secções transversais, da resistência dos fenómenos de instabilidade e da resistência à fadiga e o estado limite de utilização de define dois deslocamentos horizontais que devem ser controlados: o deslocamento máximo no topo da estrutura na direção longitudinal e transversal do vento.

## 2.3 Algoritmo de otimização

Para obter soluções otimizadas, foi implementado um algoritmo de pesquisa harmónica[8]. Este algoritmo é inspirado no processo de improvisação que os músicos utilizam na procura da melhor harmonia musical entre si.

O algoritmo de pesquisa harmónica é constituído por 4 parâmetros principais que se baseiam em características do músico, tais como: a capacidade de memória (Harmonic Memory Size – HMS), a frequência com que afina o seu instrumento (Pitch Adjustment Rate – PAR), o intervalo de afinação (Bandwidth – BW) e a probabilidade de tocar uma melodia de memória (Harmony Memory Consideration Rate – HMCR). A definição dos parâmetros é realizada de acordo com as expressões propostas por Mahdavi *et al* [9] para o BW e o PAR e com a expressão proposta por Kumar *et al.* [10] para o HMCR, conforme expressões seguintes:

$$HMCR(gn) = HMCR_{min} + \frac{(HMCR_{max} - HMCR_{min})}{NI} * gn \quad (2)$$

$$PAR(gn) = PAR_{max} * e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{PAR_{min}}{PAR_{max}}\right) * gn}{NI}\right)} \quad (3)$$

$$BW(gn) = BW_{max} * e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{BW_{min}}{BW_{max}}\right) * gn}{NI}\right)} \quad (4)$$

Em que:

$NI$  – número máximo de iterações;

$gn$  – iteração atual.

As variáveis do problema de otimização são as espessuras dos três troços, o diâmetro da secção da base e do topo da torre. Estas variáveis são discretas e são apresentadas em listas de diâmetros e espessuras possíveis.

A função objetivo corresponde a uma função de minimização da massa da torre, ainda que é adicionada uma parcela de penalização, caso a estrutura não respeitar as condições de dimensionamento impostas.

Assim, a função objetivo é definida pela Eq.(5) e a parcela de penalização é definida pela Eq.(6).

$$\text{Minimize } \varphi(x) = \text{Massa}(x) + \text{Penalty}(x) \quad (5)$$

$$\text{Penalty}(x) = 10000 * \text{ratio\_max} + 5000 * \text{ratio\_mean} \quad (6)$$

Em que:

$\text{Massa}(x)$  representa a massa total da estrutura;

$\text{Penalty}(x)$  – a penalização do peso da estrutura, sendo que é nula quando a solução verifica todas as condições impostas;

$\text{ratio\_max}$  – rácio máximo dos critérios de penalização;

$\text{ratio\_mean}$  – média dos rácios dos critérios de penalização.

Informações adicionais relativamente ao definição dos critérios de penalização são apresentadas em [4].

## 3. Organização e pressupostos da ferramenta de cálculo

Ao longo do processo de desenvolvimento da ferramenta, procurou-se que a mesma fosse eficiente e modular, que permitisse encadear de uma forma clara o processo de dimensionamento.

Assim, a ferramenta de cálculo desenvolvida é constituída por 7 módulos principais, que são responsáveis por:

- Introdução de dados realizada através de uma folha de Excel;
- Quantificação da ação do vento na direção longitudinal;
- Verificação da segurança em ELU e ELS na direção da propagação do vento;
- Verificação de suscetibilidade ao desprendimento de vórtices e à ovalização;
- Determinação da amplitude máxima de vibração na direção transversal através da análise dinâmica realizada na OpenSeesPy;
- Dimensionamento do TMD;
- Otimização estrutural.

Importa referir os pressupostos e as simplificações adotados ao longo do desenvolvimento da ferramenta.

- As secções transversais de torre podem ser circulares ou poligonais de 18 lados.
- A verificação da resistência das secções transversais será realizada em regime elástico, ou seja, serão consideradas apenas secções da Classe 1, 2 ou 3. Sendo que a classificação das secções será feita de acordo com a classificação apresentada em [11], uma vez que esta é feita para estruturas com igual combinação de esforços atuantes - flexão composta, com cargas axiais baixas.
- Optou-se por não realizar a verificação da segurança à encurvadura, visto que, as cargas axiais atuantes neste tipo de estruturas são muito baixas e não influenciam a estabilidade da estrutura.
- Eventuais aberturas no fuste da torre para a portinhola ou passagem de cabos e escadas exteriores não são tidas em conta.
- Admitiu-se que as torres são constituídas por 3 troços, unidos rigidamente por flanges aparafusadas nas extremidades de cada troço, sendo que os comprimentos destes são fornecidos pelo utilizador.
- Nas análises dinâmicas realizadas para obter as amplitudes de vibração induzidas por desprendimento de vórtices considera-se apenas a contribuição do primeiro modo de vibração.

Na Fig. 1 apresenta-se o fluxograma da ferramenta desenvolvida.

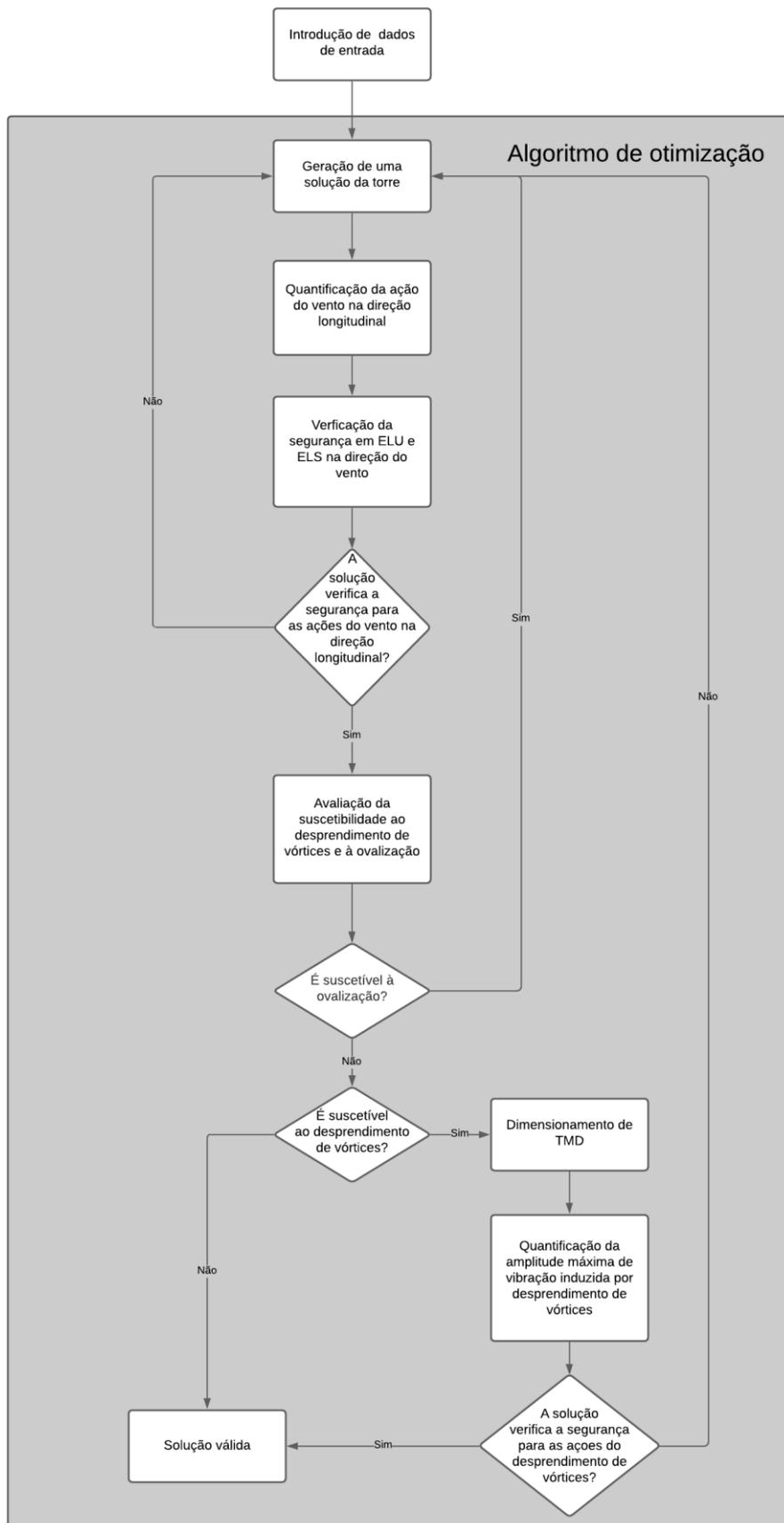


Fig. 1: Fluxograma da ferramenta de cálculo

## 4. Caso de estudo

### 4.1 Descrição da estrutura

A torre em estudo tem 23.2 m de altura e é constituída por 3 troços, unidos rigidamente por flanges aparafusadas nas extremidades de cada troço, de 9.2m, 9.0m e 5.0m de altura. Optou-se por dimensionar soluções com seções transversais poligonais de 18 lados.

A ação do vento é caracterizada para a uma rugosidade do terreno do tipo “II” e a zona de vento “B”, de acordo com a EC1-1-4[3]. A torre é considerada de Classe de importância 2.

Considerou-se a existência de uma antena de telecomunicações no topo da torre, com a área de 2 m<sup>2</sup>, a massa de 335 kg e o coeficiente de força igual a 1.2.

Para determinar o valor do decremento logarítmico estrutural considerou-se o Quadro F.2 do EC1-1-4[3]. Assim, o valor adotado é 0.012, que corresponde a uma chaminé de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior.

O classe de aço considerado é S 355, o módulo de elasticidade de 210 GPa e a massa volúmica de 7850 kg/m<sup>3</sup>.

### 4.2 Primeira solução – Torre não suscetível ao desprendimento de vórtices

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos recorrendo à ferramenta desenvolvida: as espessuras, os diâmetros da base e do topo de cada troço.

**Tabela 1:** Resultados do dimensionamento da torre não suscetível ao desprendimento de vórtices

Troço	Espessura (mm)	Diâmetro base (mm)	Diâmetro topo (mm)
1	12	2320	2118
2	12	2118	1912
3	12	1912	1800

A massa total da torre é de 14087 kg e a frequência natural da vibração  $f$  é de 4.25 Hz.

### 4.3 Segunda solução – Torre com TMD

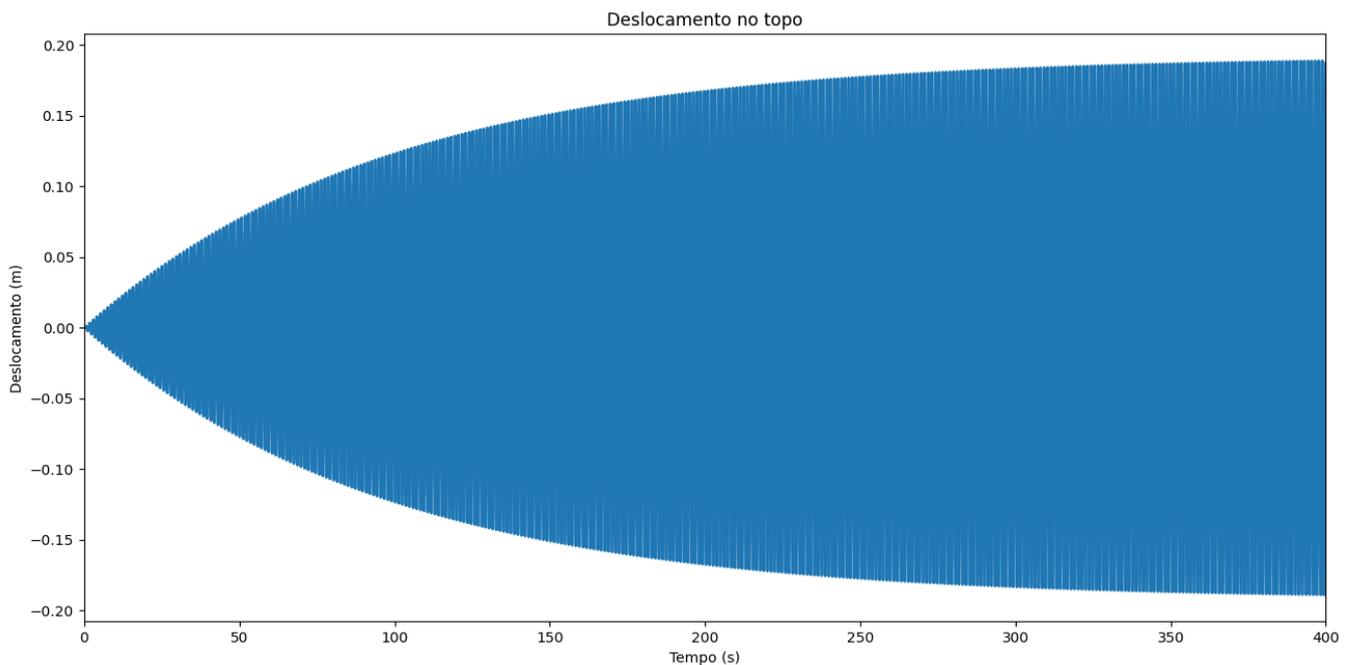
As propriedades da segunda torre são representadas na Tabela 2.

**Tabela 2:** Resultados do dimensionamento da torre com TMD

Troço	Espessura (mm)	Diâmetro base (mm)	Diâmetro topo (mm)
1	4	660	598
2	4	598	535
3	4	535	500

A massa total da torre é de 1624 kg, a frequência natural da vibração  $f$  é de 0.86 Hz.

Procedeu-se ao cálculo da amplitude máxima de vibração da torre, antes da instalação do TMD, devido ao desprendimento de vórtices, sendo que o resultado desta análise está representado na figura seguinte:



**Fig. 2:** Deslocamento no topo da estrutura sem TMD

A amplitude máxima de vibração obtida é igual a 18.9 cm. Este valor é muito superior ao valor limite de 6.6 cm ( $0.1 \cdot D_{base}$ ), ou seja, como seria expectável, é necessário instalar um TMD para mitigar estas vibrações.

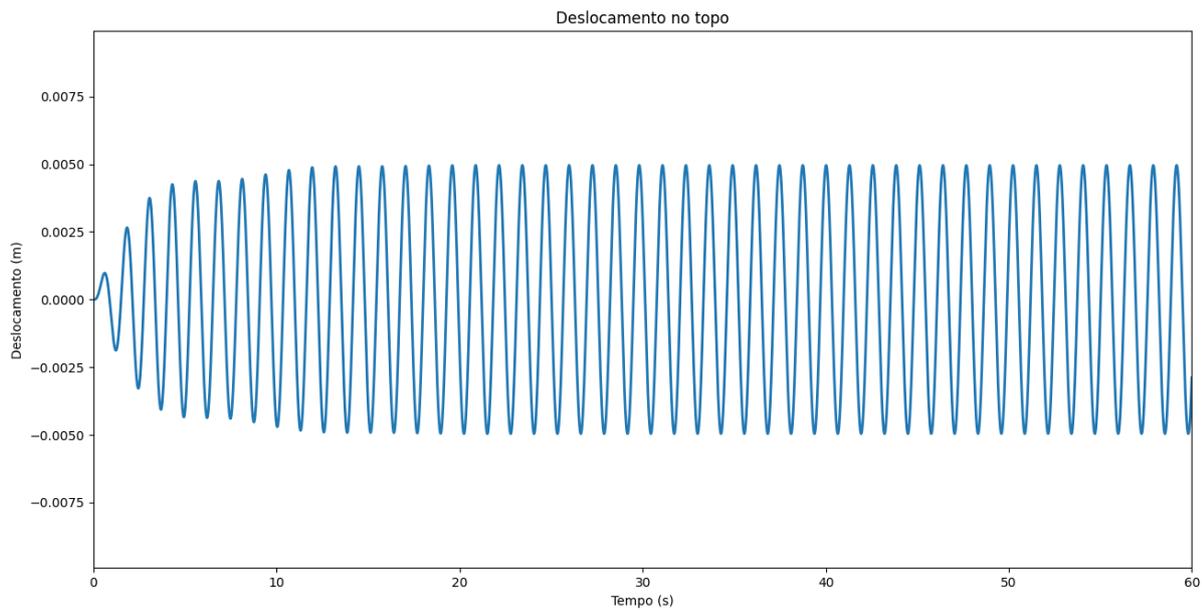
Assim, na Tabela 3 apresentam-se as propriedades do TMD dimensionado e na Fig. 3 e Fig. 4 representam-se o deslocamento do topo da torre após instalação do TMD e o deslocamento do próprio TMD, respetivamente.

**Tabela 3:** Propriedades do TMD

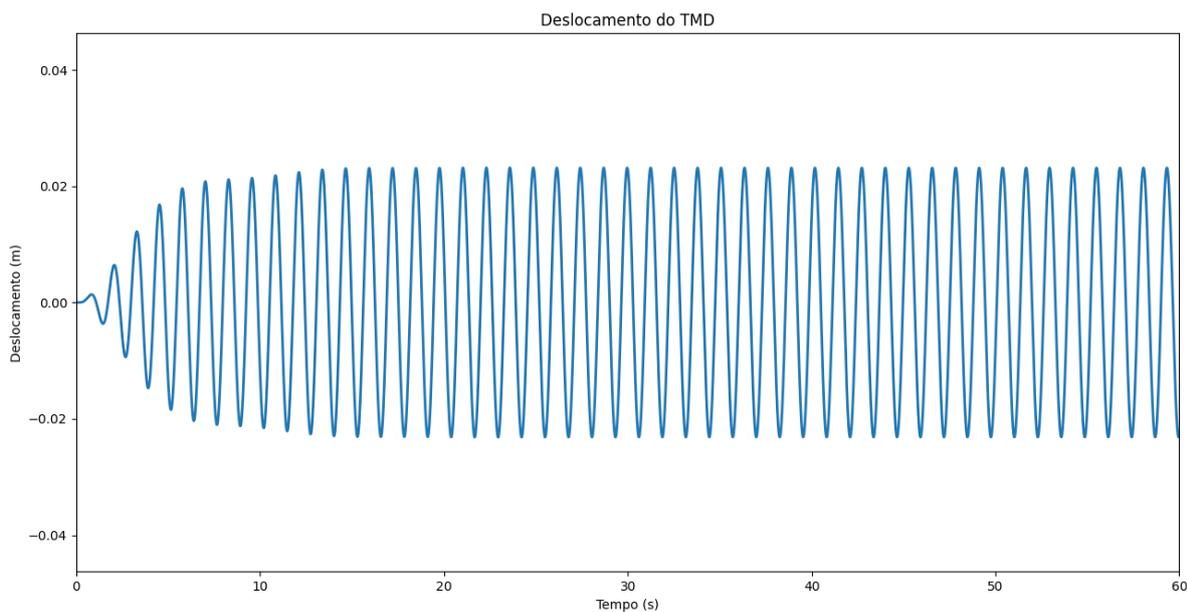
$\mu$	0.025
<b>Massa do TMD (kg)</b>	15.3
<b>Rigidez do TMD (N/m)</b>	424.3
<b>Amortecimento do TMD (N*s/m)</b>	15.0

Destaca-se que a instalação do TMD alterou a frequência natural da estrutura, passando esta a ser igual a 0.78 Hz.

Após a instalação do TMD a amplitude máxima de vibração da torre é de 0.5 cm, demonstrando assim a elevada eficácia de TMDs. Assim, o deslocamento máximo de topo foi reduzido de 18.9 cm para 0.5 cm, verificando agora a segurança em ELS para a ação de desprendimento de vórtices –  $0.5 \text{ cm} < 6.6 \text{ cm}$ .



**Fig. 3:** Deslocamento no topo da estrutura após a instalação do TMD



**Fig. 4:** Deslocamento do TMD

#### 4.4 Comparação das soluções geradas

Dos resultados anteriormente apresentados é possível verificar, que como esperado, a solução de torre não suscetível ao desprendimento de vórtices é uma torre muito mais rígida e conseqüentemente mais pesada quando comparada com a solução em que as vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices são mitigadas através da instalação de um TMD.

Apesar de nesta versão da ferramenta não ser possível efetuar a comparação em termos económicos das soluções geradas, é evidente que a solução da torre com TMD é a solução mais

sustentável, visto que esta permite poupar 90% do material necessário para a construção da primeira solução.

O elevado peso da torre não suscetível ao *vortex shedding* demonstra que o critério de não suscetibilidade a este fenómeno estabelecido no EC1-1-4[3] é muito exigente e conduz a soluções pouco sustentáveis.

Importa referir que esta diferença no peso é explicada pelo facto destas soluções serem os cenários extremos, sendo que existe uma terceira solução, que não foi implementada nesta versão da ferramenta, que consiste numa torre suscetível ao desprendimento de vórtices, mas com amplitudes de vibração suficientemente baixas para verificar a segurança à fadiga, sem necessidade de instalação de TMD.

## 5. Conclusão

Este artigo teve com objetivo principal apresentar uma nova ferramenta informática de cálculo capaz de realizar o dimensionamento automático e otimizado de torres tubulares de telecomunicações sujeitas a ações gravíticas e do vento.

O caso do estudo apresentado permitiu demonstrar a eficácia de TMDs na redução das vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices e a poupança de quase 90 % do aço em comparação com uma solução não suscetível ao desprendimento de vórtices.

Ficou demonstrado ao longo do artigo que a utilização da ferramenta é muito útil, pois permite ao projetista obter, rapidamente, duas soluções pré-dimensionadas da torre.

## Referências

- [1] “The OpenSeesPy Library — OpenSeesPy 3.2.2.9 documentation.”; Disponível em: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/stable/> .
- [2] OpenSEES: Open System for Earthquake Engineering Simulation. Berkeley,CA, 2006.
- [3] CEN, NP EN 1991-1-4, Eurocódigo 1 – Ações em estruturas – Ações gerais Parte 1-4: Ações do vento. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [4] A. Taigildin, Dimensionamento Otimizado de Torres de Telecomunicações. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2021.
- [5] J. Connor and S. Laflamme, Structural motion engineering, vol. 9783319062. Springer, 2014.
- [6] J. P. Den Hartog, “Mechanical Vibrations - Third edition.” McGraw-Hill Book Company, INC, New York, p. 489, 1947.
- [7] CEN, EN 1993-3-2, Eurocode 3 – Design of steel structures - Part 3-2: Towers, masts and chimneys - Chimneys. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [8] S. O. Degertekin, “Optimum design of steel frames via harmony search algorithm,” Stud. Comput. Intell., vol. 239, pp. 51–78, 2009
- [9] M. Mahdavi, M. Fesanghary, and E. Damangir, “An improved harmony search algorithm for solving optimization problems,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 188, no. 2, pp. 1567–1579, May 2007.
- [10] V. Kumar, J. K. Chhabra, and D. Kumar, “Parameter adaptive harmony search algorithm for unimodal and multimodal optimization problems,” *J. Comput. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 144–155, Mar. 2014.
- [11] CENELEC, EN 50341: Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV - Part 1: General requirements - Common specification, Brussels: European Committee for Standardization, 2001.