



ANÁLISE MODAL EM AEROGERADORES OFFSHORE CONSIDERANDO A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

Camilla Mahon Campello de Souza

Paulo Marcelo Vieira Ribeiro

camilla.mahon@ufpe.br

Paulo.vribeiro@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Civil

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50740-530, Recife, Pernambuco, Brasil.

Abstract. *Offshore Wind Turbines are very sensitive structures due to their slenderness nature and because their natural frequencies are close to the excitation spectrum. Modal analysis in the project phase is important in order to minimize undesirable effects and avoid failure. With this in mind, two scenarios are proposed to describe the problem: a beam with top mass, elastic end supports, water added mass and another one, more complete, considering tower-foundation interaction. A modal analysis is performed for both cases, in which the natural frequencies are found. For the first case, an analytical solution is proposed, in which a fourth order PDE is solved considering the effects of the water, the top mass and the elastic end supports. Also, a numerical solution using a MATLAB routine, based on the Finite Element Method is suggested, and comparisons between the two methods are presented. With regard to the second approach, a numerical analysis is conducted in MATLAB, and its results are compared to the ones obtained by SAP2000. Also, is suggested a procedure that reduces the scenario with the foundation to the one with the elastic supports only, considering three types of springs: translational, rotational and cross-coupling. Comparisons between the two models are showed and important differences regarding the vibration modes of both models are discussed using data from a real Offshore Wind Turbine.*

Keywords: *Offshore Wind Turbines, Natural Frequencies, Dynamics, Finite Element Method.*

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por fontes de energia renováveis, parques eólicos *offshore* têm sido construídos em alguns lugares do mundo. O Brasil mostra grande potencial na geração de energia eólica e a modalidade *offshore* pode ser uma boa opção para a crescente demanda de energia, principalmente porque grande parte da população se concentra em áreas litorâneas (Oliveira, 2011).

As turbinas eólicas *offshore* são colunas esbeltas com rotor e pás em seu topo e que vibram devido a sua própria estrutura e a forças naturais externas. Essas turbinas são consideradas dinamicamente sensíveis, principalmente em baixas frequências, visto que suas frequências naturais dos primeiros modos de vibração são próximas das frequências de excitação. Assim, a estrutura deve ser projetada de tal forma que a sua faixa de frequências naturais não coincida com a banda das frequências das forças externas. Dessa forma, as análises modal e dinâmica dessas estruturas são fundamentais para garantir bom desempenho, estabilidade, segurança e para minimizar efeitos de ressonância indesejados. Ao se projetar aerogeradores, um aspecto relevante a ser considerado é o tipo de fundação, uma vez que o solo deixa a estrutura mais flexível do que ela seria sozinha. Consequentemente, a frequência natural do sistema é modificada pela interação solo-estrutura. Estima-se que, para águas de até 30m, a fundação do tipo monopilar é a mais usada (em torno de 75% dos casos), dado que são subestruturas baratas, fáceis de serem fabricadas e simples de se analisar (Zimri, 2016). A Fig. 1 a seguir mostra alguns tipos de fundações que podem ser utilizados em OWTs.

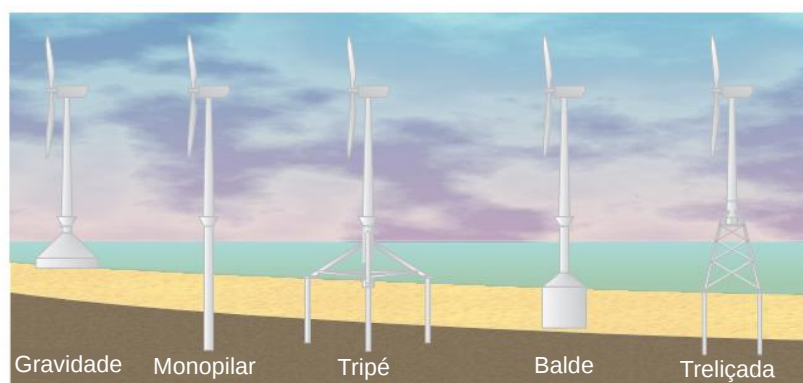


Figura 1 - Tipos de fundação utilizados em OWTs. Adaptado de: DAMGAARD, 2014.

O presente artigo apresenta uma análise modal de turbinas eólicas *offshore*, em que dois modelos são investigados: o primeiro, OWT-AE, é de uma viga com apoio elástico na base, massa na ponta e com fluido a certa altura; o segundo, OWT-SE, corresponde ao problema anterior com a inclusão dos efeitos da interação solo-estrutura, produzidos no conjunto formado por torre e fundação monopilar. Para o primeiro modelo, com o auxílio do *software* Maple, é fornecida uma solução analítica baseada nos trabalhos de Wu e Hsu (2006), e um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos desenvolvido em MATLAB. Para o segundo modelo é feita uma análise numérica utilizando um código desenvolvido em MATLAB, cujos resultados são comparados aos de uma simulação realizada no SAP2000. Comparações de resultados de análise modal são feitas para os dois modelos e ao final é realizada uma variação de parâmetros do solo, indicando como estes podem alterar as

frequências naturais da estrutura. A Fig. 2 a seguir apresenta os dois modelos mencionados e os parâmetros físicos associados.

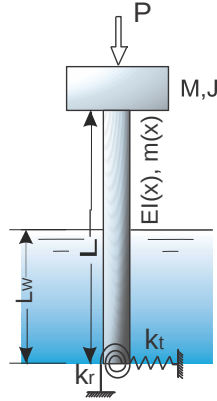


Figura 2a – Modelo OWT-AE (Apoio Elástico).

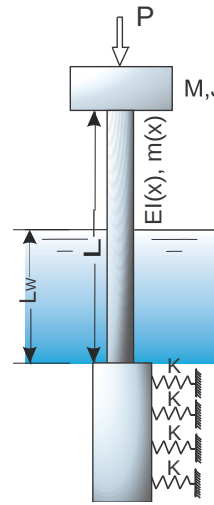


Figura 2b - Modelo OWT-SE (Solo-Estrutura).

2. SOLUÇÃO ANALÍTICA PROPOSTA PARA O MODELO OWT-AE

Inicialmente, é feita uma análise para o primeiro modelo (Fig. 2a). Considera-se aqui uma torre idealizada por uma viga que possui rigidez $EI(x)$ e massa distribuída $m(x)$. A variável x representa a coordenada espacial da viga, que possui comprimento total L . Existe uma força transversal $f(x, t)$ que varia com a posição e com o tempo e a resposta a essa força é a deformação da viga denotada por $v(x, t)$. A equação que descreve o movimento é mostrada a seguir (Clough e Penzien, 2003):

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(P(x) \frac{\partial v(x, t)}{\partial x} \right) + m(x) \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = f(x, t) \quad (1)$$

A Eq. (1) acima é a equação diferencial parcial que descreve o movimento de uma viga. O fato de parte da estrutura estar envolvida por água produz alterações em suas frequências naturais (Moll et al, 2010). A estratégia de resolução do problema é baseada em Wu e Hsu (2006), em que a análise na viga será dividida em duas: uma para a parte submersa (considerando uma massa de água adicionada) e outra para a viga “seca”. Para a simplificação do problema vamos considerar a rigidez EI e a massa distribuída m da viga como sendo constantes ao longo de seu comprimento. Para simplificação da análise, considera-se $P(x) = 0$. Para a parte acima da água, a massa distribuída é igual a ρA (em que ρ é a densidade da viga e A é a área da seção transversal) e para a submersa, a massa corresponde a $(\rho + \rho_w)A$, sendo ρ_w a densidade da água. Para o cenário de vibração livre, $p(x, t) = 0$. Tendo em vista estas observações, da Eq. (1) tem-se:

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + (\rho + \rho_w)A \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq L_w, \quad (2a)$$

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad L_w \leq x \leq L, \quad (2b)$$

Em que L_w é a altura da coluna d'água. As equações acima podem ser resolvidas por separação de variáveis, em que cada parcela é igualada a uma constante. Dessa forma, se obtém uma solução dependente apenas do espaço e outra apenas do tempo. Assim, tem-se:

$$\Phi_1^{iv}(x) - a^4 \Phi_1(x) = 0, \quad (3a)$$

$$\Phi_2^{iv}(x) - a_w^4 \Phi_2(x) = 0, \quad (4a)$$

$$\ddot{y}_1(t) + \frac{a^4 EI}{\rho A} y_1(t) = 0, \quad (3b)$$

$$\ddot{y}_2(t) + \frac{a_w^4 EI}{(\rho + \rho_w)A} y_2(t) = 0. \quad (4b)$$

O índice “1” corresponde ao segmento da viga acima da água e o índice “2” à parte abaixo. Entretanto, apesar da análise ter sido feita separadamente para as partes da viga acima e abaixo d'água, as frequências naturais são as mesmas, visto que se trata do mesmo sistema. Por analogia ao sistema massa-mola, de (3b) e (4b), observa-se que a frequência natural do sistema ω é igual a:

$$\omega = \sqrt{\frac{a^4 EI}{\rho A}} = \sqrt{\frac{a_w^4 EI}{(\rho + \rho_w)A}}. \quad (5)$$

Os termos desconhecidos são as constantes a e a_w . Para encontrá-las, é necessário apenas resolver as equações (3a) e (4a), cujas soluções, considerando apenas a parte real são, respectivamente,

$$\Phi_1(x) = A_1 \sin(ax) + A_2 \cos(ax) + A_3 \sinh(ax) + A_4 \cosh(ax), \quad (6)$$

$$\Phi_2(x) = A_5 \sin(a_w x) + A_6 \cos(a_w x) + A_7 \sinh(a_w x) + A_8 \cosh(a_w x). \quad (7)$$

Da Fig. 2a, observa-se que a base da viga é composta por uma mola translacional e outra rotacional, simulando de forma simplificada os efeitos da fundação. No topo, tem-se uma massa aplicada de valor M e inércia rotacional J , simbolizando o rotor e as pás. Considerando que o momento fletor é dado por $EI \Phi''(x)$ e o esforço cortante por $EI \Phi'''(x)$, as condições de contorno do problema podem ser escritas pelas expressões a seguir:

$$\text{em } x = 0, \quad EI \Phi''_1(x) = k_r \Phi'_1(x), \quad (8a)$$

$$EI \Phi'''_1(x) = -k_t \Phi_1(x), \quad (8b)$$

$$\text{em } x = L_w, \quad \Phi_1(x) = \Phi_2(x), \quad (9a)$$

$$\Phi'_1(x) = \Phi'_2(x), \quad (9b)$$

$$\Phi''_1(x) = \Phi''_2(x), \quad (9c)$$

$$\Phi'''_1(x) = \Phi'''_2(x), \quad (9d)$$

$$\text{em } x = L, \quad EI \Phi''_2(x) = \omega^2 J \Phi'_2(x), \quad (10a)$$

$$EI \Phi'''_2(x) = -\omega^2 M \Phi_2(x). \quad (10b)$$

Um sistema de oito equações e oito incógnitas é formado: $[C][A] = 0$, em que C é a matriz dos coeficientes e A é a matriz das variáveis. Para uma solução não-nula, o determinante da

matriz dos coeficientes deve ser zero. Encontra-se então a equação característica, obtendo-se os valores para a constante a e, conseqüentemente, as frequências naturais da estrutura.

3. MODELOS NUMÉRICOS (OWT-AE e OWT-SE)

3.1. OWT-AE

Para a resolução deste problema, é proposto um código em MATLAB que tem por objetivo a discretização de uma viga e aplicações de restrições em suas extremidades de acordo com o problema. A rotina se inicia com a definição de alguns parâmetros, tais como as constantes de mola, as propriedades geométricas e físicas do fuste e a altura da água. Cada elemento, detalhado na Fig. 3 abaixo, possui dois nós, cada nó com dois graus de liberdade (rotação e translação).

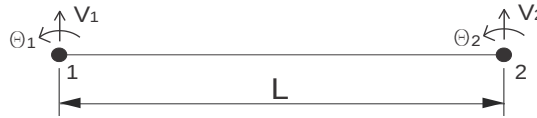


Figura 3 – Elemento de comprimento L e seus graus de liberdade associados.

Cada elemento tem a sua matriz de rigidez e de massa associada, que são definidas, respectivamente, por:

$$Ke = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} \frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} & -\frac{12}{L^2} & \frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 4 & -\frac{6}{L} & 2 \\ -\frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} & \frac{12}{L^2} & -\frac{6}{L} \\ \frac{6}{L} & 2 & -\frac{6}{L} & 4 \end{bmatrix},$$

$$Me = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}.$$

Após definir as matrizes de rigidez $[Ke]$ e de massa $[Me]$ do elemento, monta-se a matriz de rigidez global K_G , que leva a contribuição de todos os elementos, e a de massa global M_G , que tem a participação das massas associadas a cada nó. É importante ressaltar que K_G e M_G são matrizes quadradas, cujas dimensões dependem apenas da quantidade de nós e dos graus de liberdade associados a estes.

Para introduzir as condições de contorno do problema, aplicam-se as restrições necessárias nos elementos da diagonal principal da matriz global para que a rotação ou a translação de determinado nó tenha a característica desejada. Para o apoio elástico na base, os valores das constantes das molas translacional e rotacional são incorporados à diagonal principal da matriz de rigidez global no nó correspondente. Isto é análogo para a massa no topo, em que o valor da massa M e sua inércia rotacional J são adicionados a elementos correspondentes na diagonal principal da matriz de massa global. Após todas essas etapas, as matrizes globais são obtidas. Ao final, têm-se a matriz de autovalores e a de autovetores. Assim, as frequências naturais ω_j são obtidas tirando-se a raiz quadrada dos autovalores ω_j^2 .

3.2. OWT-SE

Embora o modelo OWT-AE se utilize de constantes de mola, vem à tona a seguinte questão: baseado em quais parâmetros será feita a escolha das constantes translacional e rotacional? O tipo de fundação e de solo deve influenciar nessa decisão. Dessa forma, apesar de uma análise inicial permitir uma escolha com molas aplicadas à base da superestrutura, também é possível um segundo modelo, o OWT-SE, onde a estaca participa ativamente.

O procedimento utilizado para o modelo OWT-SE é bem parecido ao que foi descrito para o OWT-AE, exceto que agora ao invés de apoios elásticos na base, tem-se uma estaca acoplada ao fuste. Para reproduzir a interação solo-estrutura, molas distribuídas por metro são colocadas ao longo da estaca na direção transversal. Isso é feito adicionando-se o valor das constantes da mola aos elementos da diagonal principal da matriz de rigidez global correspondente à estaca. Esses elementos da matriz representam o grau de liberdade translacional de nós que distam um metro entre si.

3.3. Considerações sobre a interação solo-estrutura

Neste segundo modelo, molas são aplicadas ao longo da estaca, de acordo com o módulo de reação horizontal do solo K . À medida que se avança na profundidade, a interação solo-estrutura torna-se mais rígida, no entanto aqui se admite a simplificação de que K é constante ao longo da profundidade. Além disso, é assumido que a ponta da estaca resiste aos esforços verticais. O objetivo é reduzir a estrutura composta pelo fuste e estaca ao sistema com molas aplicadas na base, em que toda a rigidez correspondente à fundação é convertida em apoios elásticos aplicados em um único ponto. A estratégia utilizada para isso é baseada em técnicas experimentais desenvolvidas por Bhattacharya e Adhikari (2011): neste experimento, utilizou-se um modelo reduzido da fundação, em que uma haste é inserida em uma amostra de solo. Para obtenção da constante de mola rotacional k_r , aplica-se um momento conhecido no topo da haste, deixando o objeto se estabilizar e mede-se a rotação. Para encontrar a constante de mola translacional k_t , o procedimento é análogo, em que aplica uma força no topo da estaca, medindo-se o deslocamento. O aparato utilizado é esquematizado a seguir.

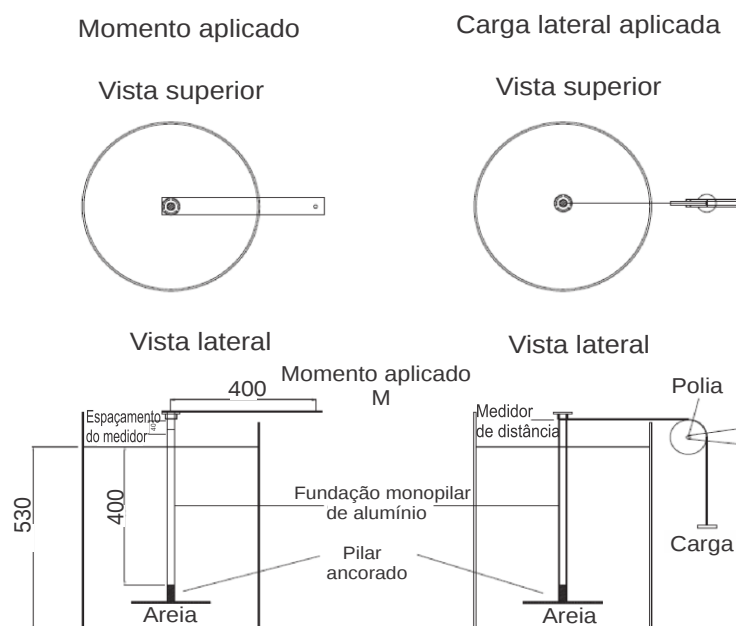


Figura 4 – Esquema do aparato utilizado para a medição de k_r e k_t . Adaptado de: BHATTACHARYA et al, 2011.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Validação do modelo OWT-AE

Nos tópicos anteriores, um método analítico e um método numérico foram sugeridos para a resolução do problema referente à estrutura com apoios elásticos na base, massa na ponta e lâmina d'água. Para comparação, as dimensões e propriedades físicas são retiradas de Wu (2006): $L=15\text{m}$; $L_w=7,5\text{m}$; $A=0,070686\text{m}^2$; $I=0,00039760\text{m}^4$; $E=2,068 \times 10^{11}\text{N/m}^2$; $M=832.3257\text{kg}$; $J=187273,2833\text{kgm}^2$, $k_r=5481686,4814\text{N/m}$, $k_t=24363.0510\text{Nm/rad}$, $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$ e $\rho=7850\text{kg/m}^3$. Na Tabela 1 a seguir é feita uma comparação entre as soluções analítica (exata) e numérica. Os resultados encontrados por Wu (2006) também são mostrados.

Tabela 1: Comparação entre a solução analítica e numérica para o modelo OWT-AE.

Frequências naturais ω_i (rad/seg)				
Modo	Solução Analítica	Solução Numérica	Erro: analítica x numérica	Wu (2006)
1	1,33140	1,33115	0,01872%	1,32839
2	3,40974	3,40971	0,00099%	3,39042
3	13,91779	13,91775	0,00028%	13,96936
4	49,82228	49,82214	0,00029%	49,91881
5	119,38323	119,38328	0,00004%	119,48084

Na Tabela 1 acima se observa um erro muito pequeno quando se compara o desenvolvimento numérico à solução exata, mostrando que o método numérico desenvolvido é uma boa aproximação. Os valores encontrados por Wu (2006) mostram uma diferença maior (mas ainda assim próximo), pois em seu desenvolvimento, é considerada uma excentricidade da massa no topo, ou seja, o centro de gravidade da massa não coincide com a extremidade da viga. Esta excentricidade é desconsiderada no presente artigo.

4.2. Análise do modelo OWT-SE

Para o modelo OWT-SE, em que a fundação participa, um código foi desenvolvido em MATLAB e simulações foram realizadas no SAP2000. Na falta de uma solução analítica precisa que possa validar o modelo numérico, uma análise inicial é feita, comparando-se este com uma solução analítica de um modelo com a base fixa, massa na ponta e fluido a uma determinada altura, variando os valores dos módulos de reação horizontal do solo K. Utilizam-se valores hipotéticos para os parâmetros, mas com ordem de grandeza e proporções semelhantes à de casos reais. Os valores dos parâmetros utilizados são: $L_{fuste}=20\text{m}$; $L_{estaca}=10\text{m}$; $L_w=5\text{m}$; diâmetro_{fuste}=2m; $M=30000\text{kg}$; espessura_{fuste}=10mm; diâmetro_{estaca}=3m; espessura_{estaca}=30mm; $E=200\text{GPa}$; $\rho=7850\text{kg/m}^3$; $\rho_w=1000\text{kg/m}^3$; $J=0$ (aqui se assume que o ponto de conexão do sistema formado por pás e rotor é próximo ao eixo central da torre). A Tabela 2 a seguir apresenta a comparação, considerando apenas a frequência do primeiro modo de vibração.

Tabela 2: Comparação entre a solução numérica do sistema do modelo OWT-SE e a solução analítica de uma viga engastada.

Frequência do primeiro modo de vibração (Hz)				
Solução analítica (viga engastada)	Solução Numérica			
	K (N/m ²)	MATLAB	SAP2000	Erro: MATLAB x SAP
1,34877	10 ⁸	1,23082	1,23083	0,0008%
	10 ¹⁰	1,32867	1,32868	0,0007%
	10 ¹⁵	1,34578	1,34579	0,0007%

Observa-se da Tabela 2 que, à medida que a constante da mola distribuída aumenta, a frequência obtida pela solução numérica aproxima-se da analítica, o que era esperado, visto que o sistema se torna mais rígido. Além disso, constata-se que as frequências naturais do sistema que inclui a estaca são menores, confirmando, portanto, sua maior flexibilidade.

4.3. Investigação dos efeitos da interação solo-estrutura e aplicação a um caso real – OWT do tipo Lely A2

Considerando a metodologia apresentada anteriormente, pode-se reduzir o modelo que considera a torre e a fundação àquela que apenas considera molas na base do fuste, como mostrado na Fig. 5 a seguir.

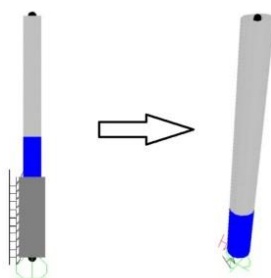


Figura 5 – Esquema do modelo OWT-SE, à esquerda, simplificando-se ao modelo OWT-AE, à direita.

Na Fig. 5, a seção em azul representa a massa de água adicionada. As molas para o modelo à esquerda representam a interação solo-fundação. A estratégia mencionada no tópico pode ser aplicada em um caso real, em que o coeficiente de reação do solo é conhecido e a frequência natural da estrutura foi medida in loco. O caso real aqui considerado para análise trata-se de uma turbina do parque eólico *Lely A2*, construído próximo aos Países Baixos. Os parâmetros utilizados foram os fornecidos por Zaaijer (2006) e Adhikari e Bhattacharya (2012), sendo eles: $L_{\text{fuste}}=41,5\text{m}$; $M=32000\text{kg}$; $L_w=4,6\text{m}$; $\text{diâmetro}_{\text{fuste}}=2,55\text{m}$; $\text{espessura}_{\text{fuste}}=12\text{mm}$; $E_{\text{fuste}}=286\text{GPa}$; $L_{\text{estaca}}=20,9\text{m}$; $\text{diâmetro}_{\text{estaca}}=3,7\text{m}$; $\text{espessura}_{\text{estaca}}=35\text{mm}$; $E_{\text{estaca}}=216\text{GPa}$ e $K=233\text{MPa}$. Baseando-se nas técnicas experimentais mencionadas no tópico anterior, uma força unitária é aplicada no topo da estaca para a obtenção da constante de mola translacional k_t e, separadamente, um momento é aplicado para encontrar a constante de mola rotacional k_r . Ao aplicar esses esforços, têm-se efeitos cruzados, ou seja, a força produz rotação e o momento produz deslocamento. Para englobar esses efeitos, uma terceira mola (acoplamento cruzado k_{tr}) pode ser obtida partindo do mesmo

princípio anterior. A seguir são mostradas duas tabelas: na primeira, têm-se as constantes de mola encontradas utilizando o método descrito e os valores calculados por Arany et al (2015). A segunda compara a frequência do modo fundamental encontrada com a medida in loco. Posteriormente, estão os modos de vibração e suas respectivas frequências naturais para os modelos OWT-AE e OWT-SE.

Tabela 3 - Constantes de molas obtidas através do método numérico.

Molas	MATLAB	SAP2000	Erro: SAP x MATLAB	Arany et al (2015)
k_r (GNm/rad)	22,223	22,06	0,7389%	20,6
k_t (GN/m)	0,95916	0,94429	1,5747%	0,83
k_{rt} (GN)	-3,3962	-3,3670	0,8672%	-2,22

Tabela 4: Frequências naturais do primeiro modo de vibração obtidas para uma turbina do parque eólico Lely A2.

Frequência natural f_1 para o aerogerador do tipo <i>Lely</i> (Hz)			
OWT-SE	Modelo OWT-AE	Valor medido no	Adhikari et al (2012)
0,7296	0,7034	0,634	0,7404

Os resultados obtidos são razoavelmente próximos do medido, com erros de 15,08% para o modelo OWT-SE e 10,95% para o modelo com o apoio elástico na base.

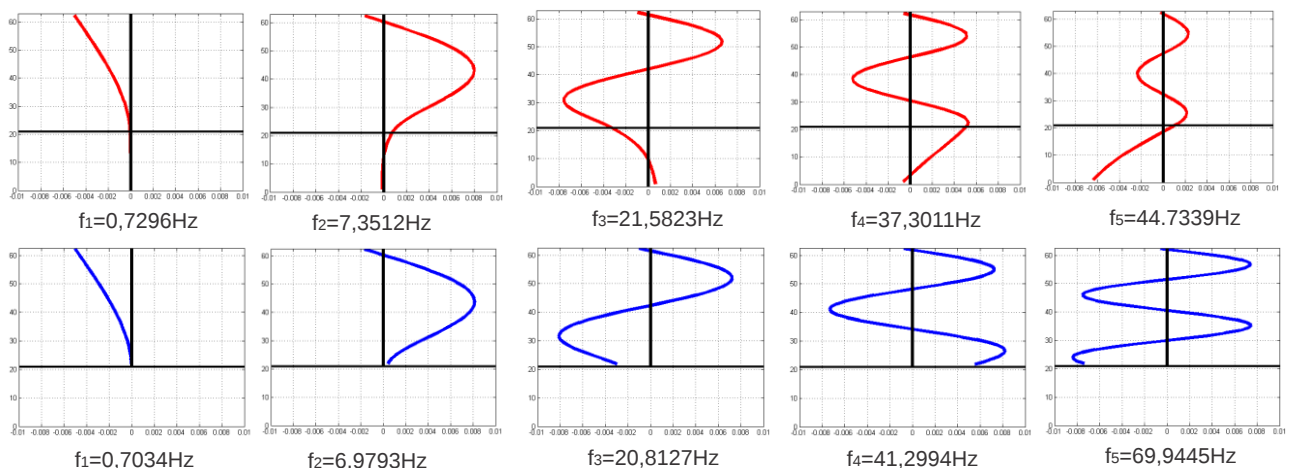


Figura 6 - Em cima, de vermelho, os cinco primeiros modos de vibração e suas frequências associadas para o modelo OWT-SE. O mesmo é mostrado para o modelo OWT-AE, de azul, em baixo.

Da Fig. 6 acima se observa um erro pequeno quando se compara a frequência do modo fundamental do OWT-SE com o do OWT-AE (apenas 3,6%) e de seus modos de vibração associados. No entanto, a convergência para o modo fundamental não garante que isto aconteça para os demais modos. Para o quinto, por exemplo, observa-se uma diferença de 56,36% e modos de vibração diferentes. Aqui, para os três primeiros modos, observa-se o modelo OWT-AE sendo mais rígido do que o OWT-SE. Isto vai de encontro ao esperado, em que a estaca deveria conceder mais flexibilidade ao sistema; no entanto isso pode ser explicado pelo fato de que o método para encontrar as constantes de mola não é tão preciso, já que não se leva em conta alguns efeitos não lineares da mola. De qualquer forma, à medida

que os modos avançam, o modelo OWT-AE se torna mais rígido e observa-se divergências entre os modelos. A convergência ou não entre os dois modelos varia de acordo com o tipo de solo, como pode ser observado pelo gráfico a seguir. Ele mostra a variação das frequências naturais dos primeiros dez modos de vibração para um aerogerador do parque *Lely A2* considerando um solo mais rígido e outro mais flexível do que o observado em *Lely*. Além disso, é investigado também o papel da massa da estaca.

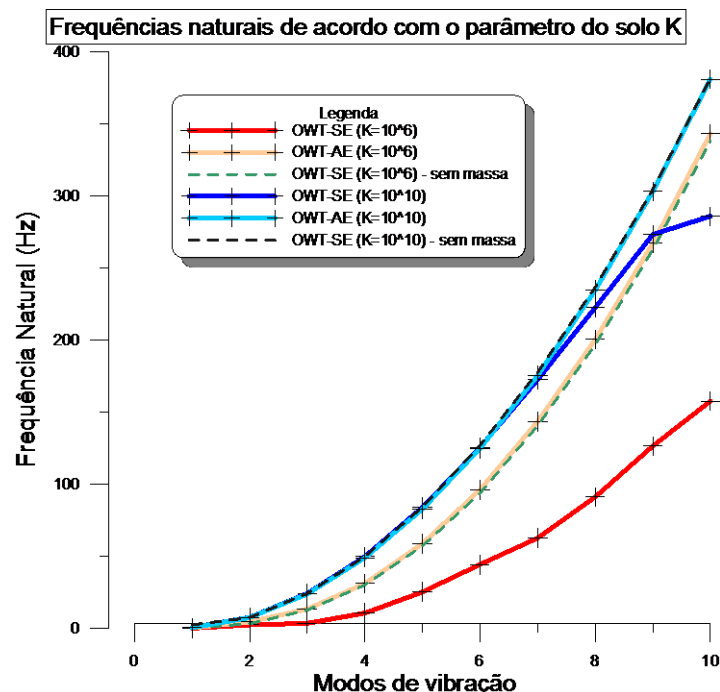


Figura 7 - Gráfico que expressa as frequências naturais de acordo com o tipo de solo.

Do gráfico acima se observa uma maior convergência nos valores das frequências para solos mais rígidos conforme os modos avançam, diferentemente do que acontece para os mais flexíveis. Pode-se notar ainda que, ao desprezar a massa da estaca, o modelo OWT-SE se aproxima bastante do OWT-AE, o que se conclui que a massa da estaca desempenha um importante papel na determinação das frequências naturais.

5. CONCLUSÕES

Foram apresentados dois modelos na tentativa de descrever o comportamento de aerogeradores *offshore*: o primeiro, OWT-AE, composto por uma haste com apoio elástico na base, massa na ponta e fluido incorporado; o segundo, OWT-SE, contemplando um fuste, subestrutura com mola distribuída, massa na ponta da viga e fluido a uma determinada altura. Para o OWT-AE foram propostas uma solução analítica e uma numérica, em que a segunda se aproxima bastante da solução exata, como observado. Para o OWT-SE, apenas soluções numéricas foram investigadas, em que comparam resultados utilizando-se o MATLAB e o SAP2000. Apesar de não existir uma formulação analítica que comprove o modelo de forma mais rigorosa, algumas comparações foram feitas e conclui-se que o procedimento possui uma aproximação razoável. Ademais, foi sugerido um método que faz a simplificação de um modelo ao outro, em que apenas se conhecendo o módulo de reação horizontal do solo, é possível obter as constantes de molas rotacional, translacional e acoplada para a base do fuste.

A vantagem de se utilizá-lo é que, conhecendo-se o módulo de reação do solo, as constantes das molas derivam diretamente do método numérico.

A partir de investigações dos modos de vibração de um aerogerador real, foram constatadas importantes diferenças a respeito dos dois modelos. Primeiramente, observou-se que, conforme os modos de vibração avançam, a diferença entre os valores das frequências e entre os modos aumenta, sendo o modelo OWT-SE mais flexível. Examinou-se também que a convergência entre os modelos depende das características do solo, sendo o solo mais flexível aquele que fornece valores mais distintos. Também foi observado que a massa da estaca representa uma importante influência na determinação das frequências. Dessa forma, o projetista deve tomar cuidado ao escolher o modelo apenas composto pela torre e molas na base para realizar a análise modal, pois este pode não ser tão realista dependendo do cenário em que se encontra. Somado a isto, se os modos divergirem rapidamente, diferenças importantes podem surgir na resposta dinâmica quando a excitação mobilizar frequências maiores que a fundamental. Para uma análise dinâmica posterior, o modelo OWT-SE é mais completo, uma vez que se podem levar em conta alguns efeitos dinâmicos na estaca.

6. REFERÊNCIAS

- Adhikari, S., Bhattacharya, S. 2012. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations. *Shock and Vibration*, vol. 19, pp. 37-56.
- Arany, L., Bhattacharya, S., Adhikari, S., Hogan, S. J., Macdonald, J. H. G. 2015. An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 74, pp. 40-45.
- Bhattacharya, S., Adhikari, S. 2011. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 805-816.
- Clough, R. W., Penzien, J. 2003. Dynamics of Structures. 3ª ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc. 2003.
- Moll, H. G., Vorpahl, F., Busmann, H. G. 2010. Dynamics of Support Structures for Offshore Wind Turbines in Fully-coupled Simulations - Influence of Water Added Mass on Jacket Mode Shapes, Natural Frequencies and Loads. *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition 2010*.
- Oliveira Filho, O. D. Q. 2011. Uma Metodologia Simplificada para Estimativa do Aproveitamento Eólico Offshore no Litoral Brasileiro. Estudo de Caso: Ilha de Itamaracá/PE. *Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco*.
- Wu, J. S., Hsu, S. H. 2006. A unified approach for the free vibration analysis of an elastically supported immersed uniform beam carrying on eccentric tip mass with rotary inertia. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 291, pp. 1122-1147.
- Zaaijer, M. B. 2010 Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines. *Applied Ocean Research*, vol. 28, pp. 45-57.
- Zimri, F. C. C. 2016. Review on monopile foundation for fixed offshore structure. *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 4, pp. 379-388.