



ANÁLISE MODAL DE TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE: MODELAGEM ANALÍTICA E NUMÉRICA

Carlos Vitor da Silva Sarmento

Paulo Marcelo Vieira Ribeiro

Engenheirovitor@hotmail.com

Paulo.vribeiro@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Civil

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária

50740-530 Recife-PE, Brasil

Abstract. Turbinas eólicas offshore (Offshore Wind Turbine-OWT) estão constantemente sujeitas às ações dinâmicas, sejam elas oriundas de forças do vento, correntes marítimas, maremoto, movimento do conjunto pás-rotor, entre outras. Desta forma, a análise dinâmica nas fases preliminares do projeto é de grande importância, objetivando a estimativa das frequências naturais para que seja possível manter a estrutura segura a fenômenos como a ressonância e fadiga. Neste trabalho a OWT foi considerada sobre fundação do tipo monopilar. A estrutura foi modelada analítica e numericamente através de cinco etapas, partindo de uma viga de referência, engastada e com massa no topo. Em cada nível adicional da análise uma variável foi inserida. O caso mais completo é dado por: Viga com fundação considerando a elasticidade do solo, estrutura parcialmente imersa no fluido (água), com massa na extremidade e carga aplicada axialmente. Devido à esta carga axial, oriunda dos equipamentos (motor, pás, etc), uma análise modal considerando o efeito prévio de compressão da estrutura foi realizada. Resultados foram obtidos analiticamente para os 3 casos estudados. Em seguida o método dos elementos finitos (MEF) foi empregado e as etapas foram validadas, tendo os resultados confirmados por: i) resultados analíticos, ii) simulações computacionais com o MEF e iii) Medidas reais da literatura. Desta forma o modelo simplificado se mostrou eficiente na análise preliminar das frequências naturais de OWT do tipo monopilar.

Keywords: *Aerogerador, Offshore, Analítico, Elementos finitos, Análise modal.*

1 INTRODUÇÃO

O vento sempre foi aliado do homem na obtenção de energia, seja ela através dos meios de transportes (embarcações à vela) ou até mesmo nos moinhos. Jamieson (2011) destaca moinhos de vento, ainda em operação no Reino Unido, construídos em 1628. O potencial energético proveniente das forças do vento proporciona uma alternativa para a obtenção de energia elétrica de forma limpa e com baixo impacto ambiental. Com isto tem aumentado a implantação de parques (fazendas) eólicos, verificado no potencial energético acumulado mundial, de acordo com a Fig. 1 (Sawyer e Dyrholm, 2017).

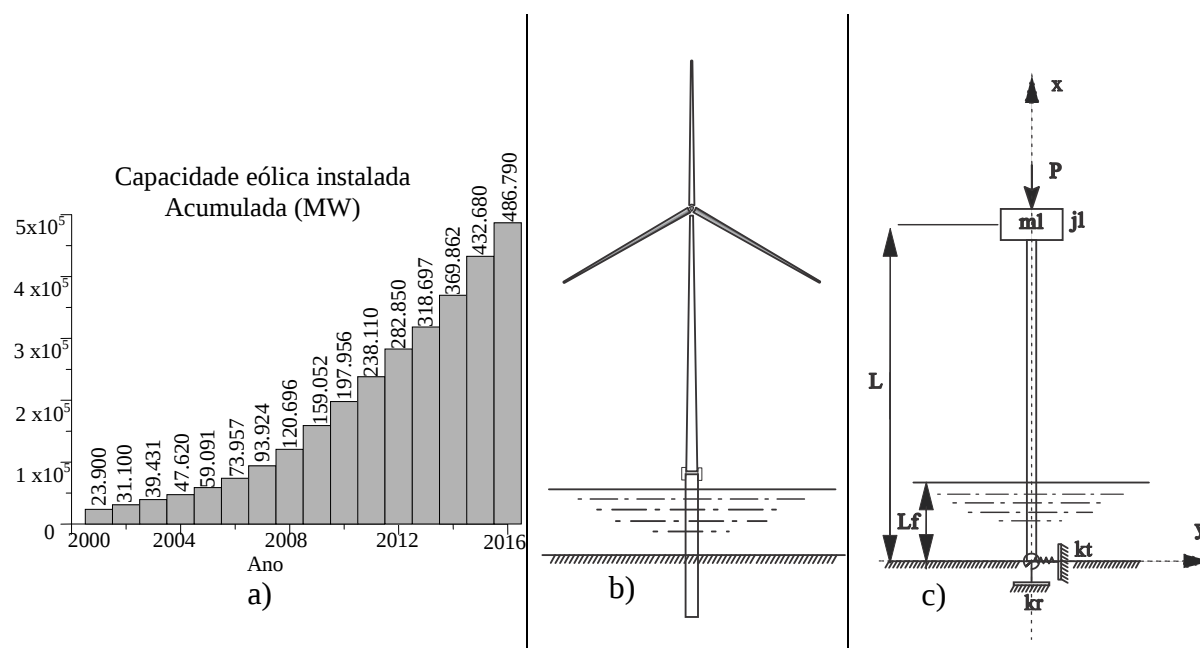


Figura 1. a-Potencial energético mundial acumulado entre 2001 e 2016. Sawyer e Dyrholm (2017); b- Offshore Wind Turbine-OWT; c- Modelo aplicado neste artigo.

O potencial apresentado na Fig. 1a representa os parques eólicos instalados em solo (onshore) e também afastados da costa (offshore). Destaca-se que a velocidade do vento pode ser maximizada se a rugosidade do piso for reduzida. Um possível cenário surge quando a superfície em questão é água e a região é isenta de obstáculos. Oceanos possuem grandes velocidades de vento e tornam-se a região propícia à obtenção de energia eólica através de turbinas offshore.

A Tabela 1 apresenta os 10 maiores parques eólicos instalados e também em fase de implantação. A partir desta tabela verifica-se o grande potencial energético destas fazendas. Outro destaque é em relação ao tipo de estrutura, onde verifica-se que a maioria (75%) é do tipo monopilar. Tal modelo é apresentado na Fig.1b.

De maneira geral, as ações em uma OWT variam com o tempo, como é o caso do vento, movimento das águas, rotação do motor e pás. Isto evidencia a necessidade de uma análise dinâmica.

Wu e Hsu (2006) modelaram uma turbina eólica offshore considerando a massa na ponta e sobre apoios flexíveis. Os autores compararam valores analíticos, numéricos (MEF) e experimentais encontrando erros próximos a: 1%, 5% e 8% para o 1º, 2º e 3º modo respectivamente.

Babilio e Lippiello (2011) apresentam a solução analítica para a estrutura com massa na ponta, inércia rotacional e sobre apoios flexíveis. Foram realizadas variações na carga aplicada, massa do topo, inércia rotacional e rigidez dos apoios.

Adhikari e Bhattacharya (2012) apresentam resultados analíticos para o OWT sobre apoios flexíveis com carga axial e massa na ponta. A inércia rotacional desta massa foi desprezada. Neste artigo, os coeficientes elásticos dos apoios foram obtidos através de dados dos solos. Os autores apresentam erros de, aproximadamente, 16% quando comparado a valores medido das turbinas reais.

Arany et al(2015) apresentam soluções analíticas para dez OWT instaladas. O modelo matemático considera a massa da extremidade e os apoios flexíveis com rigidez translacional, rotacional e cruzada. A inércia rotacional e carga aplicada axialmente foram desprezadas. As frequências apresentaram erro máximo de 3,2%.

Tabela 1. 10 Maiores parques eólicos Offshore- Em funcionamento e em implantação (4coffshore, 2017)

	Name	Potência Total (MW)	Local	Início da operação	Tipo de fundação
Em atividade	London Array	630	Reino Unido	2012	Monopilar
	Gemini Wind	600	Holanda	2017	Monopilar
	Gode Wind	582	Alemanha	2017	Monopilar
	Gwynt y Môr	576	Reino Unido	2015	Monopilar
	Greater Gabbard	504	Reino Unido	2012	Monopilar
	Anholt	400	Dinamarca	2013	Monopilar
	Bard Offshore 1	400	Alemanha	2013	Tripilar
	Global Tech	400	Alemanha	2015	Tripé
	West of duddon	389	Reino Unido	2014	Monopilar
	Walney	367,2	Reino Unido	2011	Monopilar
Instalações Futuras	Wind Farm East Anglia 1	714	Reino Unido	2020	Jacket
	Wind Farm Beatrice	588	Reino Unido	2019	Jacket
	Wind Farm Hohe See	497	Alemanha	2019	Monopilar
	Wind Farm HoRns Rev 3	406,7	Dinamarca	2020	Monopilar
	Wind Farm Arkona	385	Alemanha	2019	Monopilar
	Wind Farm Norther	369,6	Belgica	2019	Monopilar
	Wind Farm Rentel	309	Belgíca	2018	Monopilar
	Wind Farm Deutsche Bucht	252	Alemanha	2019	Monopilar
	Wind Farm Borkum				
	Trianel West II	203	Alemanha	2019	Monopilar
	Wind Kemi (Ajos)				
	Extension Project	189	Finlândia	2017	Ilha artificial

Na obtenção da resposta dinâmica, calculam-se os modos de vibração e frequências naturais. Estas frequências são uma propriedade intrínseca do sistema e desta forma devem ser mantidas em uma faixa afastada das frequência de excitação, objetivando reduzir os esforços dinâmicos causados por maiores amplitudes, evitando assim fenômenos como a ressonância. Desta forma surge a proposta deste artigo que é realizar a análise modal de estruturas monopilar por abordagem analítica e numérica, considerando a influência da estaca e permitindo estudar o comportamento dinâmico do conjunto: monopilar e OWT.

2 MODELO ANALÍTICO - OWT MONOPILAR

A Eq. (1) apresenta a equação diferencial parcial de movimento para uma viga com uma carga axial (P) aplicada e sujeita à uma força externa $p(x,t)$ conforme visto na Fig.1c. (Clough & Penzien, 1995).

$$EI v^{iv}(x,t) + \rho A v^{ii}(x,t) + P v^{ii}(x,t) = p(x,t) \quad (1)$$

Sabendo que as propriedades do material: Módulo de elasticidade(E), momento de inercia(I) e área da seção transversal(A) são constantes ao longo do comprimento (x) do monopilar. O fluido contribui com uma massa adicional à estrutura. A massa específica(ρ) do material em questão depende se a estrutura está imersa no fluido ($\rho = \rho_{owt} + \rho_{\acute{a}gua}$) ou se é um trecho acima da superfície da água ($\rho = \rho_{owt}$).

Todos os termos da Eq (1). podem ser divididos por EI . A força de excitação pode ser adotada como nula, $p(x,t)=0$, resultando em um movimento de vibração livre. A Eq.(1) pode ser reescrita indicando a derivada parcial conforme a Eq.(2):

$$v^{iv}(x,t) + \frac{\rho A}{EI} v^{ii}(x,t) + \frac{P}{EI} v^{ii}(x,t) = 0 \quad (2)$$

Considerando a propriedade dos materiais como constante, uma solução possível, por separação de variáveis, é apresentada na Eq.(3).

$$v^{iv}(x,t) = \phi(x)Y(t) \quad (3)$$

Onde uma solução para o termo espacial é dada por:

$$\phi_1(x) = A_1 \sin(\eta_1 x) + A_2 \cos(\eta_1 x) + A_3 \sinh(\eta_2 x) + A_4 \cosh(\eta_2 x) \quad (4)$$

$$\phi_2(x) = A_5 \sin(\eta_3 x) + A_6 \cos(\eta_3 x) + A_7 \sinh(\eta_4 x) + A_8 \cosh(\eta_4 x) \quad (5)$$

As Eqs. (4) e (5) apresentam funções trigonométricas obtidas através de manipulações das exponenciais existentes.

A Eq. (4) é responsável pela parte imersa no fluido e a Eq.(5) governa a parte seca. Nestas equações as constantes η_1 , η_2 , η_3 e η_4 guardam relação com a frequência natural, carga aplicada e propriedades da seção e são dadas através das Eqs. 6-10 respectivamente

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{P}{2EI} + \sqrt{\left(\frac{P}{2EI}\right)^2 + \frac{(\rho_{owt} + \rho_{\acute{a}gua})A\omega^2}{EI}}} \quad (6)$$

$$\eta_2 = \sqrt{-\frac{P}{2EI} + \sqrt{\left(\frac{P}{2EI}\right)^2 + \frac{(\rho_{owt} + \rho_{\acute{a}gua})A\omega^2}{EI}}} \quad (7)$$

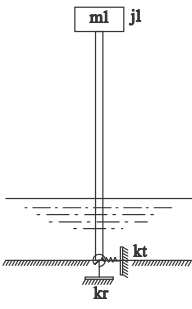
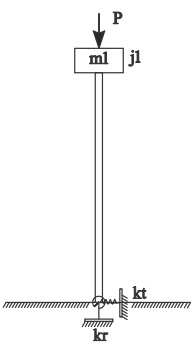
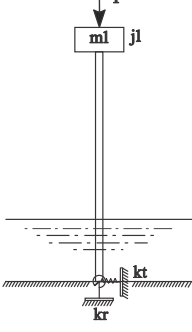
$$\eta_3 = \sqrt{\frac{P}{2EI} + \sqrt{\left(\frac{P}{2EI}\right)^2 + \frac{\rho_{owt}A\omega^2}{EI}}} \quad (8)$$

$$\eta_4 = \sqrt{-\frac{P}{2EI} + \sqrt{\left(\frac{P}{2EI}\right)^2 + \frac{\rho_{owt}A\omega^2}{EI}}} \quad (9)$$

As Eqs. 4 e 5 apresentam 8 (oito) constantes a serem obtidas no caso mais geral (A1-A8). A Tabela 2 apresenta as condições de contorno associadas a cada um dos modelos adotados.

Os parâmetros apresentados nesta tabela partem da Fig1.c, onde kt e kr representam a rigidez translacional e rotacional da fundação. O corpo no topo da estrutura tem massa $m1$ e inércia rotacional $j1$. L_f representa a altura do fluido e L a altura da estrutura da OWT.

Tabela 2. Condições de contorno dos modelos 01 a 03.

Modelo	Estrutura	Descrição	Condições de Contorno
01		Viga imersa em um fluido com molas (rotacional e translacional) na base, massa distribuída, massa na extremidade.	$EI\phi_1''(0) = kr\phi_1'(0)$ $EI\phi_1'''(0) = -kt\phi_1(0)$ $\phi_1(L_f) = \phi_2(L_f)$ $\phi_1'(L_f) = \phi_2'(L_f)$ $\phi_1''(L_f) = \phi_2''(L_f)$ $\phi_1'''(L_f) = \phi_2'''(L_f)$ $EI\phi_2''(L) = -w^2\phi_2'(L)[j1 + m1e] + w^2m1e\phi_2(L)$ $EI\phi_2'''(L) = -w^2m1[\phi_2(L) + \phi_2'(L)e]$ Wu e Hsu (2016)
02		Viga com molas (rotacional e translacional) na base, massa distribuída, massa na extremidade e carga axial.	$EI\phi''(0) = kr\phi'(0)$ $EI\phi'''(0) = -kt\phi(0) - P\phi'(0)$ $EI\phi''(L) = w^2\phi'(L)[j1 + m1e] + w^2m1[e\phi(L) + e\phi'(L)]$ $EI\phi'''(L) = -P\phi'(L) - w^2m1[\phi(L) + \phi'(L)e]$ Babilio e Lippiello (2011)
03		Viga imersa em um fluido com molas (rotacional e translacional) na base, massa distribuída, massa na extremidade e carga axial.	$EI\phi_1''(0) = kr\phi_1'(0)$ $EI\phi_1'''(0) = -kt\phi_1(0) - P\phi_1'(0)$ $\phi_1(L_f) = \phi_2(L_f)$ $\phi_1'(L_f) = \phi_2'(L_f)$ $\phi_1''(L_f) = \phi_2''(L_f)$ $\phi_1'''(L_f) = \phi_2'''(L_f)$ $EI\phi_2''(L) = w^2\phi_2'(L)[j1 + m1e] + w^2m1[e\phi_2(L) + e^2\phi_2'(L)]$ $EI\phi_2'''(L) = -P\phi_2'(L) - w^2m1[\phi_2(L) + \phi_2'(L)e]$

Uma simplificação adotada neste trabalho foi de considerar a excentricidade nula, ou seja a massa no topo da estrutura (Fig.1c) é toda concentrada em seu último nó (localizado em $x=L$). Tal característica também foi admitida no modelo numérico.

Um sistema de equações indicado de forma compacta pela Eq.(10) surge com a aplicação das condições de contorno da Tabela 2. A presença de fluido (modelo 1 a 3) conduz a uma

matriz de coeficientes de ordem 8. No modelo 2 a ordem é reduzida para 4. Neste trabalho, os coeficientes da matriz serão omitidos devido à sua dimensão e complexidade.

$$[K_c] A_n = 0 \quad (10)$$

O sistema admite solução não-trivial apenas se o determinante de $[K_c]$ for nulo.

$$\det[K_c] = 0 \quad (11)$$

Clough(1999) destaca que a Eq.(11) tem solução transcendental, e mesmo se tratando de uma solução analítica, não é obtida trivialmente. Aqui será utilizado o artifício computacional (Software Matlab) para a obtenção das frequências naturais ω para a estrutura em questão.

Para o resultado analítico dos modelos de calibração (01 e 02), procedimento similar aos passos descritos anteriormente foi realizado (Eqs.1 à 16). No modelo 01 a carga axial é nula ($P=0$) e no modelo 02 não há a presença do fluido ($L_f=0$ e $\rho=\rho_{owt}$). As condições de contorno foram aplicadas conforme já apresentadas na Tabela 2. Entretanto destaca-se que a Eq.(11) retorna aos modelos anteriores, sendo necessário apenas anular tais parâmetros.

O modelo de referência abordado neste trabalho, uma viga engastada com massa na extremidade, permite o cálculo da frequência natural (ω_{mr}) através de formulação mais simples. Tal fundamentação parte da Eq.(12), onde a frequência é dada em Hz:

$$\omega_{mr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

Sendo a rigidez equivalente (k) e a massa(m) da estrutura dadas pelas Eq.(13-14).

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (13)$$

$$m = m1 + \alpha m_{owt} \quad (14)$$

Onde $m1$ é a massa na ponta da estrutura e m_{owt} é a massa de toda a estrutura (fuste). O fator α é apresentado por diferentes autores. A Tabela 3 apresenta a frequência, utilizando formulações simplificadas para o modelo de referência.

Tabela 3. Formulação para obtenção de frequência no modelo de referência

Autor	Frequência (Hz)
Van der Tempel e Molenaar (2011)	$\omega_{mr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3,04EI}{L^3(m1+0,227m_{owt})}}$
Blevin (2016)	$\omega_{mr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m1+0,24m_{owt})}}$
Arany et al (2015)	$\omega_{mr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m1+\frac{33}{140}m_{owt})}}$

3 MODELO NUMÉRICO - OWT MONOPILAR

Análises adicionais foram realizadas via o método dos elementos finitos (MEF). Nos modelos (Tabela 2) empregados neste trabalho, foi utilizado o elemento de barra, unidimensional com 2 graus de liberdade por nó (translacional e rotacional). A obtenção das

frequências naturais via MEF não requer grande custo computacional, com a utilização de uma rotina nativa do MATLAB para cálculo de autovalores e autovetores.

A forma geral da equação de movimento é apresentada na Eq.(15).

$$[M]\ddot{U}(t) + [C]\dot{U}(t) + [K]U(t) = F(t) \quad (15)$$

Entretanto, conforme já destacado aqui, simplificações foram realizadas, desta forma o sistema é considerado não amortecido ($[C]=0$) em vibração livre ($F(t)=0$), logo resulta:

$$[M]\ddot{U}(t) + [K]U(t) = 0 \quad (16)$$

Com isto, as frequências da estrutura são obtidas através do problema de autovalores:

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0 \quad (17)$$

Logo, o problema consiste em obter as matrizes globais (toda a estrutura): i) Rigidez $[K]$ e ii) Massa $[M]$. A matriz de rigidez $[K_e]$ e massa $[M_e]$ do elemento de barra são apresentadas através das Eqs.(18) e (19). Foi utilizada a matriz de massa consistente.

$$[K_e] = \frac{EI}{L} \begin{bmatrix} 12/L^2 & 6/L & -12/L^2 & 6/L \\ 6/L & 4 & -6/L & 2 \\ -12/L^2 & -6/L & 12/L^2 & -6/L \\ 6/L & 2 & -6/L & 4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[M_e] = \frac{\rho A L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

A matriz de rigidez geométrica (K_g) aplicada aos modelos 02 e 03 incorpora os efeitos de compressão prévia provocados pela carga axial. Esta matriz é apresentada através da Eq.(20) (Willems e Lucas Junior, 1978).

$$[k_g] = \frac{P}{L} \begin{bmatrix} 6/5 & L/10 & -6/5 & L/10 \\ L/10 & 2L^2/15 & -L/10 & -L^2/30 \\ -6/5 & -L/10 & 6/5 & -L/10 \\ L/10 & -L^2/30 & -L/10 & 2L^2/15 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Nesta equação, a variável P é a carga aplicada axialmente na extremidade da estrutura, oriunda do peso próprio do equipamento.

Nos apoios são inseridas as rigidezes, abordadas de 3 diferentes métodos, onde o primeiro baseia na parte enterrada do monopilar, atuando como uma estaca, considerando a flexibilidade do solo atuando como molas horizontais (Fig.2a).

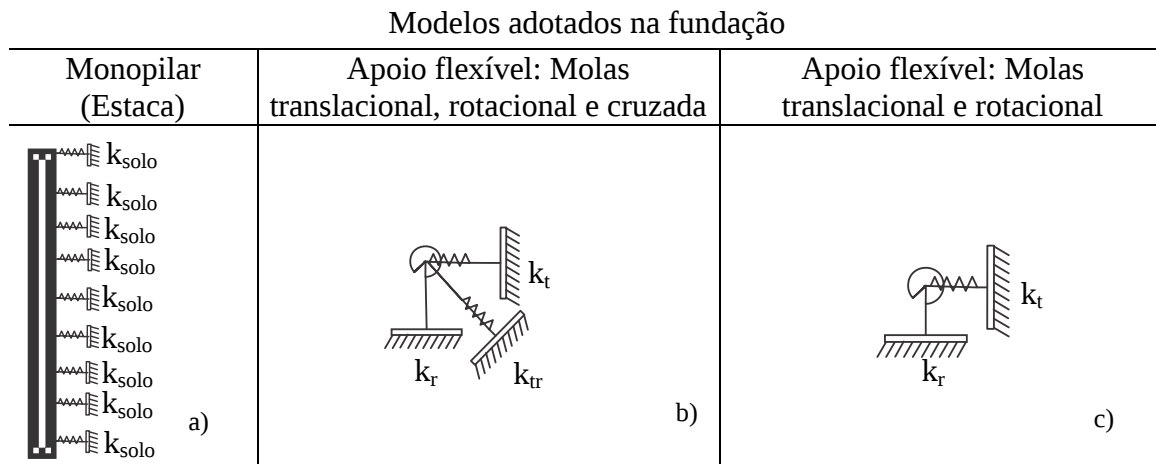


Figura 2.Tipos de apoios adotados nos modelos: a)Fundação tipo estaca; b) apoio flexível translacional, rotacional e mola cruzada. c)apoio flexível translacional e rotacional.

Em um segundo momento foi aplicado o método da carga unitária (Momento e força) no topo desta estaca resultando em deslocamento e rotações para cada caso. A rigidez será o inverso multiplicativo destes resultados. A matriz de rigidez dos apoios é apresentada na Eq.21. Arany et al (2015) aplicaram tal apoio em OWT onde denominam molas cruzadas aquelas com rigidez k_{tr} (Fig.2b), proveniente da rotação obtida através da aplicação da carga unitária, ou do deslocamento resultante da aplicação do momento unitário

$$[k_{apoio}] = \begin{bmatrix} k_t & k_{tr} \\ k_{tr} & k_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

Destaca-se que alguns métodos simplificados utilizaram apenas as molas translacionais e rotacionais(k_t e k_r) conforme adotado por Adhikari e Bhattacharya (2012) e visto na Fig.2c, desprezando assim a mola cruzada.

Em seguida as condições de contorno do problema foram aplicadas a partir das Tabelas 2, utilizando as matrizes globais, resultando na Tabela 4.

Tabela 4. Condições de contorno nodais - MEF

Modelo	Nó	Condições de Contorno
01	01	Rotação e translação acrescidos à rigidez da mola (k_t e k_r)
	$01 \rightarrow nf$	$\rho = \rho_{owt} + \rho_{água}$
	$nf \rightarrow n$	$\rho = \rho_{owt}$
	n	Massa $m1$ e inércia $j1$
02	01	Rotação e translação acrescidos à rigidez da mola (k_t e k_r)
	$01 \rightarrow n$	Elementos com rigidez $K = K_e + K_g$
	n	Massa $m1$ e inércia c
03	01	Rotação e translação acrescidos à rigidez da mola (k_t e k_r)
	$01 \rightarrow n$	Elementos com rigidez $K = K_e + K_g$
	$01 \rightarrow nf$	$\rho = \rho_{owt} + \rho_{água}$
	$nf \rightarrow n$	$\rho = \rho_{owt}$
	n	Massa $m1$ e inércia $j1$

04	01	Matriz de rigidez completa para a mola (kt, kr e ktr)
	$01 \rightarrow n$	Elementos com rigidez $K = Ke + Kg$
	$01 \rightarrow nf$	$\rho = \rho_{owt} + \rho_{\acute{a}gua}$
	$nf \rightarrow n$	$\rho = \rho_{owt}$
	n	Massa $m1$ e inércia $j1$
05	$01 \rightarrow ne$	Molas horizontais a partir de parâmetros do solo (km)
	$01 \rightarrow n$	Elementos com rigidez $K = Ke + Kg$
	$ne \rightarrow nf$	$\rho = \rho_{owt} + \rho_{\acute{a}gua}$
	$01 \rightarrow ne$ $nf \rightarrow n$	$\rho = \rho_{owt}$
	n	Massa $m1$ e inércia $j1$

Nas estruturas apresentadas neste trabalho o nó 1 está na origem e o nó n na extremidade, conforme a Fig.3.

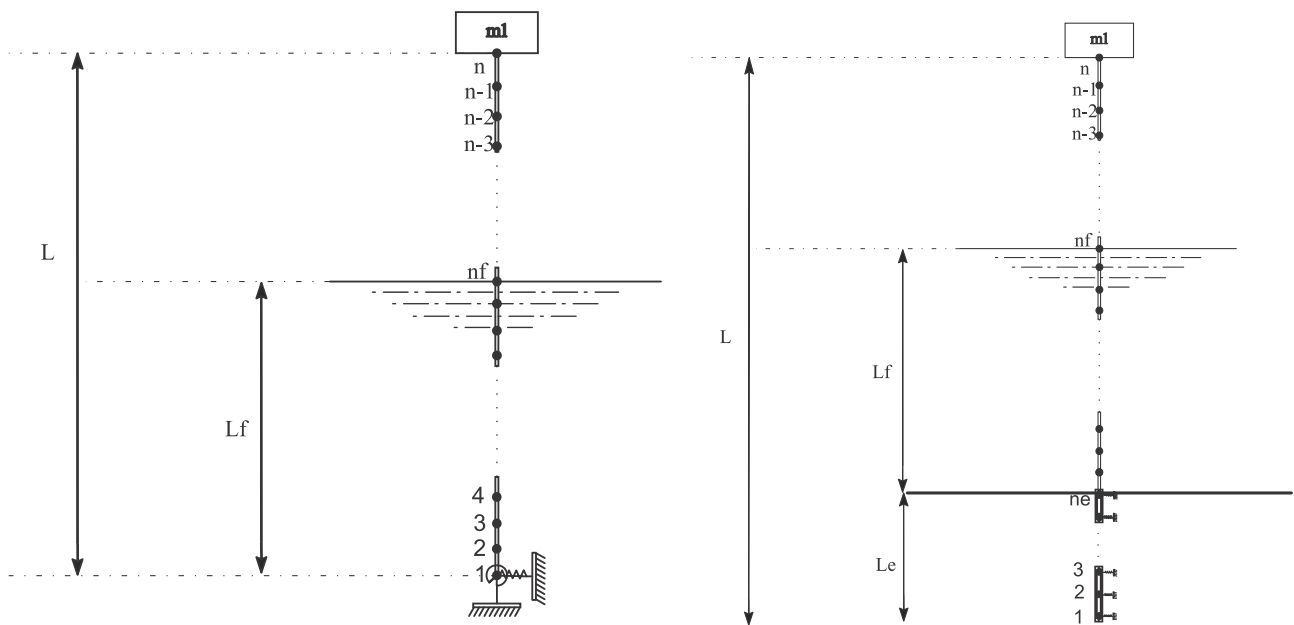


Figura 3. Numeração nodal de uma estrutura qualquer imersa em um fluido: a) apoio flexível, b) Monopilar

4 MODELAGEM DA OWT

Para alcançar o objetivo proposto, uma evolução na modelagem foi realizada conforme apresentado na Fig. 4. Partiu-se de um modelo simplificado (viga sobre engastada com massa na extremidade) com valores na literatura e em cada etapa, considerações foram realizadas objetivando tornar o modelo mais próximo da estrutura real (OWT). Este inicial foi utilizado apenas como ponto de partida para validar os códigos, maiores detalhes sobre ele serão omitidos devido a simplicidade estrutural. Simulações computacionais foram realizadas utilizando o software comercial SAP2000. Os códigos numéricos foram escritos em MATLAB.

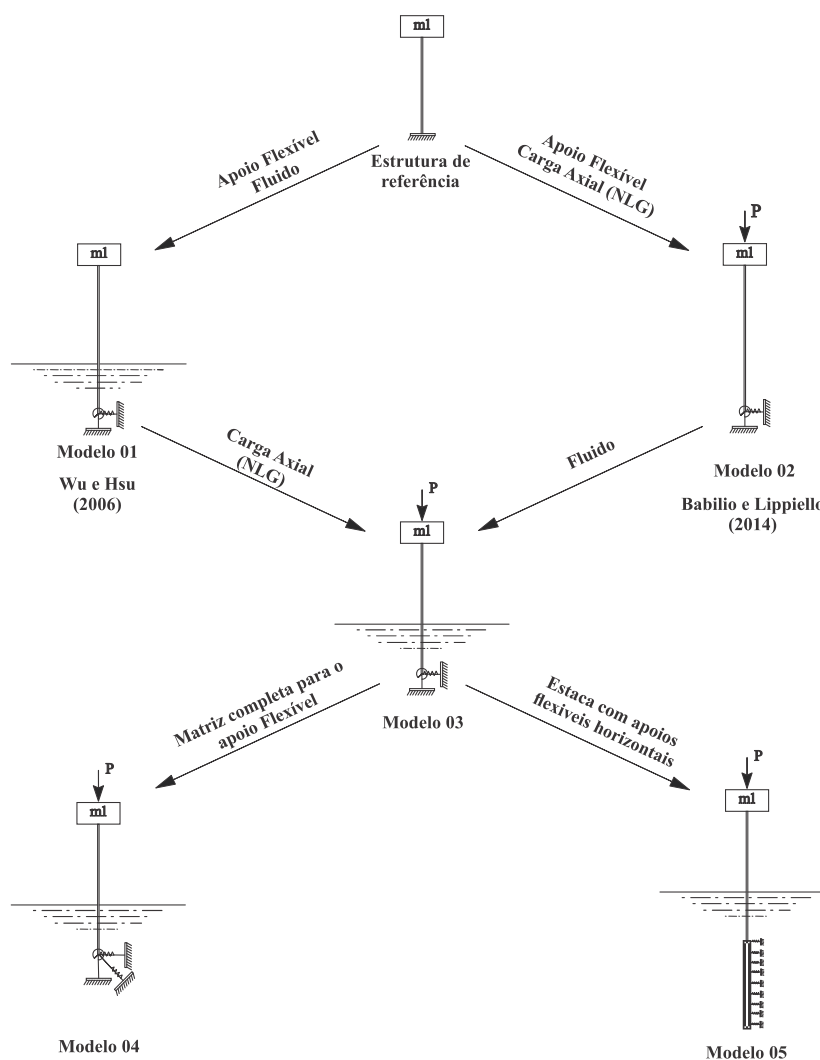


Figura 4. Modelagem estrutural

A Fig. 4 apresenta a modelagem estrutural da OWT conforme detalhado a seguir:

Modelo 01: A partir do modelo de referência, foi inserida a parcela da água e o apoio flexível. As frequências obtidas foram comparadas a Wu e Hsu (2006).

Modelo 02: A partir do modelo de referência, foram inseridos o apoio elástico e a carga aplicada axialmente (P) e considerada a não linearidade geométrica. Resultados foram comparados a valores apresentados por Babilio e Lippiello (2011).

Modelo 03: As características dos modelos 02 e 03 unidas em apenas um modelo, tendo este: massa na ponta, apoios flexíveis, carga axial no topo (NLG) e a presença do fluido (estrutura parcialmente imersa). Neste modelo resultados analíticos e numéricos foram comparados a valores medidos em campo.

Modelo 04: A partir deste modelos, as propriedades da fundação foram analisadas. Neste momento o solo foi considerado como um acoplamento entre 3 molas, análogo ao aplicado por Arany et al (2016), conforme visto na Fig.4.

Modelo 05: Considerado mais próximo da situação real, neste modelo foi inserida a fundação, logo tornou-se possível computar a participação da estaca na análise modal.

Para a determinação da malha foi realizado um teste de convergência do número de elementos, concluindo que 50 elementos eram suficientes para representar o fenômeno. Tal número se manteve próximo do aplicado por Wu e Hsu (2006) que foi de 60 elementos.

A calibração com resultados computacionais (SAP2000) foram obtidos a partir de modelos (Fig.5) com as mesmas propriedades e malha do modelo numérico.



Figura 5. Modelo computacional - SAP2000

5 VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO MODELOS 01,02 E 03

A calibração dos modelos 01,02 e 03 serão descritas nesta seção. Os trabalhos de referência (Fig. 3), utilizaram diferentes turbinas, desta forma, os parâmetros de entrada e resultados obtidos serão adimensionalizados para tornar possível a comparação dos resultados entre os modelos. Tal estratégia é bastante comum em análises deste tipo, conforme visto em Wu e Hsu (2006), Babilio e Lippiello (2011) e Adhikari e Bhattacharya (2012), e também permitir aplicar os valores à uma estrutura qualquer. Desta forma as variáveis adimensionais serão representadas pelo asterisco (*) calculadas através da Tabela 5.

Tabela 5. Variáveis adimensionais

Variável	Variável adimensional
Comprimento	$L^* = Lf/L$
Inércia Rotacional	$J^* = j^1/(\rho A L^3)$
Massa aplicada	$m^* = m^1/(\rho A L)$
Rigidez translacional (mola)	$kt^* = kt/(EI/L^3)$
Rigidez rotacional (mola)	$kr^* = kr/(EI/L)$
Carga aplicada	$P^* = PL^2/EI$
Frequência	$\omega^* = \sqrt{\frac{\rho A L^4 \omega^2}{EI}}$

As propriedades dos materiais dos modelos 01 a 03 foram adotadas conforme a Tabela 5. Ainda nesta tabela, apresenta-se as variáveis adimensionais de cada modelo, tal estratégia foi objetivada para sintetizar os parâmetros de entrada. A OWT utilizada para validar os modelos 01 e 02 foi adotada conforme Wu e Hsu (2006). Trata-se de uma estrutura monopilar circular com 15m de altura e diâmetro de 0,30m conforme informações na Tabela 6.

Tabela 6. Variáveis aplicadas nos modelos.

Modelo	Variáveis adimensionais			
01	$m^* = 0,1$	$J^* = 0,1$	$kt^* = kr^* = 1$	$L^* = 0,5$
02	$m^* = 0,1$	$J^* = 0,1$	$kt^* = kr^* = 1$	$P^* = 0,1$
03	$m^* = 0,1$	$J^* = 0,1$	$kt^* = kr^* = 1$	$P^* = 0,1$ $L^* = 0,5$
Parâmetros da seção				
$\rho_{owt} = 7850 kg/m^3$ $\rho_{água} = 1000 kg/m^3$ $L = 15m$ $Lf = 7,5m$ $D = 0,30m$ $A = 7,0686 \times 10^{-2} m^2$ $m = 8323,28 kg$ $j1 = 1,87273283 \times 10^6 kgm^2$ $E = 2,068 \times 10^{11} N/m^2$ $I = 3,9760 \times 10^{-4} m^4$ $kt = 2,4363 \times 10^4 N/m$ $kr = 5,481686 \times 10^6 N/m$ $P = 3,65446 \times 10^5 N$				

5.1 Modelo 01

O modelo 01 foi possível comparar a Wu e Hsu (2006), conforme a Tabela 7.

Tabela 7. Frequência obtidas para o modelo 01- Analítico x MEF x Literatura

Modo	Frequência ω^*			Erro (%)		
	Wu e Hsu (2006)	Presente trabalho		Analítico x Wu e Hsu (2006)	MEF x Wu e Hsu (2006)	MEF x Analítico
		Analítico	MEF			
1	0,77643734	0,77819412	0,77819668	$2,3 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-4}$
2	1,98167776	1,99297176	1,99297771	$5,7 \times 10^{-1}$	$5,7 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-4}$
3	8,16502136	8,13485847	8,13488281	$3,7 \times 10^{-1}$	$3,7 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-4}$
4	29,17729589	29,12079219	29,12088172	$1,9 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-1}$	$3,1 \times 10^{-4}$
5	69,83595607	69,77893175	69,77917653	$8,2 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-4}$

Este modelo também foi comparado à resultados computacionais obtidos através do SAP2000, conforme a Tabela 8.

Tabela 8. Frequência obtidas para o modelo 01- Analítico x MEF x SAP2000

Modo	Frequência ω^*			Erro (%)	
	SAP2000	Presente trabalho		Analítico	MEF
		Analítico	MEF	x SAP2000	x SAP2000
1	0,77989171	0,77819412	0,77819668	$2,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-1}$
2	1,99084849	1,99297176	1,99297771	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$
3	8,10636144	8,13485847	8,13488281	$3,5 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$
4	29,01550183	29,12079219	29,12088172	$3,6 \times 10^{-1}$	$3,6 \times 10^{-1}$
5	69,48476808	69,77893175	69,77917653	$4,2 \times 10^{-1}$	$4,2 \times 10^{-1}$

5.2 Modelo 02

O modelo 02 foi possível comparar a Babilio e Lippiello (2011), conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Frequência obtidas para o modelo 02- Analítico x MEF x Literatura

Modo	Frequência ω^*			Erro (%)		
	Babilio e Lippiello (2011)	Presente trabalho		Analítico	MEF	Analítico x MEF
		Analítico	MEF	x Babilio e Lippiello (2011)	x Babilio e Lippiello (2011)	
1	0,77	0,77105595	0,77105548	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$6,2 \times 10^{-5}$
2	1,94	1,94973630	1,94973627	$5,0 \times 10^{-1}$	$5,0 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-6}$
3	8,28	8,28991400	8,28991402	$1,2 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-7}$
4		30,03628603	30,03628864			$8,7 \times 10^{-6}$
5		71,68064175	71,68067894			$5,2 \times 10^{-5}$

O modelo 02 também foi comparado à resultados computacionais obtidos através do SAP2000, conforme a Tabela 10.

Tabela 10. Frequência obtidas para o modelo 01- Analítico x MEF x SAP2000

Modo	Frequência ω^*			Erro (%)	
	SAP2000	Presente trabalho		Analítico x SAP2000	MEF x SAP2000
		Analítico	MEF		
1	0,77090117	0,77105595	0,77105548	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$
2	1,94914606	1,94973630	1,94973627	$3,0 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-2}$
3	8,28855593	8,28991400	8,28991402	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$
4	30,01955819	30,03628603	30,03628864	$5,6 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-2}$
5	132,38757143	132,56920327	132,56944350	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$

5.3 Modelo 03

Uma vez validados os modelos iniciais (01 e 02) foi possível considerar os diferentes cenários em apenas um modelo. Desta forma foi simulado o modelo 03, cujas características da superestrutura mais se aproximam da OWT. Resultados podem ser verificados na Tabela 11.

Tabela 11. Frequência obtidas para o modelo 03- Analítico x MEF x SAP2000

Modo	Frequência ω^*			Erro (%)		
	SAP2000	Presente trabalho		MEF x Analítico	Analítico x SAP2000	MEF x SAP2000
		Analítico	MEF			
1	0,75798007	0,75810191	0,75810243	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$
2	1,90716114	1,90776050	1,90776053	$2,0 \times 10^{-6}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$
3	8,08937009	8,09069740	8,09069746	$7,5 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$
4	29,04129589	29,05828081	29,05828338	$8,9 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-2}$
5	69,64922707	69,72024199	69,72027838	$5,2 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$

6 ANÁLISE DA FUNDAÇÃO: MODELOS 04 E 05 - APLICAÇÃO À UMA OWT REAL

Após a validação dos modelos, foi possível aplicar o modelo 03 à uma estrutura real. Para isto foi escolhida uma OWT Lely A2, parque eólico com 4 turbinas, cada uma tendo 0,5MW, situadas ao norte de Amsterdã, Holanda. Foi escolhida esta turbina devido à disponibilidade de valores de medição em campo.



$$\rho_{owt}=13130,8136kg/m^3$$

$$\rho_{água}=1000kg/m^3$$

$$L=67,0m \quad L_f=4,6m$$

$$L_e=20,9m \quad D_{owt}=2,55m$$

$$e_{owt}=0,013m$$

$$D_{estaca}=3,70m$$

$$e_{estaca}=0,035m$$

$$k_{solo}=2,33 \times 10^8 N/m^2$$

$$k_t=8,14 \times 10^8 N/m$$

$$k_r=2,06 \times 10^{10} Nm/rad$$

$$k_{tr}=-2,91 \times 10^9 N^2/rad$$

$$m=31440kg \quad m_1=32000kg$$

$$E=2,2 \times 10^{11} N/m^2$$

$$I=1m^4 \quad j_1=0kgm^2$$

$$P=3,416133 \times 10^5 N$$

a)

b)

Figura 6.a) Lely A2 (OffshoreWind, 2017).

b) Parâmetros da turbina (Adhikari e Bhattacharya, 2012 e Arany et al, 2016).

Simplificações foram realizadas evitando análises complexas para obter os parâmetros modais. Logo, a seção foi considerada constante com diâmetro médio entre o topo e a base, efeitos aerodinâmicos foram desprezados e o fluido(água) foi considerado em repouso. O solo foi considerado com rigidez uniforme. A Fig.6.b) apresenta as características para a OWT Lely (A2) a partir de Adhikari e Bhattacharya (2012) e Arany et al(2016).

Uma vez validado os resultados analíticos com os numéricos (MEF), foi realizado apenas a simulação em MEF, devido à velocidade de obtenção de resultados para o caso prático. Esses valores podem ser visualizados através da Tabela 13.

Tabela 13. Frequência OWT Lely A2.

Frequência ω (Hz)					
Modo	Modelo 03	Modelo 04	Modelo 05	Teórico Adhikari e Bhattacharya (2012)	Frequência Medida
1	0,62997286	0,60171689	0,63494945	0,7404	0,6340
2	6,56971761	6,04047995	6,48749799		
3	20,26700649	18,16996678	19,54765522		
4	40,64726522	36,24956467	38,14059971		
5	66,09074379	60,77652385	60,32317789		

A partir dos resultados obtidos na Tabela 13, foram aplicados os modelos simplificados da Tabela 3 para analisar o quão próximos tais formulações podem chegar de uma análise modal do modelo apresentado, conforme visto na Fig.7.

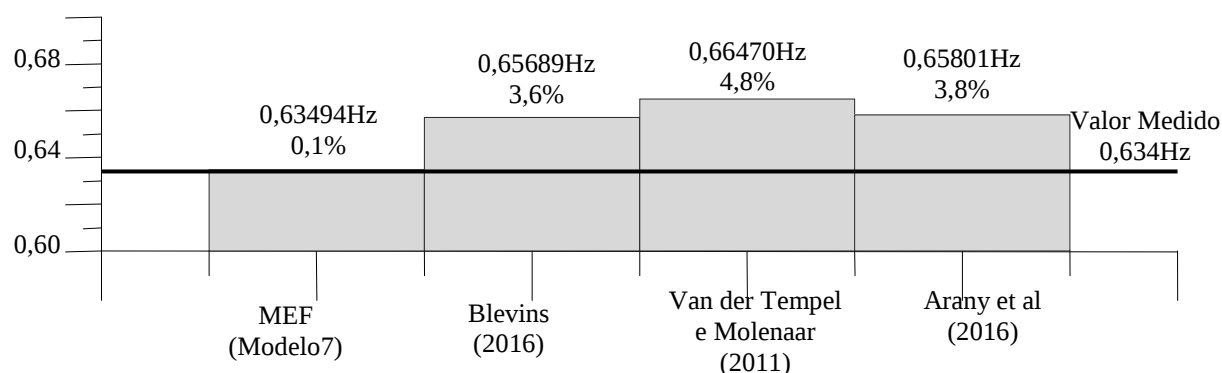


Figura 7. Frequência e erro OWT Lely A2:
Valores propostos X modelos simplificados X Frequência medida

A partir da verificação das frequências da estrutura (Tabela 13) percebeu-se que a diferença entre os modelos aumenta para os maiores modos. Desta forma foram elaborados gráficos para permitir a visualização dos modos de vibração conforme visto na Fig.8.

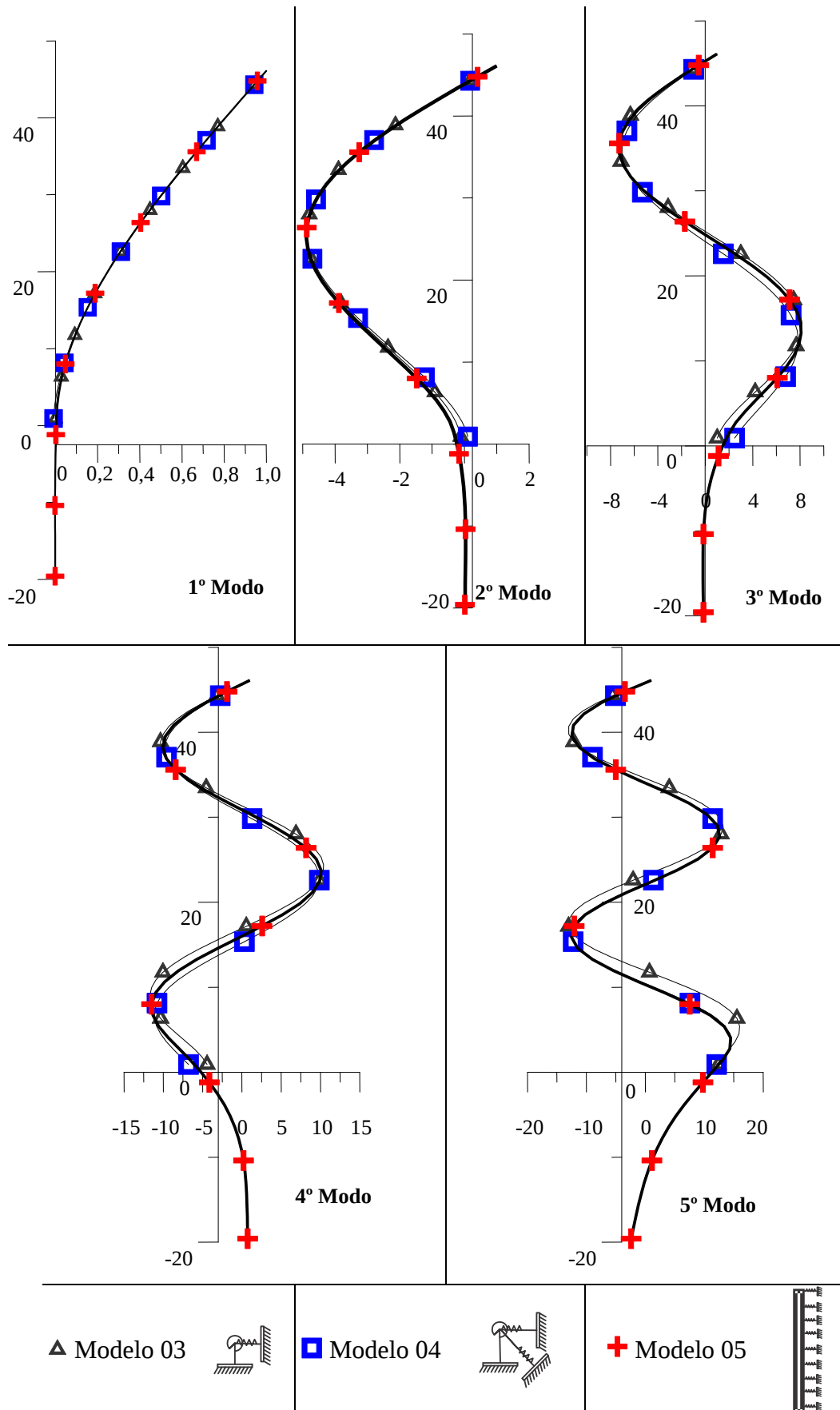


Figura 8. Modos de Vibração (1° à 5°) para a OWT LelyA2

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados para os 5 casos propostos, verificou-se uma confiabilidade no modelo simplificado em MEF para a análise modal de OWT.

O modelo 01 quando comparados a valores da Literatura (Wu e Hsu, 2006) apresentou erro máximo de 0,23%. Destaca-se que esses erros podem ser provenientes de arredondamentos do autor fonte e também a não consideração da excentricidade neste presente trabalho. Quanto ao comparativo entre valores numéricos e analíticos, este modelo apresentou erros máximos de 0,0038%. Ao comparar com o software comercial, SAP2000, erros máximos foram de 0,64%.

O modelo 2 apresentou erros da ordem de 10^{-1} quando comparado à valores da literatura. Entretanto na Tabela 8 verificou-se que Babilio e Lippiello (2011) só apresentaram frequências com duas casas decimais, ocultando os demais valores. Para o comparativo entre analítico e numérico, erros máximos foram de 0,0035%. Ao ser comparado ao SAP2000 menores erros foram encontrados, chegando a valores de 10^{-2} %.

Para o modelo 03, o mais próximo da OWT, valores de erro máximo foram computados com 0,0035% entre a formulação analítica e numérica. Ao comparar com os valores do SAP2000, erros de 10^{-2} % foram verificados.

Após validados o modelo 03, este foi aplicado à estruturas real, com simplificações necessária para consideração dos valores de rigidez rotacional e horizontal do solo. Resultados da frequência da OWT Lely A2 foi comparado a valor medido, encontrando erro de 0,63%.

A partir disto a consideração da fundação foi realizada, inicialmente considerando todas as componentes da mola para o apoio flexível (modelo 04), encontrando maiores erros (3%) quando comparados aos valores medidos.

O último modelo (05) realizado foi considerando o monopilar cravado no solo. Neste foi possível realizar a análise modal e computar a frequência com a participação da parte enterrada (estaca), pois sabe-se que na estrutura real, tal elemento participa do comportamento dinâmico.

Através dos modos de vibração (Fig.8) foi verificado que para o primeiro modo, o comportamento dinâmico da estrutura é independente da consideração do elemento de fundação (Molas ou monopilar cravado no solo). Isto ocorre devido à rigidez da camada de solo considerada, para solos mais flexíveis tal comportamento seria amplificado. Para os modos seguintes, é observada uma maior amplitude atuando na estaca, provocando assim maiores esforços dinâmicos e comprovando a necessidade de considerar o monopilar na análise. Ao comparar o modelo 5 com os valores medidos, erros de 0,1% foram verificados.

A abordagem analítica apresentada neste trabalho requer a solução de uma equação transcendental, fato este que gera um custo computacional, majorando ao inserir valores de estruturas reais. Situação diferente da análise em MEF onde o tempo de processamento foi insignificante. Desta forma, fica ao analítico o importante papel de validar o modelo numérico. O MEF apresentou-se como uma forte ferramenta nesta análise devido à facilidade na implementação de novos parâmetros.

Os modelos simplificados apresentados na Tabela 3 apresentaram pequenos erros ao serem comparados à OWT real (Fig. 7). Entretanto destaca-se que tais formulações não consideram algumas variáveis específicas do problema de turbinas offshore: Lâmina da água,

carga axial, inércia rotacional do equipamento, apoios flexíveis e outras não consideradas neste trabalho.

É possível evoluir o modelo obtido para alcançar situações mais próximas da estrutura real. Detalha-se então as perspectivas para trabalhos futuros para a abordagem dinâmica:

- Seção com inércia variável;
- Variação módulo de cisalhamento do solo para diferentes solos em instalações offshore.
- Curva PY para parâmetros do solo.
- consideração da excentricidade horizontal da carga P: Momentos de primeira ordem oriundos dos equipamentos;
- análise dinâmica em vibração forçada (excitada por força variável com o tempo) ;
- consideração da excentricidade vertical da massa.

REFERÊNCIAS

- Jamieson, P. , 2011. *Inovation in wind turbine design*. Wiley.
- Sawyer, S. & Dyrholm, M. 2017. *Global wind report*. 8th National renewable energy forum. Ulaanbaatar Mongolia.
- Wu, J.S. & Hsu, S.H. 2006. A unified approach for the free vibration analysis of an elastically supported immersed uniform beam carrying an eccentric tip mass with rotaty inertia. *Journal of Sound and Vibration*, vol.291, pp1122-1147.
- Babilio, E. & Lippiello, M. 2011. Dynamic analysis of a column under axial load and a concentrated mass with rotational inertia at the top. XX Conference dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata, pp.1-10.
- 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.
- Adhikari, S. & Bhattacharya, S. 2012. Dynamic analysis of wind turbine towers on flexible foundations, *Shock and vibration*, vol.19, pp 37-56.
- 4Coffshore, 2017. *Offshore wind farm*. <http://www.4coffshore.com/windfarms>.
- Clough, R.W. & Penzien, J. *Dynamics of structures*. 1995. Computers & Structures. 3. Berkeley. CA.
- Van der Tempel, J. & Molenaar, D.P. 2002. Wind turbine structural dynamics- a review of the principles for modern power generation, onshore and offshore. *Wind engineering*, vol 26,n4,pp 211-220.
- Blevins, R.D. 2016. *Formulas for dynamics, acoustics and vibration*. Wiley.
- Willems, N. & Lucas Jr., W.M. 1978. *Structural analysis for engineers*. Mc. Graw-Hill, New York.
- OffshoreWind. 2017. Offshore Wind Bussiness guide. Disponível em: <http://www.offshorewind.biz/tag/shut/>. Acesso em: 30 ago 2017.