



MODELOS PARA ANÁLISE SÍSMICA DE TORRES EOLICAS ONSHORE

Models for seismic Analysis of onshore wind Towers

Ruth Chaves Barros (1) (P); Paulo Marcelo Vieira Ribeiro (2);

(1) Engenheiro Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, Brasil.

Email para Correspondência: ruthbarros.est@gmail.com; (P) Apresentadora

Resumo: Com o aumento da produção de energia eólica no Brasil nos últimos anos, tem-se desenvolvido turbinas eólicas mais potentes, com pás de maior diâmetro e torres com altura superior a 100m. A elevada esbelteza da torre, associada ao seu formato geométrico, de pêndulo invertido com massas concentradas no topo, torna as turbinas eólicas estruturas suscetíveis a ação sísmica. Com isso torna-se importante investigar o desempenho sísmico das turbinas eólicas, e dimensionar para que resistam total ou parcialmente ao evento sísmico. Em razão disso, este trabalho tem como objetivo construir modelos numéricos e investigar o comportamento sísmico de uma turbina eólica. Inicialmente são desenvolvidos dois modelos em elementos finitos: i) modelo simplificado discretizado com elementos finitos de barras ii) modelo completo discretizada com elementos finitos de cascas e sólidos de uma turbina eólica de 65 kW. Posteriormente são desenvolvidas análise modal e análise sísmica com auxílio do *software* SAP2000®. Observa-se que para a turbina eólica analisada, as ações do sismo podem gerar deslocamentos pequenos, mas acelerações de até duas vezes a aceleração do sismo. É possível concluir que essas ações não devem ser negligenciadas, especialmente em turbinas de maior altura.

Palavras chaves: Análise sísmica, torre eólica onshore, elementos finitos

Abstract: With the increase in wind energy production in Brazil in recent years, more powerful wind turbines have been developed, with larger blades and towers with a height of over 100m. The high slenderness of the tower, coupled with its geometric shape, of inverted pendulum with masses concentrated at the top, makes wind turbines susceptible to seismic action. Thus, it is important to investigate the seismic performance of wind turbines, and to dimension these structures to resist totally or partially the seismic event. Therefore, this work aims to build numerical models and investigate the seismic behavior of a wind turbine. Initially two finite element models are developed: i) simplified discretized model with finite elements of frames ii) complete discretized model with finite elements of shells and solids of a wind turbine of 65 kW. Subsequently modal analysis and seismic analysis are developed with the *software* SAP2000®. For the analyzed wind turbine, the actions of the earthquake can generate small displacements, but accelerations of up to twice the acceleration of the earthquake. It is possible to conclude that these actions should not be neglected, especially in turbines of greater height.

Keywords: Seismic Analysis, onshore wind tower, finite element



1 INTRODUÇÃO

A energia eólica vem crescendo como importante fonte parcela da matriz energética de muitos países. Segundo dados do GWEC, a capacidade instalada global é de 540GW, (GWEC,2018). Como grandes produtores mundiais, tem-se China (188 GW), EUA (89 GW) e Índia (32GW). Em escala regional, destacam-se países como: Brasil (12,7 GW), Itália (9,6 GW), Turquia (6,90 GW), México (4,0 GW), Japão (3,06 GW) e Portugal (5,36 GW).

Todos esses países possuem atividade sísmica em seu território. Japão, China, EUA e México possuem maior intensidade devido a posição próxima de bordas de placas tectônicas, em uma região conhecida como “Cinturão Circum-Pacífico”. Índia, Turquia e Portugal por estarem localizados próximo a zona “Mediterrânea-Transasiática”, e o Brasil, devido a falhas geológicas intraplacas localizadas na região nordeste do país.

Como os parques eólicos são fundamentais para a infraestrutura do país, e em alguns casos já representam grande parte da matriz energética, é importante que seja reduzida a probabilidade de falha, dano ou necessidade de desligamento das turbinas eólicas na ocorrência de um evento sísmico.

As normas internacionais de turbinas eólicas, (Risø,2002), (GL,2002), IEC (2005), apresentam recomendações simplificadas para dimensionar a turbina eólica ou certos componentes para a ação sísmica.

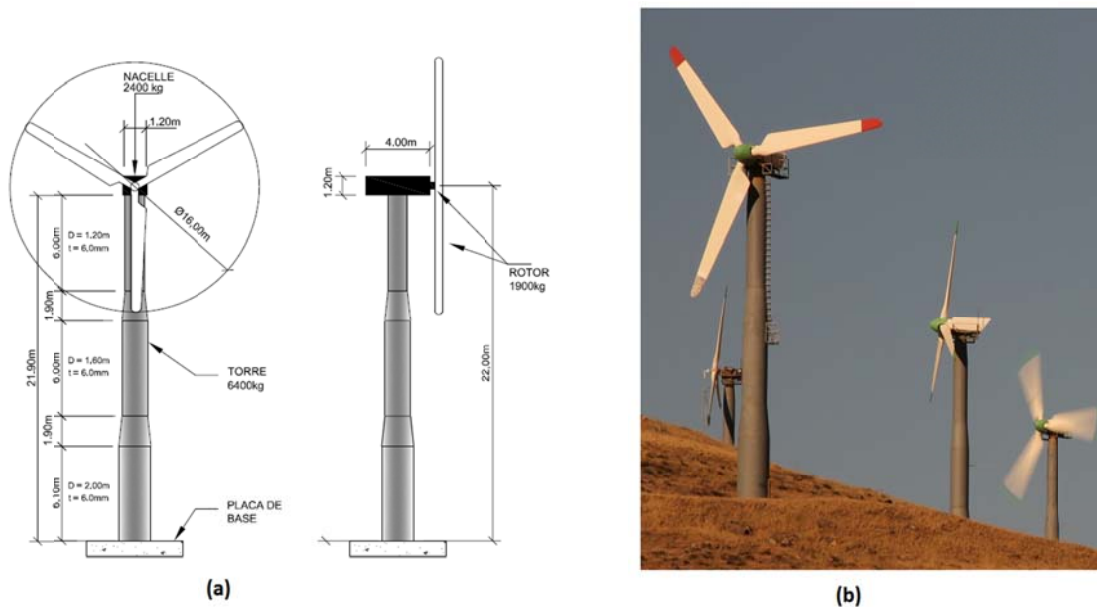
Uma série de investigações sobre o comportamento sísmico de turbinas eólicas foi desenvolvido na literatura. Destacam-se dois ensaios de mesa sísmica desenvolvidos em (Prowell et al.,2009) e (Prowell et al.,2012). Nos estudos, movimentos de excitação sísmica, unidirecionais e bidirecionais foram aplicados em uma turbina real.

O autor (Prowell, 2009) pode concluir que um sistema linear de um grau de liberdade pode explicar a maior parte da dinâmica observada. Também foi observado, mas não significativo na turbina estudada, que o comportamento de modo mais alto pode ser importante, especialmente em turbinas mais altas.

2 METODOLOGIA

Inicialmente, são construídos modelos em elementos finitos da turbina eólica de 65 kW, seguindo-se as características geométricas, de massa e resistência dos materiais indicadas na figura 1. Para a torre e nacelle, foi utilizado aço do tipo S275 com resistência de 210GPa.

Figura 1 – Características da turbina de 65kW (a) geometria (b) modelo real



Fonte: (Adaptado de Prowell et al., 2009)

Para validação das propriedades dinâmicas dos modelos, é desenvolvida uma análise modal, no SAP2000®, e são obtidas frequências naturais e modos de vibração. Os resultados são comparados com valores encontrados nos trabalhos anteriores de (Prowell et al., 2012) e (Kjørlaus, 2013).

Com os modelos dinâmicos devidamente calibrados, é desenvolvida uma análise transiente utilizando o método do espectro de resposta e o método do histórico de acelerações no tempo e são analisados os resultados obtidos.

2.1 Modelos numéricos

Dois modelos são desenvolvidos nas análises, indicados na figura 2:

No Modelo I a torre é discretizada com 144 elementos de barras de seção cônica variável. A nacelle e o rotor são implícitos, incluindo-se sua massa e inércias concentradas no topo da torre. As inércias adicionadas, de acordo com a convenção de eixos da figura 2:

$$I_x = 8.37m^4 : \text{inércia a flexão em relação ao eixo } x;$$

$$I_y = 1.38m^4 : \text{inércia a flexão em relação ao eixo } y;$$

$$I_z = 1600m^4 : \text{inércia a torção em relação ao eixo } z.$$

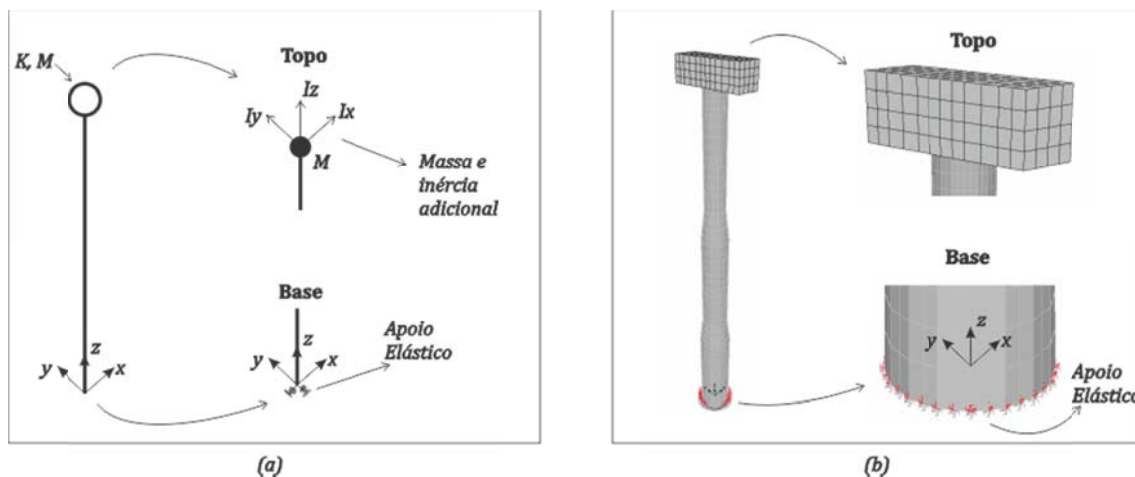
Na base da torre, o apoio é considerado elástico linear, com a seguinte rigidez:

$k_x = k_y = k_z = 3,0 \cdot 10^6 \text{ N/m}$: coeficiente elástico de deslocamento dos eixos;

$k_{rx} = k_{ry} = k_{rz} = 2,0 \cdot 10^8 \text{ N/m}$: coeficiente elástico de deslocamento dos eixos;

No Modelo II a seção da torre é discretizada com 1536 elementos de casca e a nacelle com 192 elementos sólidos hexaédricos, apoiada no topo da torre, em seu eixo. Apenas o rotor é implícito no modelo incluindo-se sua massa em um nó do elemento sólido. Na base da torre, o apoio é considerado elástico linear, com valor igual ao adotado no modelo I.

Figura 2 – Características dos modelos da análise (a) modelo I (b) modelo II



Fonte: (Autora, 2018)

2.2 Análise modal

A identificação das propriedades modais é a primeira etapa para o estudo do comportamento dinâmico da turbina eólica. A análise modal permite a calibração das características dinâmicas dos modelos numéricos, e torna-se fundamental para a análise pelo método do espectro de resposta.

A análise consiste na solução do problema de valores próprios, ou problema de autovalor e autovetor, cuja equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$||[K] - w^2[M]|| = 0 \tag{1}$$

onde:

$[K]$: é a matriz de rigidez da estrutura relativa aos graus de liberdade considerados;

w^2 : é a matriz de frequências naturais;

$[M]$: é a matriz de massa;

A expansão do determinante fornece uma equação do enésimo grau, para um sistema de n graus de liberdade. As n soluções ou autovalores representam as frequências naturais (w_n^2) e os autovetores representam os n modos de vibração (ϕ) do sistema associados a cada frequência natural. As frequências e modos podem ser ordenados de forma crescente, sendo a de menor valor é denominada frequência fundamental do sistema.

Em um software de elementos finitos como o SAP2000®, a solução da equação (1) é obtida inserindo-se as características de geometria, condições de apoio e massas dos modelos. As respostas são obtidas em termos de respectivas frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. A análise modal pelo método dos vetores de Ritz pode fornecer melhores resultados quando usados para posterior análise de histórico do tempo baseadas na sobreposição modal (CSI,2012).

2.3 Análise sísmica

Na ação sísmica a estrutura é submetida a um conjunto de acelerações na base, podendo a equação do equilíbrio dinâmico ser escrita da seguinte forma:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\} + [C]\{\dot{U}(t)\} + [K]\{U(t)\} = -[M]\{\ddot{U}_g(t)\} \quad (2)$$

onde:

$[M]$: é a matriz de massa;

$[C]$: é a matriz de amortecimento;

$[K]$: é a matriz de rigidez da estrutura relativa aos graus de liberdade considerados;

$\{U(t)\}$: é o vetor de deslocamento.

$\{\dot{U}(t)\}$: é o vetor de velocidade;

$\{\ddot{U}(t)\}$: é o vetor de aceleração;

$\ddot{U}_g(t)$: é a aceleração devido o movimento do solo;

Para solução da equação (2), são utilizados neste trabalho, o método do espectro de resposta e o método do histórico de acelerações no tempo.

Para a análise pelo método do espectro de resposta são construídas curvas que relacionam a resposta máxima de um sistema de um grau de liberdade submetido a um movimento sísmico específico e suas frequências. Com isso, é possível obter a resposta máxima de aceleração, velocidade ou deslocamento, que podem ser utilizadas para obter forças laterais na estrutura. A análise pelo método do histórico de acelerações no tempo, são escolhidos dois acelerogramas de sismo reais e aplicados em escala original, na base dos modelos em elementos finitos.

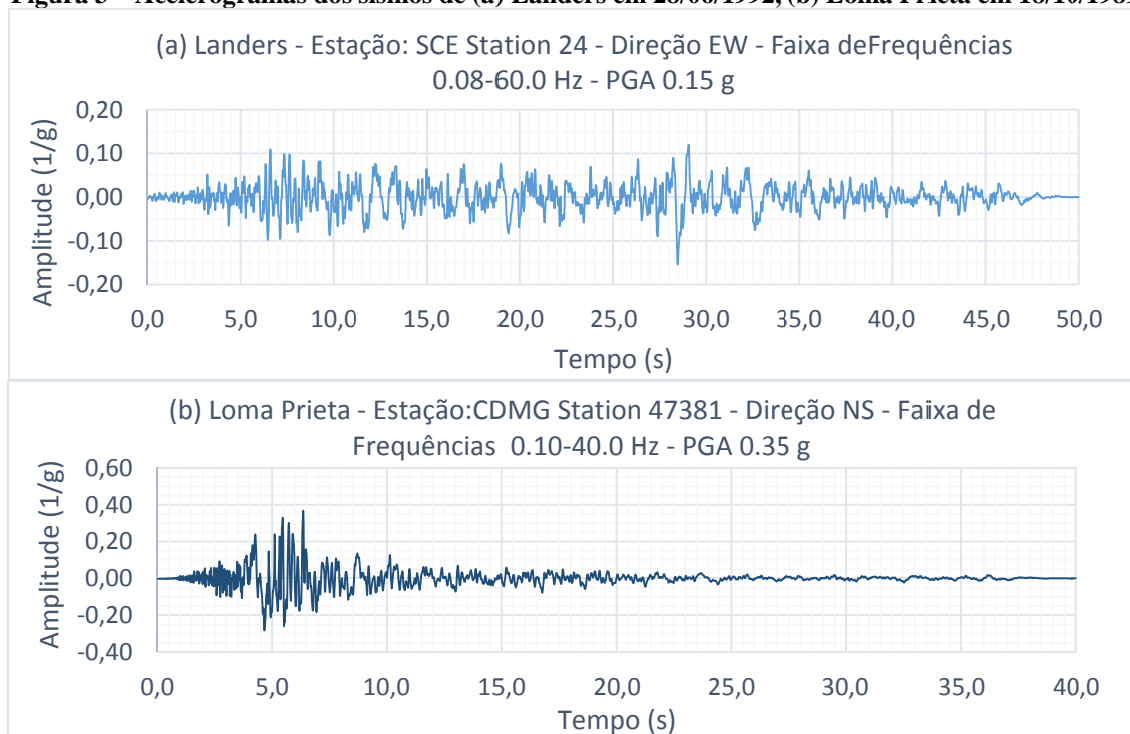
Neste trabalho, foram escolhidos os acelerogramas dos sismos de Landers e Loma Prieta, indicados na figura (3). A turbina foi considerada em condição estacionada. Nos modelos, dois casos distintos de carregamentos são adotados:

CC1 – Ação aplicada paralela ao eixo x (direção lateral da turbina)

CC2 - Ação aplicada paralela ao eixo y (direção frontal da turbina)

Para a turbina em condição estacionada, recomenda-se considerar um fator de amortecimento estrutural de 1%, em acordo com (Prowell et al., 2012).

Figura 3 – Acelerogramas dos sismos de (a) Landers em 28/06/1992, (b) Loma Prieta em 18/10/1989



Fonte: (Autora, 2018)

3 RESULTADOS DA ANÁLISE MODAL

Na tabela 1 são indicados as frequências naturais e participação modal dos modelos analisados. É possível verificar que as frequências dos modelos possuem uma boa aproximação com os resultados de trabalhos anteriores: do modelo de mesa sísmica (Prowell et al., 2009), do modelo numérico de barras desenvolvido por (Prowell et al., 2011) e do modelo numérico de cascas desenvolvido por (Kjørlaug, 2013).

Para que fosse alcançada uma participação modal próxima de 80%, no modelo I foram necessários apenas 6 modos, enquanto que no modelo II foram necessários os 40 primeiros modos. Isso ocorre devido à maior discretização da torre, com mais graus de liberdade, surgindo modos de deformação de casca, que não são de interesse.

Em ambos os modelos fica evidente a participação modal dominante dos primeiros modos, com aproximadamente 69% para o primeiro modelo e 65% para o segundo. Em estruturas com um modo predominante, é esperado que as análises pelo espectro de resposta apresentem boa aproximação quando comparados com outros métodos de análise

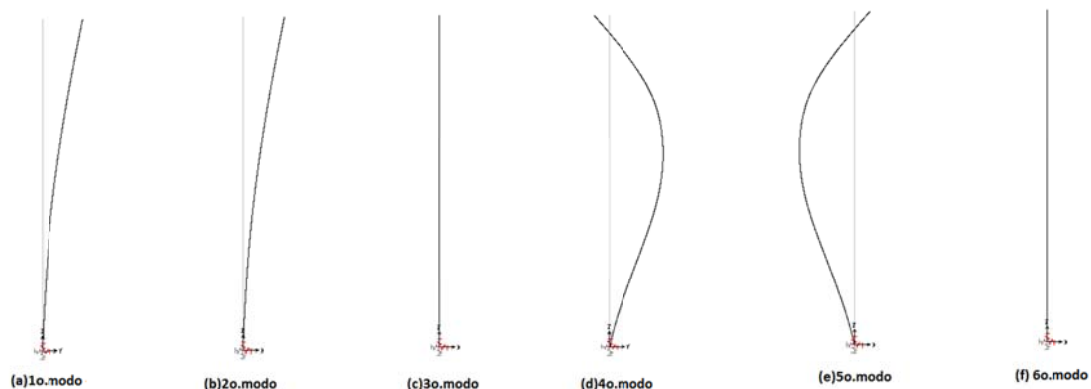
Tabela 1 – Frequências e respectivos fatores de participação modal obtidos na análise modal

Modelo I	Part. Modal	Modelo II	Part. Modal	Prowell et al., (2009)	Prowell et al., (2012)
f[Hz]-tipo	%	f[Hz]-tipo	%	f[Hz] - tipo	f[Hz] - tipo
1.68-FA	69	1.68-FA	65	1.68 - SS	1.70 - FA
1.68-SS	69	1.69-SS	65	1.68 - FA	1.71 - SS
9.09-TO	100	10.07-TO	67	9.20 - TO	-
11.92-FA	86	10.87-FA	81	10.08 - SS	11.90 - FA
11.93-SS	86	11.55-SS	82	10.90 - FA	12.40 - SS
31.32-VER	83	31.06-VER	76	-	-

Nas figuras 4 e 5 são indicados os modos de vibração dos modelos, sendo possível verificar que os modos predominantes da estrutura são os modos laterais (SS-FA), o modo torcional (TO) e o modo vertical (VER).

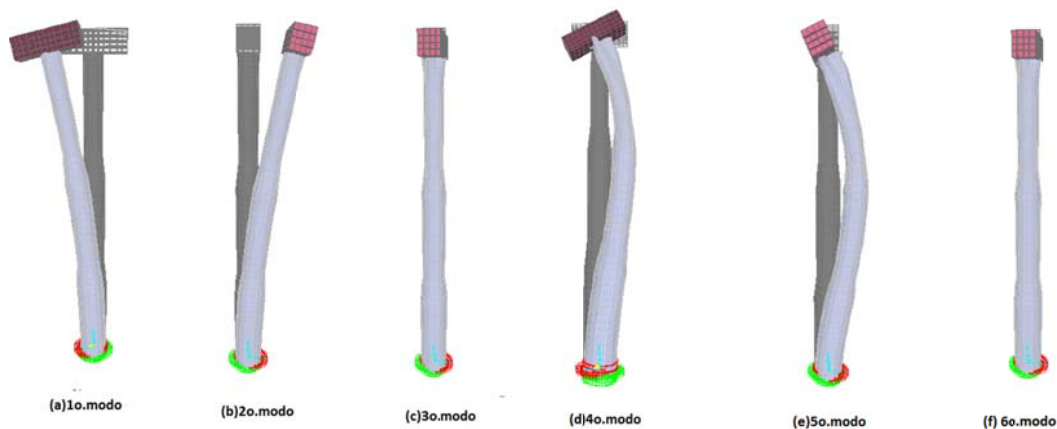
No modo lado-lado (S-S) a torre desloca-se lateralmente paralelo ao plano do rotor e no frente-trás (F-A) desloca-se para frente e atrás, perpendicular ao eixo do rotor. O modo vertical (VER) desloca-se verticalmente e no modo (TO) gira em torno do seu eixo.

Figura 4 – Modos de vibração do modelo I da turbina eólica de 65Kw (a) 1º. Modo – SS, (b) 1º. Modo – FA, (c) 1º. Modo – TO, (d) 2º. Modo – SS, (e) 2º. Modo – FA, (f) 1º. Modo – VER



Fonte: (Autora, 2018)

Figura 5 – Modos de vibração do modelo II da turbina eólica 65Kw (a) 1º. Modo – FA, (b) 1º. Modo – SS, (c) 1º. Modo – TO, (d) 2º. Modo – FA, (e) 2º. Modo – SS, (f) 1º. Modo – VER



Fonte: (Autora, 2018)

A aproximação das frequências em ambos os modelos é excelente, sendo possível concluir inicialmente que ambos os modelos são capazes de reproduzir a resposta dinâmica da turbina eólica de 65kW.

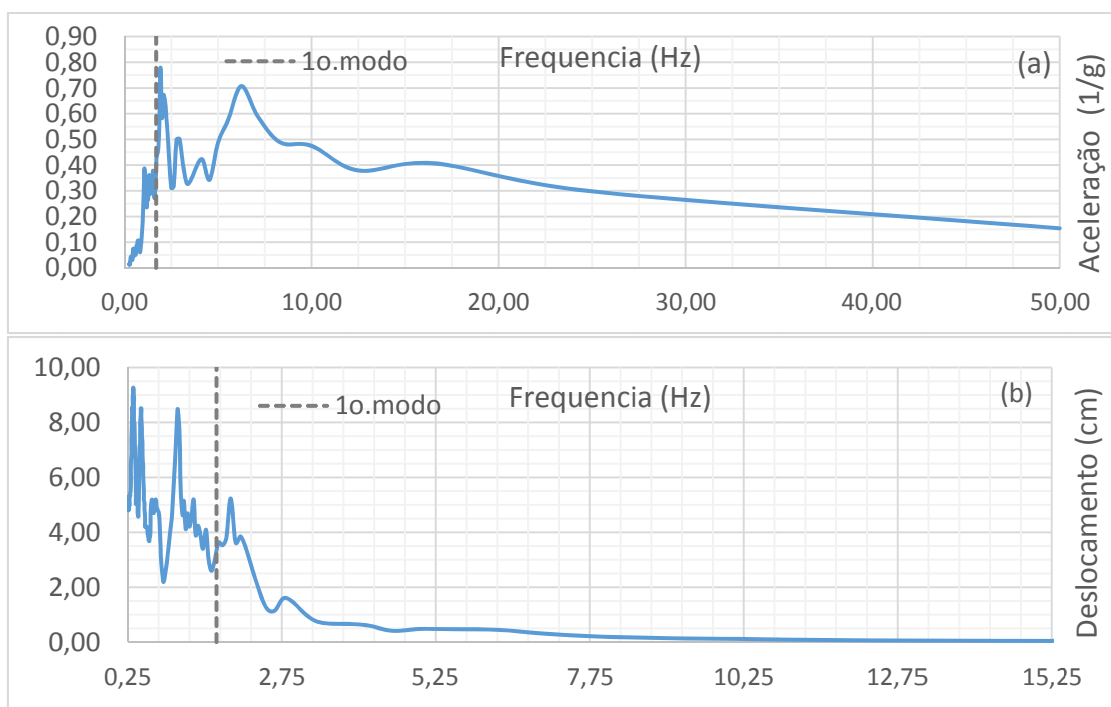
Como citado anteriormente, os modos de casca foram suprimidos dos resultados, pois representam modos superiores, com pequena participação modal, e não são de interesse dessa análise.

4 RESULTADOS DA ANÁLISE SISMICA

Nas figuras 6 e 7 são apresentados os espectros de resposta dos sismos. Inserindo-se o período fundamental do modelo é possível determinar a resposta máxima de aceleração e deslocamento.

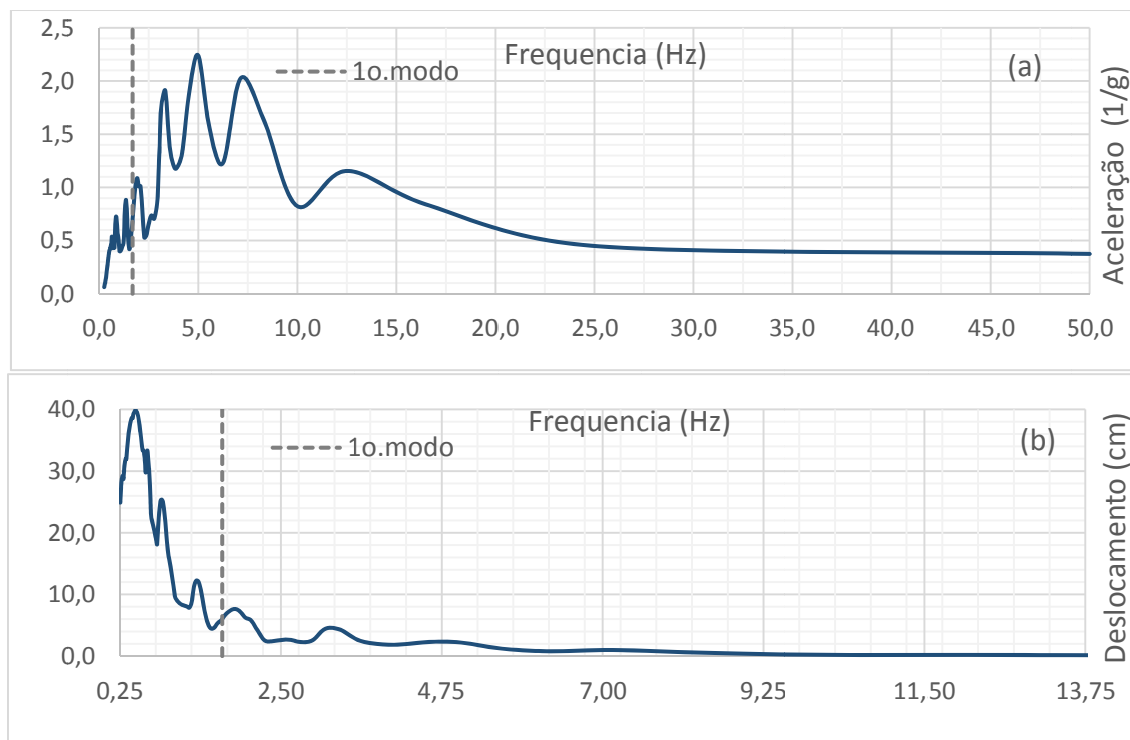
Verifica-se nos espectros de deslocamentos, que o a maior participação de deslocamentos ocorre devido ao primeiro modo., pois após este (Figura 6b), o espectro apresenta pequenos deslocamentos

Figura 6 – Espectros de resposta de aceleração (a) e deslocamento (b) do sismo de Landers



Fonte: (Autora, 2018)

Figura 7 – Espectros de resposta de aceleração (a) e deslocamento (b) do sismo de Loma Prieta

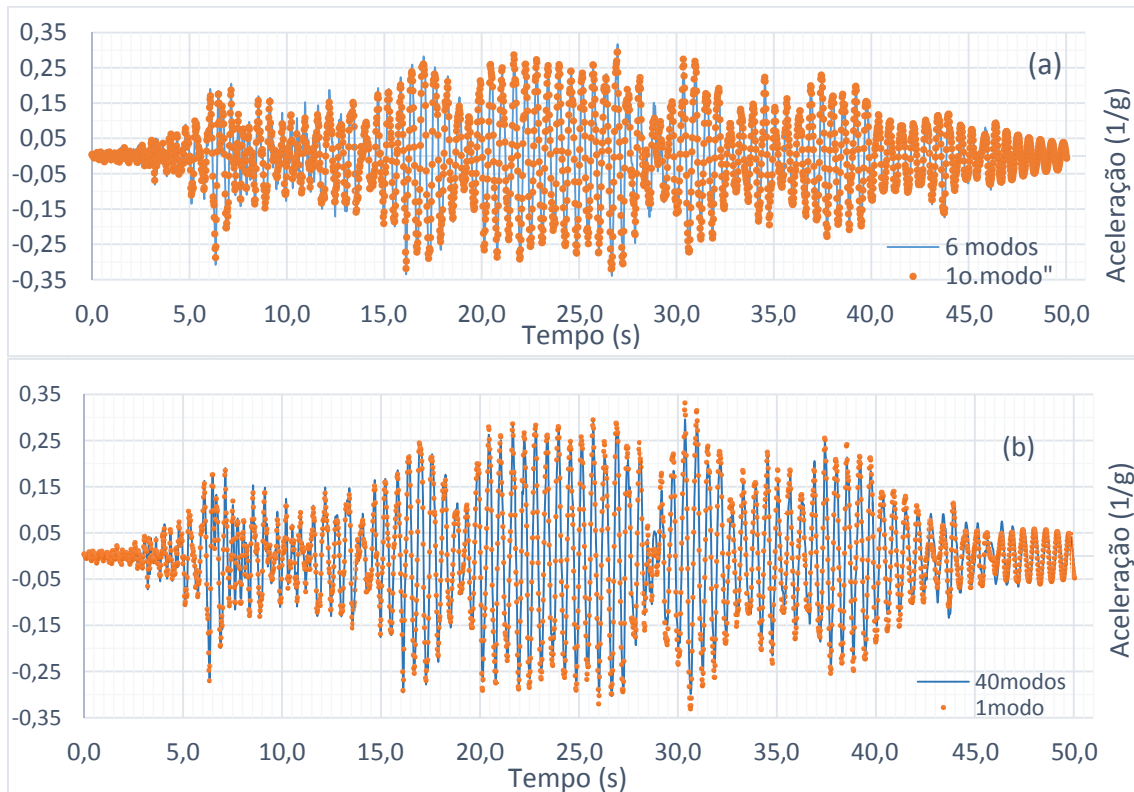


Fonte: (Autora, 2018)

Nas figuras 8 e 9 são apresentados o histórico de acelerações no topo da torre devido a ação dos sismos. São indicadas duas análises, utilizando o método da sobreposição modal, uma considera todos os modos da análise modal e outra considera apenas o primeiro modo.

Analisando-se os históricos de acelerações dos modelos, é possível verificar uma boa aproximação na resposta obtida, principalmente quando compradas posições máximas, o que indica que ambos os modelos podem descrever adequadamente a resposta sísmica estrutural.

Figura 8 – Histórico de aceleração no topo da torre dos modelos I (a) e II (b) para o sismo de Landers (CC1)



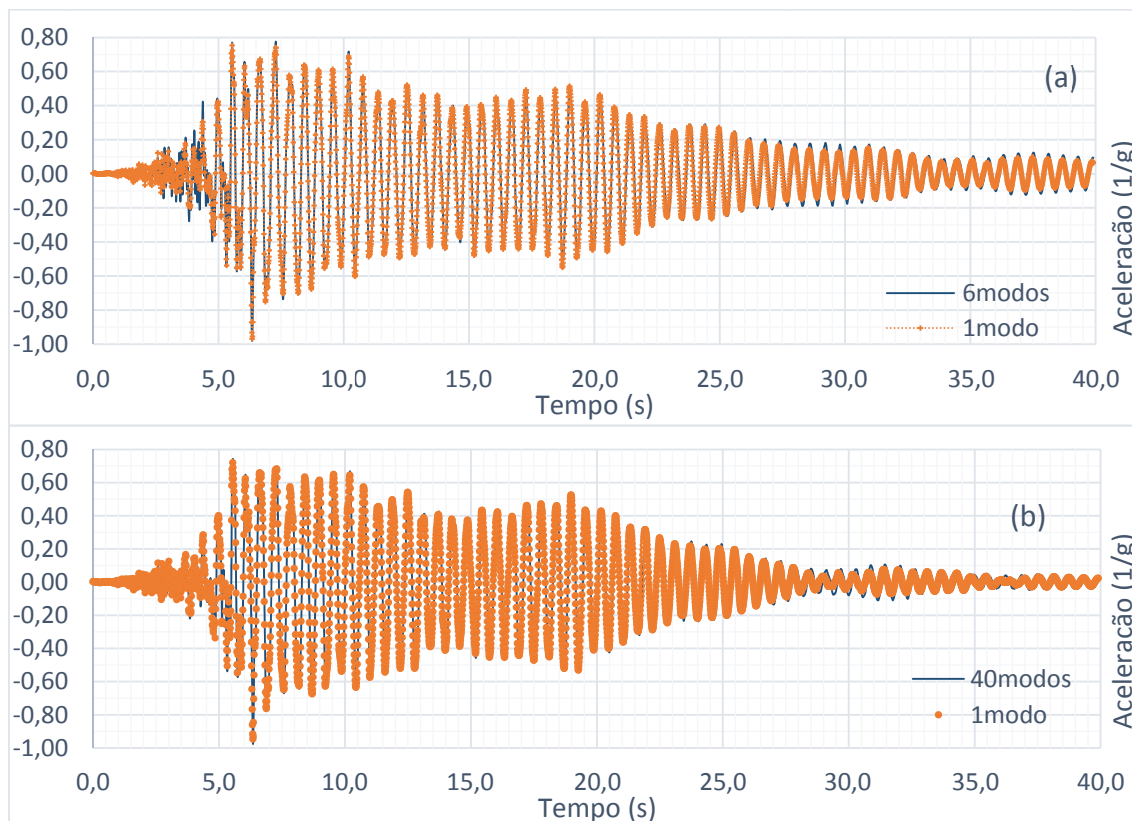
Fonte: (Autora, 2018)

Na tabela 2 são indicadas as respostas máximas das análises, para o método do espectro e o método do histórico do tempo (Modelos I e II). Observa-se que os resultados possuem uma excelente aproximação quando comparados com o método do espectro de resposta.

Tabela 2 – Respostas de aceleração e deslocamento máximos no topo da torre da análise sísmica

Método Sismos	Espectro Deslocamento (m)	I Deslocamento (m)	II Deslocamento (m)	Espectro Aceleração (g)	I Aceleração (g)	II Aceleração (g)
Landers - CC1	0.031	0.030	0.028	0.344	0.315	0.297
Landers - CC2			0.027			
LomaPrieta-CC1	0.067	0.072	0.070	0.803	0.782	0.744
LomaPrieta-CC2			0.069			

Figura 9 – Histórico de aceleração no topo da torre dos modelos I (a) e II (b) para o sismo de Loma Prieta (CC1)



Fonte: (Autora, 2018)

Verifica-se que os deslocamentos máximos de aproximadamente $L/733$ e $L/305$, considerando-se L a altura da torre. Tomando-se como referência a aceleração máxima da ação do sismo de Landers e Loma Prieta (*peak ground acceleration, PGA*), verifica-se acelerações com amplificação de 2 e 2.25 respectivamente.

5 CONCLUSÃO

Foram apresentados dois modelos numéricos em elementos finitos para avaliação das propriedades dinâmicas e desempenho sísmico da turbina eólica de 65kW. Na solução da análise modal foi utilizado o método dos vetores de Ritz, para a solução da análise sísmica foi utilizado o método da sobreposição modal, ambos no software de elementos finitos SAP2000®.

Na análise modal verificou-se que as frequências obtidas possuem uma boa aproximação quando comparadas com resultados de trabalhos anteriores. Foi obtido um fator de participação modal próximo de 80% nos graus de liberdade da estrutura, nos modelos, o que indicou que os modos de vibração mais importantes foram capturados. Em relação ao modo fundamental (1º. modo), foi possível verificar uma predominância em ambos os modelos.

Na análise sísmica, as respostas foram obtidas em termos de deslocamentos e acelerações, pelo método do espectro de resposta e pelo método do histórico no tempo apresentaram uma excelente aproximação. Para as ações sísmicas em estudo, o modo fundamental foi dominante, com isso o método do espectro e as análises considerando apenas esse modo foram eficientes para a solução.

Foi possível verificar que para os sismos com baixa intensidade como os de estudo, a turbina eólica de 65kW deslocamentos consideráveis, de aproximadamente $L/733$ e $L/305$. A amplificação da aceleração do solo também pode ser considerada elevada, com valores máximos superiores a 2. Valores de referência para deslocamentos máximos não foram encontrados na bibliografia.

É possível concluir que, devido as características das turbinas eólicas, como massas de equipamentos concentrados no topo e elevada altura, as ações sísmicas não devem ser negligenciadas.

6 REFERÊNCIAS

CSI- Computers & Structures Inc, 2012 - *Computers & Structures Knowledge Base*. University of California., URL <https://wiki.csiberkeley.com/display/kb/home>. Acesso em 07/09/2018

I. Prowell, M. Veletzos, A. Elgamal and J. Restrepo, 2009. *Experimental and Numerical Seismic Response of a 65-kW Wind Turbine*. Journal of Earthquake Engineering, 13(8):1172–1190.

I. Prowell, C.-M. Uang, A. Elgamal, J.E. Luco and L, 2012. *Guo. Shake Table Testing of a Utility-Scale Wind Turbine*. Journal of Engineering Mechanics, 138:900–909.

I. Prowell, A. Elgamal and J. Lu, 2010. *Modeling the Influence of Soil Structure Interaction on the Seismic Response of a 5MW Wind Turbine*. Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

I. Prowell, 2011. *An Experimental and Numerical Study of Wind Turbine Seismic Behaviour*. PhD thesis, University of California, San Diego.

IEC,2005. IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: Design Requirements. International Electrotechnical Commission, 3rd edition.



GL, 2010. *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany.

GWEC, 2017. http://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf . Acesso em 07/09/2018.

R.A. Kjørlaug, 2013. *Seismic Response of Wind Turbines: Dynamic Analysis of a Wind Turbine in Horizontal and Vertical Direction – Subject to Earthquake, Wind & SSI*. Master's thesis, Norwegian University of Science & Technology, Trondheim, Norway.

Risø, 2002. *Guidelines for Design of Wind Turbines*. Det Norske Veritas & Wind Energy Department of Risø National Laboratory.