



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RUTH CHAVES BARROS

**DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES SOB A AÇÃO DE
SISMOS: modelos simplificados e numéricos**

Recife
2019

RUTH CHAVES BARROS

**DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES SOB A AÇÃO DE
SISMOS: modelos simplificados e numéricos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, área de Estruturas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B277d Barros, Ruth Chaves.

Dinâmica estrutural de aerogeradores sob a ação de sismos: modelos simplificados e numéricos. / Ruth Chaves Barros. - 2019.

102 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Análise dinâmica. 3. Análise sísmica. 4. Aerogeradores. 5. Método dos elementos finitos. I. Ribeiro, Paulo Marcelo Vieira. (Orientador). II. Título

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2020-68

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES SOB A
AÇÃO DE SISMOS: modelos simplificados e numéricos**

defendida por
Ruth Chaves Barros
Considera a candidata APROVADA

Recife, 28 de fevereiro de 2019

Orientadores:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro – UFPE
(**Orientador**)

Prof. Dr. Ézio da Rocha Araújo – UFPE
(**Examinador interno**)

Prof. Dr. Gustavo de Novaes Pires Leite – IFPE
(**Examinador externo**)

Dedico a minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Paulo Marcelo Ribeiro, pela oportunidade, disponibilidade e generosidade com que me incentivou neste trabalho, nas disciplinas do mestrado e na vida acadêmica. Pelos conhecimentos de dinâmica das estruturas ensinados e pela grande motivação que sempre manteve.

Agradeço à banca, pela disposição e colaboração para este trabalho.

A minha família e amigos pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu chefe Marcello pelo incentivo profissional e pela compreensão nos momentos em que precisei me ausentar no trabalho por causa do Mestrado.

Aos professores e profissionais que sempre me incentivaram: Eduardo Cordeiro Leite, Ézio da Rocha Araújo, Gulielmo Viana Dantas, Paulo Roberto M. de Carvalho, Ricardo Carvalho, Sergio José Priori e Zacarias Chamberlain.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Mestrado, especialmente aos amigos Eliel Reis, Guilherme Priori, Natanielton Santos, Roberta Tabaczinski e Sergio Priori Filho.

Aos colegas do grupo MAMNE, cujo apoio e amizade estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço aos funcionários da secretaria da pós-graduação (PPGEC) da UFPE, em especial a Andrea Negromonte, pela atenção e dedicação.

*“Quando tudo parece estar indo contra você,
lembre-se que o avião decola contra o vento,
não a favor dele.” (Henri Ford)*

RESUMO

A expansão da energia eólica tem levado a instalação de parques eólicos em áreas com risco sísmico. China e EUA, entre outros países, possuem parques eólicos instalados em zonas sismicamente ativas. Os aerogeradores são estruturas altas, para maior captação do recurso eólico, e esbeltas, para atender a viabilidade econômica de projeto, o que os torna estruturas com frequências naturais muito baixas, e que podem ser facilmente excitadas pelas frequências características de um sismo. Por isso, neste trabalho pretende-se compreender o comportamento dinâmico de aerogeradores sob a ação de sismos, de forma a elaborar uma metodologia utilizando modelos numéricos e analíticos para a solução de problemas de dinâmica das estruturas. Inicialmente são indicados os principais componentes estruturais de um aerogerador e expostos fundamentos teóricos para modelagem matemática do comportamento dinâmico para sistemas de um grau de liberdade e respectiva generalização para múltiplos graus de liberdade. Para a solução do problema dinâmico, apresentam-se formulações analíticas, o método do espectro de resposta e o método do histórico no tempo, aplicando-se nos seguintes modelos: i) modelo teórico utilizando formulações analíticas e os espectros de resposta; ii) modelo numérico com elementos finitos de barras; iii) modelo numérico com elementos finitos de casca e sólido tridimensional. Para avaliação da metodologia proposta, os modelos são implementados com dados de dois tipos de aerogeradores: de pequeno porte (Nordtank 65kW) e de grande porte (NREL 5MW). Os acelerogramas utilizados possuem valores compatíveis com a aceleração do solo brasileiro (0,05 a 0,15g) recomendada pela Norma Brasileira e valores de uma possível ampliação (0,30g) devido a configuração de um novo mapa sísmico proposto. São propostas combinações em estado estacionado e em funcionamento e as respostas obtidas, de aceleração e deslocamento no topo, tensões nas seções da torre são comparadas. Foi possível concluir que para a ação sísmica, os deslocamentos são muito baixos quando comparados aos que a estrutura do aerogerador se encontra submetida em funcionamento. No entanto as respostas obtidas de acelerações e tensões ao longo da torre são importantes, devendo ser consideradas no projeto sísmico dessas estruturas.

Palavras-chave: Análise dinâmica. Análise sísmica. Aerogeradores. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The expansion of wind energy has led to the installation of wind farms in areas with seismic risk. China and the USA, among other countries, have wind farms installed in seismically active zones. The wind turbines are tall structures, for greater capture of the wind resource, and slender, to meet the economic feasibility of the project, which makes them structures with very low natural frequencies, which can be easily excited by the characteristic frequencies of an earthquake. Therefore, this work aims to understand the dynamic behavior of wind turbines under the action of earthquakes, in order to develop a methodology using numerical and analytical models to solve structural dynamics problems. Initially, the main structural components of a wind turbine are indicated and the theoretical foundations for mathematical modeling of dynamic behavior for systems of one degree of freedom and respective generalization for multiple degrees of freedom are exposed. To solve the dynamic problem, analytical formulations, the response spectrum method and the time history method are presented, applying to the following models: i) theoretical model using analytical formulations and response spectra; ii) numerical model with finite bar elements; iii) numerical model with finite shell elements and three-dimensional solid. To evaluate the proposed methodology, the models are implemented with data from two types of wind turbines: small (Nordtank 65kW) and large (NREL 5MW). The accelerograms used have values compatible with the acceleration of the Brazilian soil (0,05 to 0,15g) recommended by the Brazilian Standard and values of a possible expansion (0,30g) due to the configuration of a new proposed seismic map. Combinations in steady state and in operation are proposed and the responses obtained, acceleration and displacement at the top, stresses in the tower sections are compared. It was possible to conclude that for the seismic action, the displacements are very low when compared to those that the structure of the wind turbine is submitted to in operation. However, the responses obtained from accelerations and stresses along the tower are important, and should be considered in the seismic design of these structures.

Keywords: Dynamic analysis. Seismic analysis. Wind generators. Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Evolução das dimensões das aerogeradores.....	18
Figura 2	Mapa de sismicidade e a localização de parques eólicos de parte da região Nordeste	19
Figura 3	Evolução dos modelos para análise modal e análise dinâmica	20
Figura 4	Aerogerador (Vestas V90-3.0MW) e componentes.....	24
Figura 5	Pá de um aerogerador GE 1.5MW	25
Figura 6	Vista do interior da nacele de um aerogerador com gerador convencional.....	26
Figura 7	Vista de uma seção da torre e abertura da porta.....	27
Figura 8	Exemplo de Curva de Potência – NREL 5MW	28
Figura 9	Faixa de frequências de um aerogerador.....	30
Figura 10	Placas tectônicas e movimentos relativos indicados por setas; os terremotos são indicados por pontos	31
Figura 11	Definição da origem (falha e foco) e propagação das ondas sísmicas.	32
Figura 12	Mapa da sismicidade brasileira desenvolvido com os dados provenientes do Banco de Dados do SIS/UnB (SISBRA) e compilação de Berrocal et al. (1984)	34
Figura 13	Mapa das principais falhas tectônicas e lineamentos no território brasileiro	35
Figura 14	Mapa da sismicidade no Nordeste do Brasil no período de 2006 até 2010 e respectivas magnitudes de cada evento	36
Figura 15	Mapa sísmico: (a) proposto pela ABNT NBR 15421 (2006) e (b) versão preliminar da atualização proposta por Assumpção (2017).....	37
Figura 16	Exemplos de acelerogramas de sismos históricos, escala horizontal de tempo(s) e vertical de aceleração (g).....	39
Figura 17	Aerogerador de 65kW posicionada para o ensaio de mesa sísmica da UCSD- LHPOST	43
Figura 18	Sistema submetido ao movimento do solo	48
Figura 19	Classificação do métodos estáticos e dinâmicos de análise sísmica.....	52
Figura 20	Aerogerador e sistema de 1GL equivalente – Modelo I.....	58
Figura 21	Modelo II - elementos de barras e massa adicionada no topo.....	59
Figura 22	Características do modelo III - (a) modelo com elementos de casca na torre (b) nacele discretizada em elementos sólidos (c) base com apoios rígidos.....	60
Figura 23	Acelerogramas dos sismos de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge.	62
Figura 24	Ação do vento considerada.....	63
Figura 25	Dimensões do Aerogerador de 65kW.....	65
Figura 26	Modos de vibração do modelo I da aerogerador de 65Kw.....	68

Figura 27	Modos de vibração do modelo III da aerogerador 65kW	70
Figura 28	Espectros de aceleração do modelo I 65kW - (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge	71
Figura 29	Espectros de deslocamento do modelo I 65kW - (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge	72
Figura 30	Tensões principais máximas (a) T1 e (b) T2 de acordo com o PGA dos acelerogramas – modelo III – 65kW	75
Figura 31	Resposta de aceleração e participação do 1º.modo – modelo III – 65kW	76
Figura 32	Modos de vibração do modelo II do aerogerador de 5MW.....	80
Figura 33	Modos de vibração do modelo III do aerogerador de 5MW.....	81
Figura 34	Espectro de resposta de aceleração dos acelerogramas de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge – modelo I – 5MW	83
Figura 35	Espectro de resposta de deslocamento dos acelerogramas de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge – modelo I – 5MW	84
Figura 36	Resposta de acelerações ao longo do tempo dos modelos I, II, III dos acelerogramas de (a)Nahanni, (b)Landers, (c)Hollister, (d)El Centro, (e)Imperial Valley, (f)Loma Prieta, (g)Northridge – 5MW.....	86
Figura 37	Resposta de deslocamentos máximas – estado estacionado dos modelos I, II, III – 5MW.....	87
Figura 38	Resposta de acelerações máximas – estado estacionado dos modelos I, II, III – 5MW.....	87
Figura 39	Resposta de tensões máximas (a) T1 e (b) T2 na torre de acordo com a PGA – estado estacionado do modelo III – 5MW.....	88
Figura 40	Resposta de deslocamentos máximas – estado em funcionamento dos modelos II, III – 5MW	89
Figura 41	Resposta de tensões máximas (a) T1 e (b) T2 na torre de acordo com a PGA – estado em funcionamento do modelo III – 5MW.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estimativa de coeficientes de amortecimento de aerogeradores.....	52
Tabela 2	Propriedades de Inércia de massa dos modelos.....	59
Tabela 3	Características dos acelerogramas sísmicos utilizados nas análises	62
Tabela 4	Propriedades do aço estrutural.....	64
Tabela 5	Propriedades de massa e materiais do Aerogerador de 65kW.....	66
Tabela 6	Frequências e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo II – 65kW.....	68
Tabela 7	Frequências e participação modal obtidas para o modelo III – 65kW	69
Tabela 8	Respostas máximas de aceleração e deslocamento do modelo I – 65kW	73
Tabela 9	Respostas máximas de aceleração e deslocamentos do modelo II – 65kW	73
Tabela 10	Respostas de deslocamento do modelo III – 65kW.....	74
Tabela 11	Respostas de aceleração do modelo III – 65kW	74
Tabela 12	Propriedades do aerogerador – NREL 5MW.....	78
Tabela 13	Frequências naturais e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo II – 5MW.....	80
Tabela 14	Frequências naturais e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo III – 5MW	81
Tabela 15	Resumo de respostas máximas de aceleração – modelos I, II, III - 5MW.....	85
Tabela 16	Resumo de respostas máximas de deslocamento - modelos I, II, III - 5MW.....	85

LISTA DE ABREVIACÕES

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSSUM	Soma Absoluta
AEV	Aerogerador de eixo de eixo vertical
AEH	Aerogerador de eixo de eixo horizontal
AEP	Análise do Espectro de Potência
AHT	Análise no Histórico do Tempo
AER	Análise pelo Espectro de Resposta
AISC	American Institute of Steel Construction
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSB	Boletim Sísmico Brasileiro
BSL	<i>Building Standard Law</i>
CSI	<i>Computers & Structures INC.</i>
CQC	Combinação quadrática completa
CRESESB	Centro de Referências para Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
EC	<i>Eurocode</i>
GL	<i>Germanischer Lloyd</i>
GSHAP	<i>Global Seismic Hazard Assessment Program</i>
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
PGA	<i>Peak ground acceleration</i>
LHPOST	<i>Large High Performance Outdoor Shake Table</i>
ME	Método do espectro de resposta
MFE	Método das forças estáticas equivalentes

MHA	Método do histórico de acelerações no tempo
NBCC	<i>National Building Code of Canada</i>
NGL	Múltiplos Graus de Liberdade
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
RQSQ	Raiz Quadrada da soma dos quadrados
RSBR	Rede Sismográfica Brasileira
SISBRA	Observatório Sismológico de Brasília
UCSD	<i>University of California San Diego</i>
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último

LISTA DE SÍMBOLOS

$[\mathbf{M}]$	Matriz de massa da estrutura
$[\mathbf{C}]$	Matriz de amortecimento da estrutura
$[\mathbf{K}]$	Matriz de rigidez da estrutura
$\{P(t)\}$	Vetor de forças aplicadas associadas ao instante de tempo (t)
$\{\ddot{u}(t)\}$	Vetor das derivadas segundas (aceleração) da estrutura no instante de tempo (t)
$\{\dot{u}(t)\}$	Vetor das derivadas primeiras (velocidade) da estrutura no instante de tempo (t)
$\{u(t)\}$	Vetor deslocamento da estrutura no instante de tempo (t)
$u_t(t)$	Deslocamento total da estrutura no instante de tempo (t)
$u_s(t)$	Deslocamento da base da estrutura no instante de tempo (t)
$u(t)$	Deslocamento da massa da estrutura em relação a base no instante de tempo (t)
w_n	Frequência natural do n-esimo modo de vibração
$\{\phi_n\}$	Vetor dos modos de vibração da estrutura
$[\mathbf{M}_n]$	Matriz generalizada de massa da estrutura
$[\mathbf{C}_n]$	Matriz generalizada de amortecimento da estrutura
$[\mathbf{K}_n]$	Matriz generalizada de rigidez da estrutura
$[\phi]_n$	Matriz dos modos de vibração da estrutura
m	Massa de um corpo
c	Amortecimento de um corpo
k	Rigidez de um corpo
$\ddot{u}(t)$	Aceleração de um corpo
$\dot{u}(t)$	Velocidade de um corpo
$u(t)$	Deslocamento de um corpo
$u(t)$	Deslocamento de um corpo

ξ	Coeficiente de amortecimento relativo
$S_d(\xi, w)$	Deslocamento espectral do sistema
$S_v(\xi, w)$	Pseudo-velocidade espectral do sistema
$S_a(\xi, w)$	Pseudo-aceleração espectral do sistema
$x_{i,\max}$	respostas modais máximas do método do espectro de resposta
x_{ij}	respostas modais dos modos ij do método do espectro de resposta
E	Módulo de Elasticidade do material
f_y	Tensão de escoamento do aço
f_u	Tensão de ruptura do aço
g	gravidade
G	Módulo de cisalhamento do aço
I	Inércia da seção transversal
I_m	Inércia de massa rotacional (em torno do eixo z) do rotor
L	Comprimento do elemento estrutural (altura da torre)
m_t	Massa total da torre
m_n	Massa total do rotor
M_L	Magnitude do sismo (escala de magnitude de Richter)
M_w	Magnitude do sismo (escala de magnitude de momento)
T_1	Tensão principal do elemento SHELL (no sentido da circunferência da torre)
T_2	Tensão principal do elemento SHELL (no sentido da altura da torre)
ν	Coeficiente de <i>poisson</i> do aço
β_{ij}	quociente entre frequências próprias ij do método do espectro de resposta
ρ_{ij}	coeficiente de frequências próprias ij do método do espectro de resposta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos.....	19
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos específicos.....	20
12	Metodologia.....	20
1.3	Limitações do trabalho	21
1.4	Estrutura do trabalho.....	22
1.5	Programas utilizados.....	23
2	COMPONENTES DE UM AEROGERADOR	24
2.1	Principais Componentes	24
2.2	Características operacionais de um aerogerador	28
2.3	Dinâmica de torres de aerogeradores	29
3	SISMICIDADE E ESTADO DA ARTE DE EFEITOS SÍSMICOS EM AEROGERADORES.....	31
3.1	Sismicidade no Brasil	33
3.1.1	Sismicidade na região Nordeste	35
3.1.2	Sismicidade e a atual Norma Brasileira	36
3.2	Representação das ações sísmicas	37
3.3	Estado da arte sobre ações sísmicas em aerogeradores	38
3.1.1	Estudos com modelos numéricos de aerogeradores.....	39
3.1.2	Ensaio de aerogeradores em escala real.....	42
3.3.3	Estudos sobre sismicidade no Brasil.....	44
3.3.4	Recomendações das Normas Internacionais	45
4	DINÂMICA APLICADA A ESTRUTURAS DE AEROGERADORES	47
4.1	Equação do movimento para sistemas Lineares.....	47
4.1.1	Análise Modal (vibração livre sem amortecimento)	48
4.1.2	Método da Superposição modal.....	49
4.2	Amortecimento	50
4.2.1	Amortecimento em aerogeradores	51
4.3	Métodos de análise dinâmica sísmica	52
4.3.1	Análise pelo Espectro de Resposta.....	53
4.3.2	Análise no Histórico do Tempo	55
4.4	Descrição dos métodos de solução	56
4.4.1	Modelo I.....	57

4.4.2	Modelo II	58
4.4.3	Modelo III.....	60
4.5	Ações e combinações adotadas na análise dinâmica.....	61
4.5.1	Ação dos sismos.....	61
4.5.2	Ação do vento.....	62
4.5.3	Ações combinadas.....	63
4.6	Propriedades do aço estrutural.....	64
5	MODELOS NUMÉRICOS DE UM AEROGERADOR DE 65kW.....	65
5.1	Descrição do aerogerador.....	65
5.2	Análise modal.....	66
5.2.1	Modelo I.....	66
5.2.2	Modelo II.....	67
5.2.3	Modelo III.....	69
5.3	Análise dinâmica.....	70
5.3.1	Modelo I.....	70
5.3.2	Modelo II.....	73
5.3.3	Modelo III.....	74
5.4	Comentários e discussão	76
6	MODELOS NUMÉRICOS DE UM AEROGERADOR DE 5MW	78
6.1	Descrição do aerogerador.....	78
6.2	Análise modal.....	78
6.2.1	Modelo I.....	79
6.2.2	Modelo II.....	79
6.2.3	Modelo III.....	80
6.3	Análise dinâmica.....	82
6.3.1	Modelo I.....	82
6.3.2	Modelo II e III.....	84
6.3.3	Combinação para o estado estacionado do aerogerador	86
6.3.4	Combinações para o estado em funcionamento do aerogerador.....	89
6.4	Comentários e discussão	90
7	CONCLUSÕES.....	92
7.1	Sugestão para trabalhos futuros.....	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as questões como o aquecimento global e a possível escassez de combustíveis fósseis incentivaram o interesse por energias provenientes de recursos renováveis. A energia eólica destaca-se por ser uma fonte de combustível limpa, proveniente de um recurso eólico abundante e com uma tecnologia *onshore* bem desenvolvida.

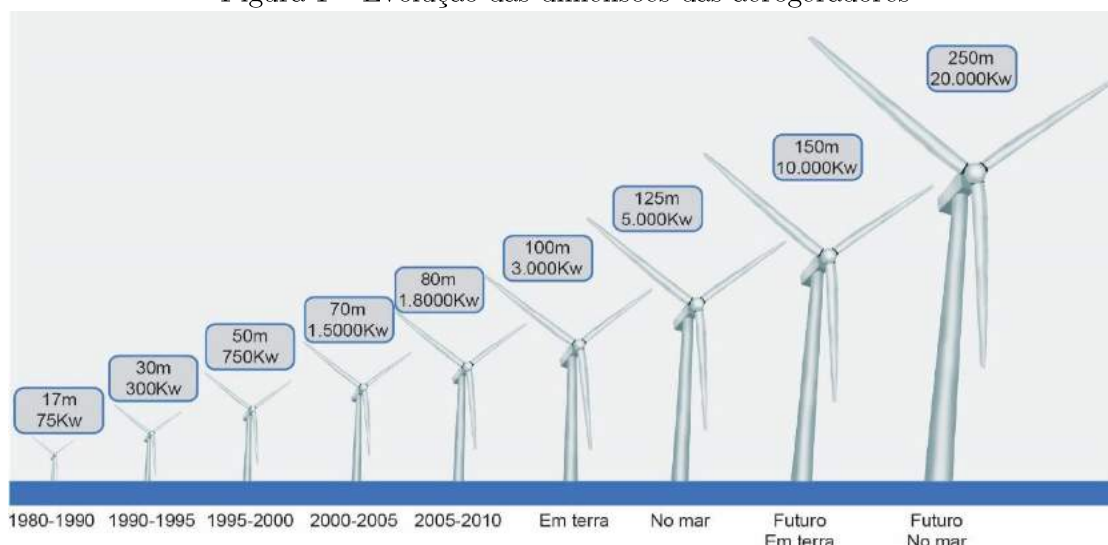
De acordo com estatísticas da GWEC, ao final do ano de 2018, a capacidade instalada global de energia eólica foi de aproximadamente 597 GW, o que representa 6% da demanda mundial de eletricidade (GWEC, 2018). No Brasil, a capacidade instalada é de 15,40 GW, com 619 parques eólicos instalados e 7.598 aerogeradores em operação, o que representa 9% da matriz energética nacional (ABEEOLICA, 2018).

A região Nordeste possui a maior concentração de parques eólicos e a maior capacidade instalada do país. Dos nove estados nordestinos, oito possuem parques eólicos com destaque para: Rio Grande do Norte (154 parques e 4,15 GW de capacidade instalada), Bahia (165 parques e 4,07GW), Ceará (79 parques e 2,07GW) e Piauí (60 parques 1,63 GW). Entre os meses de julho a novembro, denominado como “safra de ventos”, ocorre o período de maior fator de capacidade das usinas eólicas. Neste período, no dia 26/08/2018, 89% da energia consumida no subsistema Nordeste veio das eólicas, com fator de capacidade de 74% (ABEEOLICA, 2018).

O potencial de produção de um aerogerador é influenciado da altura, pois torres mais altas captam o vento com velocidades médias mais altas e constantes. Com o desenvolvimento de materiais mais leves para as pás e a torre, geradores mais modernos e tecnologias de controle mais eficientes, foi possível o aumento do diâmetro do rotor e da altura da torre, o que tem proporcionado ao longo dos anos, um aumento da capacidade de produção do aerogerador (Figura 1).

Com a expansão da tecnologia eólica, nos últimos anos, diversos parques eólicos foram instalados em regiões que possuem risco sísmico. Estima-se que mais de um quarto dos aerogeradores instalados no ano de 2007 foram erguidas em regiões de elevado risco sísmico como China, Estados Unidos da América (EUA) e Índia (PROWELL, 2011).

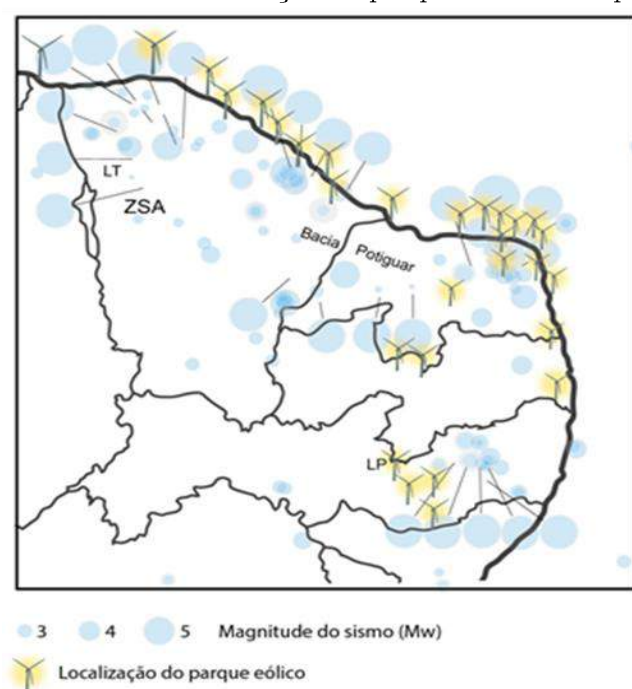
Figura 1 – Evolução das dimensões das aerogeradores



Fonte: Adaptado de SBC Energy Institute (2018)

No Brasil, os estados do Rio Grande do Norte e Ceará possuem uma grande concentração de parques eólicos, com cerca de 233 parques instalados (ABEEOLICA, 2017). Essa região também apresenta uma elevada sismicidade, especificamente em torno da Bacia Potiguar (costa do estado do Rio Grande do Norte e extremo-oeste do estado do Ceará), onde é comum o registro de eventos sísmicos. Observa-se na figura 2 os principais eventos sísmicos de magnitude moderada (magnitude de Richter $M_w=3$ a 5) e a localização dos parques eólicos instalados nessa região.

Figura 2 - Mapa de sismicidade e a localização de parques eólicos de parte da região Nordeste



Fonte: A autora (2019)

Os aerogeradores possuem um comportamento dinâmico complexo, que se estende das pás à fundação. A torre está submetida às ações do vento turbulento e do movimento dos componentes mecânicos, que podem provocar danos por vibração e fadiga. Com isso, a fim de evitar a amplificação dinâmica, é desejável que a frequência fundamental da torre esteja distante das frequências de excitação, entretanto sem aumentar o custo e manter a viabilidade econômica do projeto. A vibração da torre é transferida para o elemento de fundação, o que gera diferentes estados de tensões no solo. Com isso, as fundações e toda a estrutura são afetadas pela modificação dinâmica das condições do solo (TADDEI, 2014).

Com estrutura semelhante a um pêndulo invertido, os aerogeradores são altamente suscetíveis à ação sísmica. Devido à esbeltez da estrutura da torre associada à concentração de aproximadamente 40% da massa total no topo, a força de inércia induzida pelo sismo pode causar elevadas acelerações no topo, capazes de danificar componentes mecânicos e prejudicar o funcionamento.

Devido às características estruturais e dinâmicas complexas, a análise sísmica de aerogeradores não deve ser feita da mesma forma que as edificações. Analisando-se as recomendações dos regulamentos internacionais específicos para certificação de aerogeradores, (RISØ, 2001), (GL, 2010) e (IEC, 2005), verifica-se que estes apresentam poucas informações sobre métodos de análise, coeficiente de amortecimento e tempo de retorno do sismo, bem como não explicam como a resposta dinâmica deve ser avaliada.

Diante do exposto, este trabalho apresenta uma investigação do comportamento sísmico de aerogeradores, considerando modelos numéricos simplificados e numéricos, capazes de representar as características dinâmicas dos aerogeradores.

A utilização de modelos estruturais simplificados permite que resultados adequados possam validar de um projeto preliminar, enquanto que um modelo estrutural em elementos finitos é necessário para a aprimorar a verificação de um projeto final. Este assunto tende a se tornar de grande importância com o desenvolvimento da energia eólica em regiões com atividade sísmica, aliado à instalação de aerogeradores de maior altura e capacidade, mais suscetíveis às ações sísmicas.

1.1 Objetivos

Para a realização da pesquisa e para melhor fundamentar o estudo proposto, foram estabelecidos os objetivos descritos a seguir:

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os problemas de dinâmica em estruturas de aerogeradores, tendo-se a ação sísmica como ação principal.

1.1.2 Objetivos específicos

Elaborar uma metodologia para a construção de modelos simplificados e numéricos compatíveis com as características dinâmicas do sistema e identificar métodos de solução mais adequados, por meio de formulações da dinâmica de estruturas.

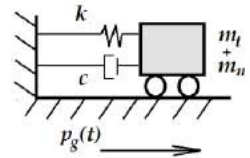
Analisar as respostas obtidas dos modelos, por meio da simulação de dois aerogeradores representativos, a analisar o desempenho dinâmico da estrutura sob ação do sismo.

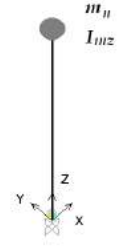
1.2 Metodologia

De acordo com os objetivos descritos, este trabalho inicialmente identificou os componentes estruturais dos aerogeradores, selecionando os que contribuem para o comportamento dinâmico do sistema. Dessa maneira, excluiu-se as pás dos modelos estruturais analisados, tendo-se ênfase apenas no desempenho das torres.

Em seguida, foram selecionados três possíveis modelos do sistema dinâmico: i) modelo analítico de um oscilador de um grau de liberdade; ii) modelo numérico discretizado com elementos finitos de barras; iii) modelo numérico discretizado com elementos finitos de cascas e sólidos, indicados na Figura 3.

Figura 3 – Evolução dos modelos para análise modal e análise dinâmica

Descrição	Características e Solução	Representação
Modelo I	A estrutura é descrita com um sistema de um grau de liberdade. Solução : espectro de resposta	

Modelo II	A torre é discretizada com elementos finitos de barras, são inseridos massas e rigidez adicional no topo. Solução: superposição modal	
Modelo III	A torre é discretizada com elementos finitos de cascas, e elementos adicionais com elementos de sólidos. Solução: superposição modal	

Fonte: A autora (2019)

Em uma primeira etapa de solução, foi feita uma análise modal para definição das frequências naturais e modos de vibração dos modelos estruturais. Esta etapa é importante pois, sob excitação dinâmica, a resposta da estrutura é um reflexo dos modos de deformação e características dinâmicas.

Para a análise sísmica, são utilizados o espectro de resposta e o histórico de acelerações no tempo, cujas soluções foram obtidas utilizando-se método da superposição modal. Para a ação do sismo, foram considerados pelo menos três acelerogramas de eventos reais, de acordo com a ABNT NBR 15421 (2006). As acelerações de solo utilizadas são compatíveis com a faixa recomendada pela atual norma brasileira e uma possível ampliação.

Dois modelos de aerogeradores foram simulados, da Nordtank de 65kW e da NREL de 5MW, utilizando os métodos descritos anteriormente. Além de analisar a eficiência dos modelos, buscou-se comparar quanto representam as ações do sismo em relação às ações características do funcionamento do aerogerador.

1.3 Limitações do trabalho

As principais limitações dos modelos desenvolvidos neste trabalho são:

- Foram analisados apenas aerogeradores do tipo *onshore* com eixo horizontal;
- Os equipamentos mecânicos (nacele e o rotor), quando incluídos nos modelos numéricos, são considerados com geometria aproximada de paralelepípedo e de cilindro vazado respectivamente, com distribuição uniforme de massa;

- Elementos adicionais da torre como ligações, enrijecedores, escadas e aberturas não são consideradas na discretização da torre;
- A ação do vento foi considerada nos modelos como força equivalente (*equivalent thrust force*) aplicada em um nó equivalente ao centro do rotor, os dados foram obtidos na bibliografia;
- Apenas o coeficiente de amortecimento estrutural é considerado nos modelos numéricos, não sendo considerado o amortecimento aerodinâmico.
- O elemento de fundação não é discretizado nos modelos, com isso efeitos da distribuição de tensões no solo e a interação solo-estrutura são desprezadas.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é constituído por 7 (sete) capítulos. No primeiro capítulo, faz-se uma breve introdução do tema proposto, descrevem-se os objetivos e a metodologia utilizada na pesquisa.

No capítulo 2 (dois), apresentam-se as principais características dos aerogeradores, seus componentes mais importantes e estados de funcionamento. Os conceitos e nomenclatura apresentados são utilizados ao longo do trabalho.

No capítulo 3 (três), faz-se uma introdução sobre sismicidade, origem dos sismos e métodos de representação das ações sísmicas (acelerogramas). São discutidas questões referentes à sismicidade brasileira, índices atuais e uma possível atualização do mapa sísmico brasileiro. Ao final, apresenta-se o estado da arte de trabalhos sobre ações sísmicas em aerogeradores e as recomendações das Normas internacionais (GL, 2010; RISø, 2001; IEC, 2005) e a ABNT NBR 15421 (ABNT, 2006).

No capítulo 4 (quatro), apresentam-se alguns conceitos da teoria de dinâmica estrutural aplicada a estrutura dos aerogeradores, definem-se as equações do movimento sísmico e respectivos métodos de solução no domínio do tempo, amortecimento estrutural e a consideração em estruturas de aerogeradores.

No capítulo 5 (cinco), são desenvolvidos três modelos (simplificado, numérico com elementos de barras e numérico com elementos de cascas) para as análises dinâmicas sísmicas de um aerogerador de 65kW da Nordtank®. Já no capítulo 6 (seis), são desenvolvidas as análises do aerogerador de 5MW da NREL.

Por fim, no capítulo 7 (sete), apresentam-se as conclusões e desenvolvimentos para trabalhos futuros.

1.5 Programas utilizados

Os seguintes programas foram usados neste trabalho:

- **PTC Mathcad** - *Engineering Math Software*
- **SAP2000 v20** - *Integrated Structural Analysis em Design, CSI Inc.*
- **SeismoSignal** - *Earthquake Software for Signal Processing of Strong-Motion data, Seismosoft Inc.*

2 COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Os aerogeradores são equipamentos de conversão de energia eólica em energia elétrica. Com o movimento das pás e o giro do eixo do rotor, a energia cinética do vento transforma-se em energia mecânica rotacional, e posteriormente, em um gerador associado ao eixo do rotor, é convertida em energia elétrica. De acordo com seu eixo de rotação, podem ser classificados como aerogerador de eixo vertical (AEV) e horizontal (AEH).

Atualmente, os AEH's são mais utilizados no mercado mundial. Nesses aerogeradores, as pás possuem formato de aerofólio, capaz de gerar uma diferença de pressão entre as faces e forças de elevação aerodinâmicas (*Lift*), que faz com que as pás girem em torno do cubo central.

Nos aerogeradores modernos, o rotor (conjunto de pás e cubo) é projetado na direção do vento (*upwind*) e com um conjunto de três pás. Rotores de uma ou duas pás permitem uma maior velocidade de rotação, entretanto, causam mais instabilidade para a torre, por isso configurações de três pás são mais utilizadas atualmente. Com isso, é possível alcançar uma capacidade de geração de energia com baixa velocidade, menor ruído e maior durabilidade das pás.

2.1 Principais Componentes

Os aerogeradores possuem quatro componentes básicos: o rotor que é composto de cubo e das pás, a nacele, a torre e a fundação, indicados na Figura 4.

Figura 4 - Aerogerador (Vestas V90-3.0MW) e componentes



Fonte: GE Reports (2016)

As pás (Figura 5) possuem formato que é uma união entre aerodinâmica e estrutura, sendo que a primeira exige seções delgadas de aerodinâmica de mínimo arrasto, e a última busca seções circulares robustas (JAMIESON, 2011). Ao longo do comprimento da pá, a aerodinâmica governa a região externa até a ponta, nos 50% externos do vão, onde os esforços de flexão são mínimos e podem ser utilizadas as seções aerofólios. Na área da raiz da lâmina, em torno de 25% do vão, os momentos de flexão são elevados, e, com isso, são utilizadas seções circulares e mais robustas.

Figura 5 - Pá de um aerogerador GE 1.5MW



Fonte: Adaptado de GE Renewable Energy (2016)

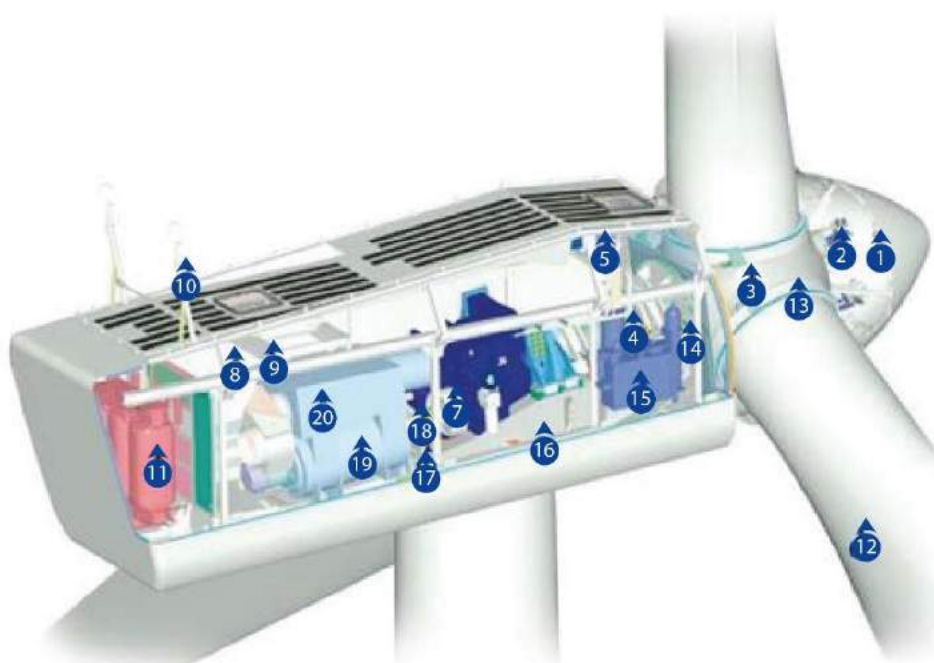
O cubo é o elemento que conecta as pás ao eixo do rotor e abriga o sistema de controle de passo ativo (*active pitch control*). Este permite a rotação do ângulo das pás, de maneira que, em velocidades de vento abaixo da potencia nominal, o ângulo de inclinação das pás seja o máximo. Para velocidades do vento acima da velocidade nominal, o ângulo de inclinação das pás é reduzido, para manter a potencia do gerador na potencia nominal.

A nacele é o elemento que abriga os componentes mecânicos, composto pelo rotor, gerador, caixa multiplicadora, anemômetro e sistemas de acionamento, controle e freios, indicados na Figura 6. Posicionado entre a nacele e a torre, o sistema de controle de guinada (*yaw control*) permite o movimento da nacele e a orientação do rotor perpendicular a direção ao vento.

A torre é o elemento de sustentação da nacele e rotor. A altura da torre torna-se importante, pois quanto mais elevado o rotor, melhor a qualidade do recurso eólico: mais estável, com menor turbulência e com velocidades mais constantes.

Atualmente as torres podem ser fabricadas em aço ou concreto. As torres em aço utilizam ligas especiais de alta resistência como o: ASTM A572, A1011/1018 HSLAS-50, EN10025 S355 e NBR6656 LNE380. As torres em concreto utilizam concreto pré-moldado protendido.

Figura 6 - Vista do interior da nacele de um aerogerador com gerador convencional



- | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1. Controlador do Cubo, | 7. Plataforma de | 11. Pás, | 16. Motores de |
| 2. Controle <i>pitch</i> , | serviços, | 12. Rolamento das pás, | posicionamento da |
| 3. Fixação das pás no | 8. Controladores e | 13. Sistema de trava do | nacele, |
| cubo e Eixo principal, | Inversores, | rotor, | 17. Luva de |
| 4. Aquecedor de óleo, | 9. Sensores de direção e | 14. Sistema hidráulico, | acoplamento, |
| 5. Caixa multiplicadora, | velocidade do vento, | 15. Plataforma da | 18. Gerador, |
| 6. Sistema de freios, | 10. Transformador de | nacele, | 19. Aquecimento de ar. |
| | alta tensão, | | |

Fonte: Adaptado de CRESESB (2018)

A torre em aço tubular cônica é a mais utilizada em todo o mundo. Esta é formada por seções de 20-30m, que possuem pequenas flanges em suas extremidades e conectam-se por soldas e parafusos estruturais. A seção inferior conecta-se a fundação por meio de um anel de coroamento, e o topo conecta-se a nacele. Dentre as vantagens está a rapidez de montagem. Entretanto, possui um custo competitivo até 80 metros de altura, pois para alturas maiores faz-se necessário o aumento da espessura da chapa, além do aumento do diâmetro, consequentemente elevando o custo da torre (ROCHA, 2016).

No Brasil, a torre em aço tubular ainda é líder do mercado, apesar de se ter uma grande dificuldade estratégica para fabricação do elemento em solos brasileiros (ROCHA, 2016). A grande utilização desse tipo de torre deve-se aos projetos europeus trazidos pelos fabricantes de aerogeradores, e que ao longo dos anos vão se adaptando para que se tenha aerogeradores com as características brasileiras. Com isso, nos últimos anos, as torres em concreto pré-moldado protendido surgem como uma alternativa para as alturas entre 100-160m.

A torre em concreto pré-moldado protendido é composta por seções pré-fabricadas, que na montagem são empilhadas, encaixadas e protendidos por cabos posicionados no sentido longitudinal. As seções podem ter entre 5 e 30m cada uma. O sistema possui uma grande vantagem que é o concreto. Com isso, além do baixo custo do material (em relação ao aço especial) e da mão de obra, há uma tendência implantação de usinas de pré-moldados próximas aos parques eólicos, o que permite que seja reduzido o custo de transporte.

A abertura da porta é importante e indispensável da torre, usada para operação e manutenção (Figura 7). No entanto, a abertura da porta é ponto fraco da torre no aspecto estrutural, pois o risco de flambagem é maior no trecho inferior da torre, onde localiza-se a abertura da porta.

Figura 7 - Vista de uma seção da torre e abertura da porta



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons (2018)

As fundações para os aerogeradores onshore podem ser superficiais (sapatas) ou profundas (blocos com estacas). Nas fundações superficiais o carregamento é transmitido ao terreno por meio de pressões distribuídas, sob a base da fundação. Recomenda-se esse

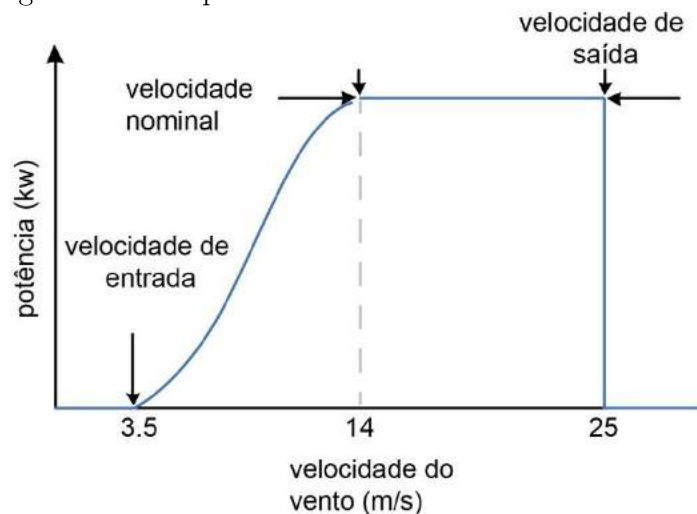
tipo de fundação para solos rígidos, que possuem elevado ângulo de atrito e que não sofram muito recalque (SVENSSON, 2010).

Na fundação com estacas, o carregamento é transmitido ao terreno pela base (resistência de ponta) e pela superfície (atrito lateral), sendo geralmente utilizadas estacas Raiz, Hélice Contínua e Aluvial Anker. De acordo com Moura (2007), em parques eólicos próximos ao litoral e com perfis de solo granulares, tem-se adotado estacas tipo Aluvial Anker, enquanto que parques mais afastados da costa e com perfis de solo mais variáveis, tem-se adotado estacas tipo Raiz.

2.2 Características operacionais de um aerogerador

Os principais estados operacionais de um aerogerador são: Partida, Operação Normal, Parada Normal e de Emergência; e os estados não operacionais são: Ocioso e Estacionado. Estes podem ser explicados de acordo com variação da velocidade do vento e curva de potência indicada na Figura 8.

Figura 8 - Exemplo de Curva de Potência – NREL 5MW



Fonte: Adaptado de Jonkman *et al.* (2009)

O Estado Ocioso ocorre quando as velocidades de vento são muito baixas, inferiores a velocidade de entrada (*cut-in speed*) e não há torque suficiente para o giro do rotor. Quando a velocidade de vento ultrapassa a velocidade de entrada, o rotor entra em movimento e inicia a produção, sendo esta condição de Operação Normal.

Quando a velocidade do vento continua a aumentar e atinge a velocidade nominal (*rated output speed*), o aerogerador continua em Operação Normal, entretanto, o sistema

de controle executa o controle de potência e limita a máxima potência produzida (*rated output power*), para que esta não ultrapasse a capacidade do gerador.

Nos casos em que a velocidade do vento atinge a velocidade de saída (*cut-out speed*), o sistema de controle executa a parada Normal, de maneira a prevenir ações na estrutura que possam danificar o rotor e o gerador. Em geral utilizam-se a frenagem aerodinâmica, que consiste de giro angular das pás do rotor para fora do vento, que reduzem as forças de resistência aerodinâmicas e freando o rotor.

Em situações de risco a pessoas ou partes do aerogerador é acionada a Parada de Emergência do rotor, com retorno rápido das pás para a posição de parada Normal.

2.3 Dinâmica de torres de aerogeradores

Para estruturas de comportamento dinâmico, a frequência fundamental, é importante para evitar a amplificação dinâmica e ressonância, que pode ocorrer quando a frequência da estrutura se aproxima das frequências das ações, que no caso deste estudo são vento e sismo. Como consequências, a estrutura pode apresentar elevadas amplificações dinâmicas de deslocamentos, tensões elevadas e fadiga acelerada.

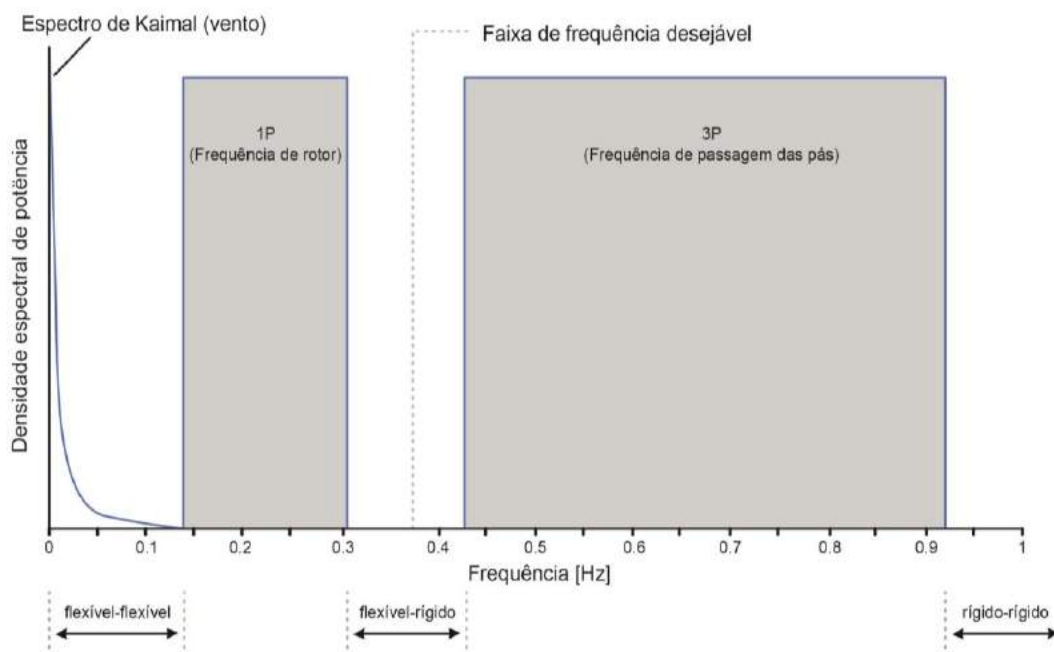
Como as características da nacelle, rotor e a altura do cubo são previamente definidas, uma prática corrente no projeto de aerogeradores consiste em definir a geometria da torre de tal modo que sua frequência fundamental não coincida com as frequências:

- 1P - Frequência de rotação fundamental do rotor;
- 3P - Frequência de passagem das pás do rotor.

Segundo Hau (2006), as forças excitantes causadas por ações aerodinâmicas são as mais críticas, uma vez que não podem ser evitadas, em contraste as ações de desequilíbrio de massa do rotor.

Devido à dificuldade de calcular a frequência fundamental exata da estrutura em fase de projeto, pois há vários fatores que podem influenciar, a Norma DNV (2002) recomenda que a frequência da torre deve ser mantida fora de $\pm 10\%$ dos intervalos de frequência 1P e 3P (DNV, 2002; RISØ, 2001). Na Figura 9 são indicadas as faixas de frequência das forças de excitação e o possível posicionamento da faixa de frequências da torre.

Figura 9 - Faixa de frequências de um aerogerador



Fonte: A autora (2019)

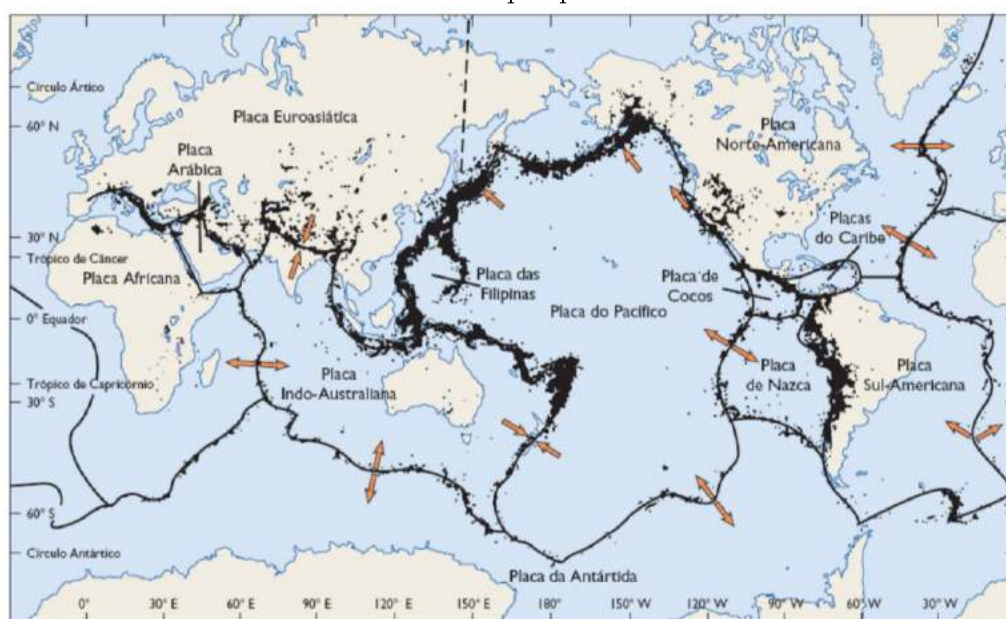
Para evitar a coincidência com as frequências 1P e 3P, existem três opções de projeto. Na primeira a estrutura possui com um a frequência fundamental maior que o intervalo de frequência 3P, denominada estrutura rígida-rígida (*stiff-stiff*). Na segunda a estrutura possui frequência fundamental entre os intervalos de frequência 1P e 3P, chamada estrutura flexível-rígida (*soft-stiff*). Na terceira a estrutura possui com um a frequência fundamental menor que o intervalo de frequência 1P, denominada estrutura flexível-flexível (*soft-soft*). Procura-se posicionar a frequência da torre no intervalo intermediário flexível-rígido, evitando-se torres muito flexíveis e com grandes deformações ou muito rígidas e economicamente inviáveis.

3 SISMICIDADE E ESTADO DA ARTE DE EFEITOS SÍSMICOS EM AEROGERADORES

De acordo com a teoria tectônica de placas, a crosta terrestre e uma parte superior do manto (litosfera) formam uma camada rochosa e descontínua, fragmentada em gigantescos blocos que formam os continentes e fundos de oceanos e mares. Os blocos, denominadas de placas tectônicas, estão em constante movimento sobre a camada da fluida do manto (astenosfera), formando regiões de encontro (zona de convergência), de afastamento (zona de divergência) ou de movimento lateral (zona cisalhante). Nas regiões ao longo dos limites de placas ocorrem intensas atividades geológicas, como terremotos e a criação de elementos topográficos como vulcões e fossas oceânicas (Figura 10). Um terremoto ou abalo sísmico é um movimento brusco do terreno, gerado por fenômenos geológicos do movimento de placas ou por atividade vulcânica. Nas bordas das placas tectônicas, devido o impedimento ao deslocamento, ocorre um acúmulo de energia de deformação. Quando a resistência da rocha é atingida, a energia acumulada é liberada e se propaga por meio de ondas de deformação.

São denominados cinturões sísmicos, faixas em torno da qual ocorrem os principais terremotos. De acordo com Assumpção e Dias Neto (2000), cerca de 75-80% da energia anual liberada pelos terremotos ocorre no cinturão *circum-pacífico*, 15-20% na zona *mediterrânea-transasiática* e 3-7% pelas cadeias *meso-oceânicas*.

Figura 10 – Placas tectônicas e movimentos relativos indicados por setas; os terremotos são indicados por pontos



Fonte: Pinet (2008)

No interior das placas tectônicas também podem ocorrer os denominados sismos intraplacas, em virtude de as tensões geradas nas bordas das placas transmitirem-se por todo interior das placas. São sismos rasos, com 30-40 km de profundidade e que representam 5% da energia sísmica global liberada. Apesar de geralmente possuírem magnitudes baixas e moderadas, Assumpção e Dias Neto (2000) ressaltam que essa atividade não pode ser considerada desprezível, pois ocorreram alguns terremotos grandes e destrutivos (Nova Madrid, Missouri, USA, 1811-1812, $M_s=8.8$) em regiões intraplaca. A sismicidade intraplaca é característica do território brasileiro.

Os sismos artificiais ocorrem em menor quantidade, e podem ser provocados pelas ações humanas como explosões nucleares e de minas, injeção ou extração de água e gás no subsolo e enchimento de barragens. Com exceção das barragens, estes tem sido muitos pequenos e de efeito estritamente local (ASSUMPÇÃO; DIAS NETO, 2000).

Define-se como hipocentro, o ponto no interior da litosfera onde ocorre a liberação de energia e origina-se o sismo e epicentro sua projeção na superfície da litosfera (Figura 11).

Para estimar a “dimensão” de um sismo, dois parâmetros podem ser utilizados: a magnitude e a intensidade. A magnitude (M_w) é uma medida da energia liberada pelo sismo e determinada pelas características das ondas registradas no sismograma. A intensidade sísmica mede os efeitos produzidos pelo sismo em um determinado local. Pode ser obtida por meio da investigação dos efeitos sentidos pelas pessoas e os danos causados a objetos, natureza e construções em geral. Assim, um sismo tem apenas uma magnitude (energia liberada), mas várias intensidades, dependendo da distância e profundidade da localidade ao epicentro, características tectônicas da região e tipo de solo.

Figura 11 – Definição da origem (falha e foco) e propagação das ondas sísmicas



Fonte: Adaptado de SCIENCE LEARNING HUB (2018)

3.1 Sismicidade no Brasil

Por estar localizado no interior da placa sul-americana e distante dos limites ativos, o território brasileiro possui baixa atividade sísmica, quando comparada com países como Peru e Chile, localizados nos limites da placa de Nazca. Entretanto as regiões intraplacas também podem ocorrer eventos de elevada magnitude capazes de causar destruição.

A sismicidade intraplacas é um fenômeno ainda de difícil compreensão pois representa a deformação difusa em regiões tectônicas relativamente estáveis (ZOBACK, 1992). É necessário estudo geológico e tectônico local, pois os modelos clássicos desenvolvidos para algumas áreas bem conhecidas, (como a região de Nova Madri, EUA), são de difícil aplicação em outros continentes (BEZERRA; FERREIRA; NASCIMENTO, 2016).

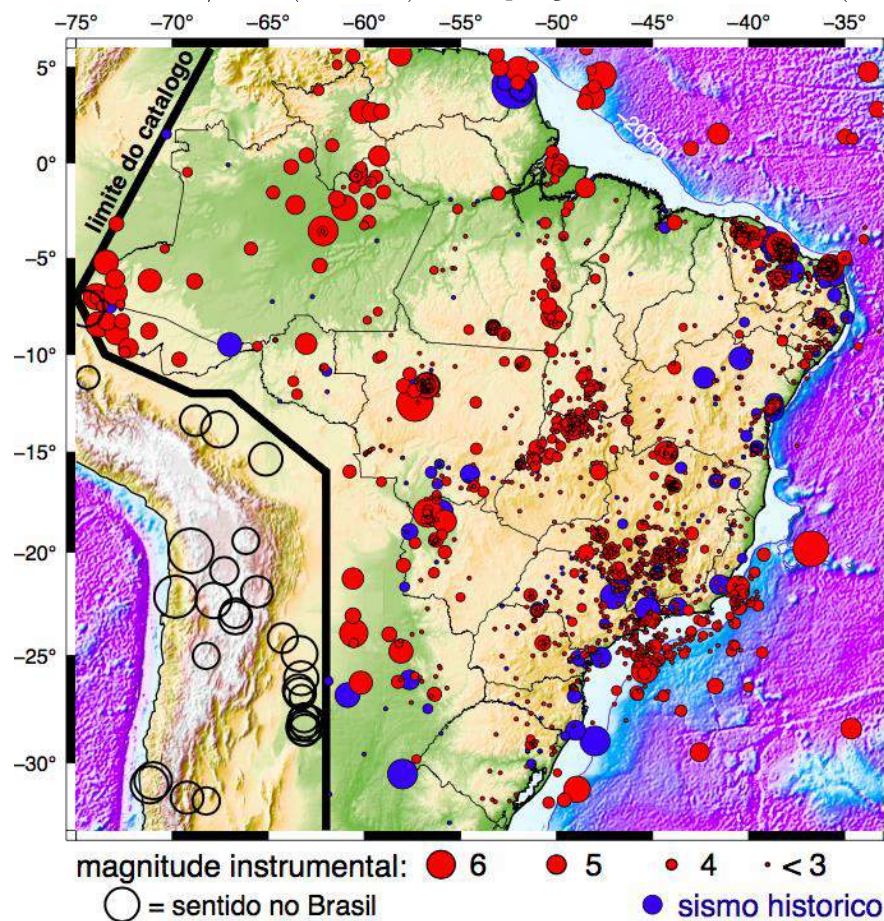
De acordo com Veloso (2016), a menor frequência dos sismos intraplaca mostra duas facetas: a boa é a baixa frequência de ocorrência, a ruim é que isso dificulta seus estudos, já que seus períodos de retorno se traduzem em centenas, ou milhares de anos e eventuais vestígios superficiais acabam desaparecendo.

De acordo com Assumpção *et al.* (2016), os modelos propostos para explicar a sismicidade intraplaca estão relacionados a zonas de fraqueza pré-existentes, como crosta estendida em riftes ou margens continentais (JOHNSTON, 1989; SCHULTE; MOONEY, 2005 *apud* ASSUMPÇÃO *et al.* 2016;) ou concentração de tensão na crosta superior (SYKES, 1978; TALWANI, 1989; TALWANI; RAJENDRAN, 1991; KENNER; SEGALL, 2000 *apud* ASSUMPÇÃO *et al.* 2016).

Devido às características de sismicidade intraplaca, sismos de magnitude moderada não são frequentes no território brasileiro. Para eventos de magnitude maior que 5 M_w a probabilidade de ocorrência é de 5 anos e de magnitude maior que 6 M_w , a probabilidade que ocorram é de 50 anos (VELOSO, 2016). Os sismos de maior magnitude ocorreram no ano de 1955 na Serra do Tombador-MT ($M_L=6.60$) e no Litoral de Vitória-ES ($M_L=6.30$).

As características gerais dos eventos registrados pelas estações sismográficas em todo o território são sismos de pequena magnitude, que ocorrem em baixas profundidades e sentidos apenas nas proximidades do epicentro. Observa-se na Figura 12, a distribuição de eventos ocorridos desde a colonização até os dias atuais. É possível evidenciar enxames de sismos em três regiões: no território do Acre (devido à proximidade com a cordilheira dos Andes), na região Nordeste (nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco) e na região Sudeste.

Figura 12 – Mapa da sismicidade brasileira desenvolvido com os dados provenientes do Banco de Dados do SIS/UnB (SISBRA) e compilação de Berrocal *et al.* (1984)



Fonte: Adaptado do Boletim Sísmico Brasileiro (IAG-USP, 2016)

De acordo com Veloso (2016), o Brasil nunca deixou de ter sismos, e no passado estes aconteciam na mesma proporção de hoje. O que ocorre atualmente, é que com uma rede sismográfica de alta sensibilidade e monitoramento, registram-se pequenos tremores quase todos os dias.

Diversos estudos neotectônicos foram desenvolvidos, destacando-se a intensa investigação de Saadi (2002), na qual foram identificadas pelo menos 48 falhas no território nacional, utilizando mapas geológicos e topográficos, imagens de satélite e inspeções *in loco* e foi possível construir o primeiro mapa neotectônico do território brasileiro, indicado na Figura 13. Observa-se uma grande quantidade de falhas nas regiões Nordeste e Sudeste, onde concentram-se os enxames de sismos.

Figura 13 – Mapa das principais falhas tectônicas e lineamentos no território brasileiro



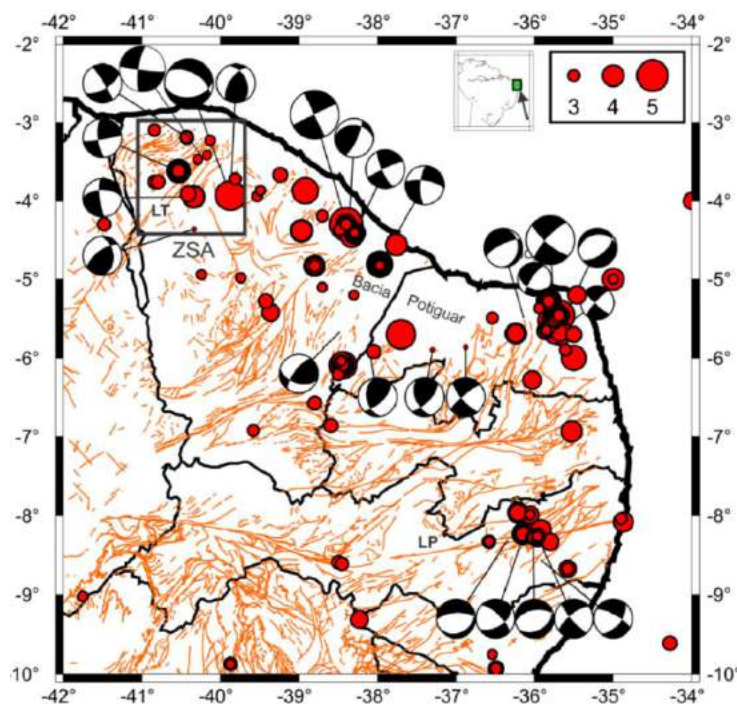
Fonte: Adaptado de Saadi (2002)

3.1.1 Sismicidade na região Nordeste

A região Nordeste possui uma importante atividade sísmica, com a ocorrência de sismos na Bacia Potiguar (estados do Rio Grande do Norte e nordeste do Ceará), no noroeste do Ceará (na Zona Sísmica de Acaraú), e no entorno do Lineamento Pernambuco (Figura 14). Os sismos da região ocorrem devido a tensões compressivas orientadas aproximadamente na direção E-W e tensões tracionais N-S. Estas tensões podem ter várias origens, como a movimentação da placa sul-americana e forças locais causadas pela estrutura crustal da região.

Nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará ocorreram os eventos de maior intensidade, em Pacajus-CE (1980, $M_L=5.2$), João Câmara-RN (1986, $M_L=5.1$) e (1989, $M_L=5.0$), Irauçuba-CE (1991, $M_L=4.9$) e Sobral-CE (2008, $M_L=4.2$). Os eventos da região possuem as seguintes características: enxame de sismos de longa duração, que podem durar meses ou anos, sismos rasos com profundidade inferior a 12km e concentração de eventos na borda da Bacia Potiguar.

Figura 14 –Mapa da sismicidade no Nordeste do Brasil no período de 2006 até 2010 e respectivas magnitudes de cada evento



Fonte: Oliveira (2015)

Em João Câmara ocorreu o evento de maior intensidade da região. O primeiro sismo ocorreu em 21/08/1986 e alcançou magnitude de $M_L=4.3$ e os seguintes ocorreram em (03/05/86 e 5/09/86), com $M_L= 4.3$ e 4.4 e foram acompanhados por várias réplicas. O sismo principal ocorreu no dia 30/11/86 ($M_L= 5.1$) sendo seguido por réplicas, quatro delas com magnitude maior ou igual a 4.0.

Na região foi possível identificar duas falhas importantes na Baía Potiguar: a Falha de Samambaia e a Falha de Poço Branco. A falha de Samambaia é a maior falha geológica, com 38 km de comprimento, cerca de 4 km de largura e profundidade variável entre 1 a 9 km, atravessa os municípios de Parazinho, João Câmara, Poço Branco e Bento Fernandes. A falha de Poço Branco, é bem menor, e contribui para a ocorrência de sismos da região.

3.1.2 Sismicidade e a atual Norma Brasileira

A atual norma sísmica brasileira, ABNT NBR 15421(2006), foi desenvolvida com base no trabalho de Shedlock e Tanner (1999) para a criação de um mapa sísmico global denominado *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP, 1999).

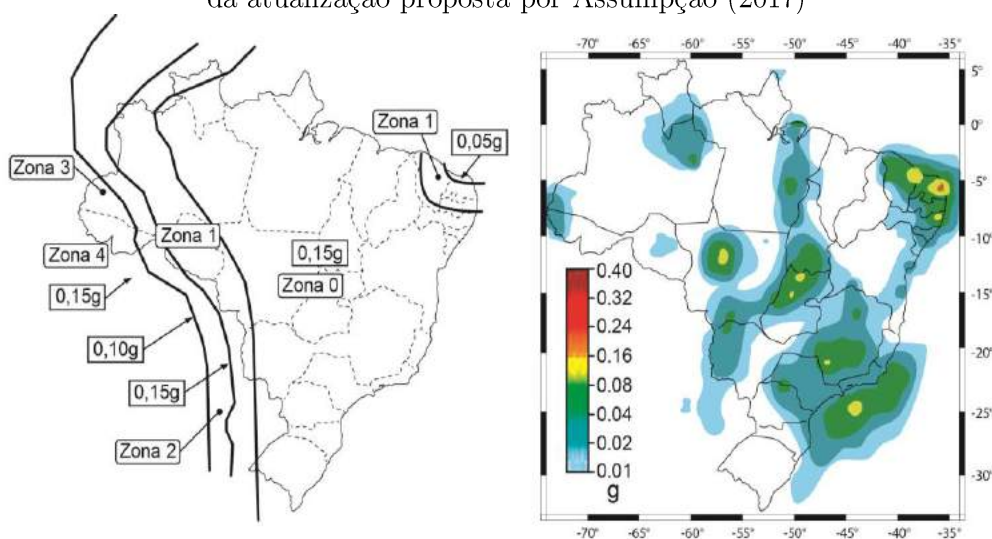
De acordo com a ABNT NBR 15421 (2006), o território brasileiro possui quatro zonas de sísmicas, indicadas na Figura 15(a). Para a maior parte do território brasileiro

(zona 0), a norma prevê acelerações menores que 0,025g, nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará acelerações de 0,05 a 0,10g e no Acre e parte do Amazonas aceleração de 0,10 a 0,15g, devido a influência da sismicidade andina. Os valores referem-se a um período de retorno de 475 anos.

Segundo Assumpção *et al.* (2016), estudos mais detalhados da sismicidade do Brasil nos últimos anos sugerem que várias outras zonas sísmicas não foram consideradas adequadamente no GSHAP (1999) e no mapa da ABNT NBR 15421 (ABNT, 2006).

Em estudo recente, uma atualização ao mapa sísmico foi proposta em Assumpção (2017), utilizando-se como base os dados atualizados da Rede Sismográfica Brasileira (RSBR). Em sua versão preliminar, indicada na Figura 15(b), são indicadas as acelerações de pico, em solo do tipo rocha, para um período de retorno de 475 anos. É possível evidenciar que regiões consideradas como “zona 0” atualmente são corrigidas para acelerações de 0,030g. No estudo, a região Nordeste, nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte apresentam aceleração máxima que pode chegar a faixa de 0,16 a 0,24g.

Figura 15 – Mapa sísmico: (a) proposto pela ABNT NBR 15421 (2006) e (b) versão preliminar da atualização proposta por Assumpção (2017)



Fonte: Adaptado de (a) (ABNT, 2006) e (b) Assumpção (2017)

3.2 Representação das ações sísmicas

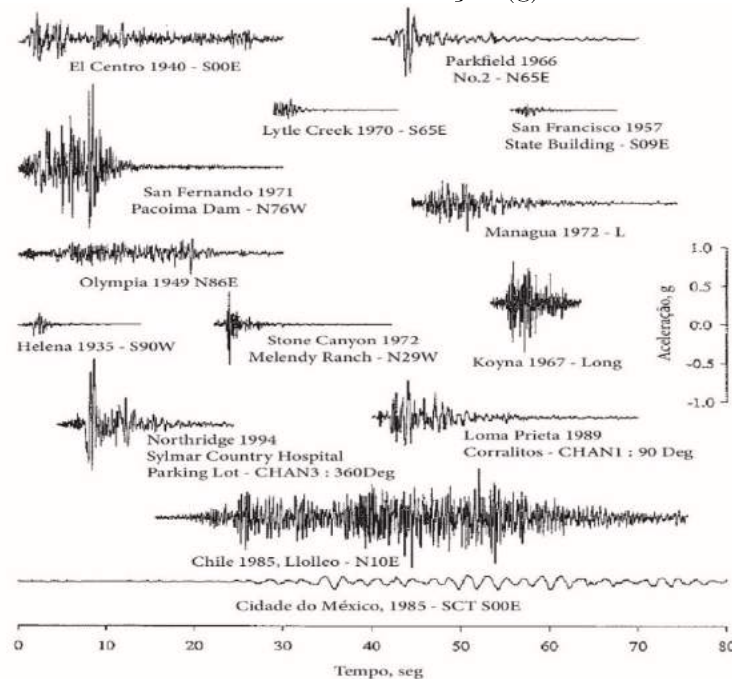
Para a análise de estruturas, é de interesse que o evento sísmico seja representado em função das ações que provocam na estrutura, definindo-se parâmetros como: aceleração, velocidade, deslocamento, duração e frequência ou período predominante. O acelerógrafo sísmico é o instrumento de medida da aceleração do terreno, sendo este acionado pelo movimento ocorrido na chegada das primeiras ondas sísmicas na estação.

Com as medidas de aceleração é possível obter velocidades e deslocamentos pela integração das curvas.

Os acelerogramas permitem a representação das ações sísmicas ao longo do tempo em termos de aceleração, velocidade e deslocamento. Geralmente são apresentados para três componentes separadamente (norte-sul, leste-oeste, vertical) e em função do tempo de duração do evento. Fatores como a distância ao epicentro, tipo de solo e geologia local pode influenciar a propagação de ondas, um único evento sísmico apresenta diferentes acelerogramas, de acordo com a estação sismográfica em que foi medido.

Na Figura 16 são apresentados os acelerogramas de sismos históricos ocorridos e respectivas estações de medida. A frequência ou período onde ocorre o valor máximo de aceleração, ou aceleração de pico (PGA), é definido frequência ou período predominante.

Figura 16 – Exemplos de acelerogramas de sismos históricos, escala horizontal de tempo(s) e vertical de aceleração (g)



Fonte: Adaptado de Clough e Penzien (2012)

3.3 Estado da arte sobre ações sísmicas em aerogeradores

O desenvolvimento da energia eólica aliada a instalação de aerogeradores em países com risco sísmico intensificou o interesse pelo estudo do comportamento sísmico dos aerogeradores.

Em um trabalho pioneiro Hong (1984) utilizou um modelo analítico para investigar o comportamento de uma pá de aerogerador sob ação sísmica e de vento

turbulento. Os resultados obtidos indicaram que os esforços devido o vento turbulento são maiores que devido ao sismo, portanto, as ações do vento turbulento têm maior contribuição para a fadiga estrutural das pás das aerogeradores.

3.3.1 Estudos com modelos numéricos de aerogeradores

Em trabalhos posteriores, foram utilizados modelos numéricos da estrutura da torre com objetivo de comparar os esforços da ação do sismo com as ações do vento turbulento, sendo possível determinar a magnitude dos esforços do sismo diante das ações mais desfavoráveis ao aerogerador.

Dessa maneira, Lavassas *et al.* (2003) investigaram o comportamento sísmico de uma torre eólica de 1MW com 44m de altura e 22m de diâmetro do rotor instalada no Parque Eólico *Mount Kalogero–Youni*, na Lacônia, Grécia. Foram utilizados modelos em elementos finitos de barras e de casca com massa equivalente no topo para o espectro de projeto do EC-8 (2012). Os autores verificaram que as ações sísmicas são aproximadamente 60% menores que as ações de vento turbulento. Lavassas *et al.* (2003) concluíram que para as combinações de projeto, a ação do vento turbulento é predominante, no entanto a ação sísmica pode tornar-se importante em regiões elevado risco sísmico ou em solo flexível.

Ishirara e Sawar (2008) analisaram o comportamento sísmico de aerogeradores e propuseram uma formulação para determinar um fator de correção para o ajuste dos acelerogramas devido à divergência entre o fator de amortecimento dos aerogeradores (0,5%) e edificações (5%) do espectro de projeto do BSL (2004). Nas análises dois aerogeradores de 400kW e 2MW. Os autores verificaram que a contribuição dos modos superiores para a resposta estrutural foi pequena para os aerogeradores de tamanho médio (400kW), mas tornou-se importante para aerogeradores maiores (2MW). Ao comparar os resultados foi possível verificar que o espectro de resposta de projeto resulta em subestimação da ação sísmica para ambos os aerogeradores e a formulação proposta pelo autor mostra-se mais aproximada. Desta forma foi possível concluir que ao utilizar a formulação semiteórica na correção do espectro de projeto do BSL (2004), os resultados obtidos foram mais coerentes com estruturas de baixo fator de amortecimento como os aerogeradores.

Também utilizando uma modelagem numérica, Nuta, Christopoulos e Packer (2011) estudaram o comportamento sísmico de um aerogerador de 1,65MW com objetivo de determinar modos de falha e probabilidade de dano das seções da torre. Foram desenvolvidos modelos no ANSYS® utilizando elementos de casca e com de massas

equivalentes no topo para representar o rotor e a nacele. Foram feitas análises dinâmica incremental utilizando os espectros de projeto do ASCE (2005) e do NBCC (2005) e um conjunto de acelerogramas de sismos representativos das regiões de Los Angeles e Canadá. Utilizando os resultados das análises foi possível desenvolver curvas de fragilidade de dano.

Prowell (2011) investigaram a influência do solo no comportamento dinâmico do aerogerador de 5MW da NREL. Os modelos de barras foram discretizados com base engastada e com solo discretizado. Foram utilizados três tipos de solo: flexível, médio e rígido, com amortecimento de 2%. O autor concluiu que a alteração das propriedades do solo pode afetar as frequências naturais, modos de vibração e distribuição de esforços ao longo da torre. Uma recomendação é que uma atenção maior deve ser dada a seção do topo da torre, na conexão da nacele, já que este trecho apresentou maiores deslocamentos (PROWELL *et al.* 2012).

Kjørlaug (2013) analisou o comportamento sísmico do aerogerador da NREL de 5MW. Para os componentes verticais do sismo, o autor verificou que, mesmo com um PGA baixo (0,028g), os modelos apresentaram aceleração alta (0,126g). Os deslocamentos referentes ao componente horizontal do sismo são inferiores aos deslocamentos devido ao vento estático, entretanto no trecho inferior e intermediário da torre, os esforços do sismo mostraram-se dominantes. A extrema importância dos efeitos da interação solo-estrutura (ISE) foi observada, uma vez que alguns solos produziram respostas diferentes em função da rigidez. O autor concluiu que a ação do sismo pode atingir o mesmo nível de resposta que o vento estático, devendo ser adotada como uma combinação de projeto.

Em uma recente publicação, Austin e Jerath (2017) analisaram a interação solo-estrutura na resposta sísmica de aerogeradores de 65kW (Nordtank), 1MW e 5MW variando-se as fundações com: monopilar, sapata, bloco de estacas e bloco ancorado. Foram adotados: modelo explícito com solo discretizado e modelo simplificado onde o solo foi considerado por meio de molas. Os autores verificaram que apesar dos diferentes tipos de fundação, a frequência dos modelos se apresentou bem próxima e que houve um aumento na aceleração horizontal no topo da nacele dos modelos explícitos em relação aos modelos simplificados. Os autores concluíram que para os casos do estudo, os resultados dos modelos simplificados e explícito são próximos, podendo ser mais eficiente computacionalmente utilizar o modelo simplificados.

Nos trabalhos citados anteriormente, as ações de sismos foram analisadas com métodos adaptados da engenharia civil, que não permitem considerar o movimento dinâmico do sistema (estado em funcionamento).

A fim de aprimorar aos modelos, um estudo desenvolvido por Ritschel *et al.* (2003) fizeram uma comparação entre uma análise dinâmica e o código de simulação FLEX5®. Para a análise, foi utilizado o modelo um aerogerador de 2,5 MW com um diâmetro de rotor de 80 m e uma altura do cubo de 60 m, instalada em Ryuyo-Cho (Japão).

Na análise dinâmica foram obtidos resultados na torre e fundação, no entanto devido à simplificação excessiva da nacele e rotor, os resultados nestes trechos não foram adequados. Segundo Ritschel *et al.* (2003), o aerogerador real tem mais modos do sistema em que, por exemplo, graus de liberdade de torre e lâmina não podem ser considerados no método. No FLEX5® foi possível simular o sistema mecânico completo com até 28 graus de liberdade e considerar todas as forças aerodinâmicas e amortecimento.

Na torre, os resultados dos dois métodos apresentaram mesma ordem de grandeza. O modelo do FLEX5® teve menor momento na base, e ligeiramente maior no topo. No trecho da nacele e rotor, os resultados obtidos apenas no FLEX5®, causaram esforços mais altos do que a ação de vento extremo. O autor concluiu que, para o modelo analisado os esforços dos sismos são inferiores aos de projeto. Em relação às pás, as ações sísmicas são muito baixas, e representam cerca de 70% da ação do vento normal.

Outro trabalho que apresentou uma abordagem alternativa foi o de Witcher (2005), que utilizou o código de simulação GLBladed® para calcular a resposta sísmica de um aerogerador de 2MW. A partir de um espectro de resposta de projeto do EC-8 (2012), foi gerado um acelerograma sintético, e foi aplicado ao modelo uma combinação das ações do vento e ondas.

O método permitiu que o acelerograma sintético fosse gerado utilizando com o amortecimento correto para a estrutura. Assim foi possível que fossem utilizados na análise as propriedades de amortecimento aeroelástico do aerogerador. O autor comparou o método proposto, desenvolvido no domínio de tempo, com um modelo de 1 grau de liberdade, no domínio da frequência. Para os dois métodos foram obtidos resultados de mesma ordem de grandeza para o aerogerador em operação. Segundo Witcher (2005), isso provavelmente ocorreu devido ao amortecimento dinâmico no estado de operação ser próxima ao valor típico de 5% utilizando para o espectro de resposta do EC- 8 (2012).

A maior diferença entre os resultados ocorreu com o aerogerador em estado estacionado, pois este experimenta amortecimento significativamente inferior. Foi possível concluir que a abordagem proposta no domínio do tempo permite a correta interação aeroelástica do movimento dinâmico da estrutura do aerogerador (WITCHER, 2005).

Diaz e Suarez (2014) apresentaram uma formulação analítica para desenvolvimento de um modelo mais completo para a análise sísmica para um

aerogerador. O modelo proposto permitiu que fossem consideradas: a flexibilidade das pás apenas na direção flap, a flexibilidade da torre a flexão e torção, os efeitos giroscópicos e o amortecimento aerodinâmico.

Para avaliar a formulação proposta, foi desenvolvido um modelo com as características do modelo Vestas-V82. Foram submetidas as ações do vento (em operação e turbulento) em combinação com as componentes horizontal e vertical dos sismos: El Centro (1940), Kern County (1952), Northridge (1994) e San Salvador (1986). As análises foram feitas no domínio do tempo, e a partir destas foram obtidas tensões de escoamento e flambagem para a torre e determinados os deslocamentos nas pás.

Os resultados de deslocamentos obtidos nas análises sísmicas mostraram que todos os registros de sismos considerados excitaram o primeiro modo de torre em ambas as direções, mas também houve pequena excitação do segundo modo de torre, especialmente na direção lateral. Além disso, foi observado que o movimento lateral da torre apresentou deslocamentos maiores do que aqueles associados ao movimento frontal. Segundo Diaz e Suarez (2014), embora o componente mais forte do sismo tenha sido orientado na direção frontal, os deslocamentos laterais foram maiores porque, além do amortecimento estrutural, não há outros meios para dissipar energia nessa direção. Com isso o movimento lateral da torre tornou-se mais suscetível ao surgimento de condições ressonantes como foi verificado no registro de Kern County.

Os resultados da análise de tensões evidenciaram que em termos de capacidade de resistência, as tensões nas pás são pequenas durante a ação combinada de sismo e do vento médio. No entanto, as tensões induzidas na torre levaram a fatores de segurança de flambagem local de 1,34 e 1,27; para com tensões de 263 MPa no topo a 279 MPa na base, para um aço do tipo S355.

Por último foram comparadas as tensões devidas as ações do vento extremo (por meio de uma análise estática equivalente), com as tensões devido à combinação de vento médio e sismo. Os resultados indicam que as ações do vento extremo são maiores exceto na extremidade superior da torre. Com isso, Diaz e Suarez (2014) concluíram que em regiões sísmicas, alguns aspectos do projeto de aerogeradores - em particular, em relação às seções da torre - podem ser determinados pela combinação das ações de vento constante e sismo.

3.3.2 Ensaios de aerogeradores em escala real

Em Prowell (2011), os autores apresentam um ensaio em escala real de um aerogerador de 65kW (Figura 17) da fabricante Nordtank®, utilizando a mesa sísmica

(*Large High Performance Outdoor Shake Table - LHPOST*) da Universidade da Califórnia, San Diego (UCSD). O objetivo era obter frequências naturais, os modos de vibração e o amortecimento viscoso, e avaliar o comportamento sísmicos sendo possível comparar os resultados de modelos numéricos com resultados experimentais

O aerogerador de 65kW, cujas características serão descritas no Capítulo 5, foi muito utilizado em parques eólicos nos EUA. Em 1985, as máquinas dinamarquesas representavam aproximadamente 40% dos aerogeradores em toda a Califórnia (HAU, 2006).

O aerogerador foi assentado a mesa sísmica por meio de uma chapa de aço e chumbadores e posicionado em condição estacionada, com uma das pás apontando para baixo, paralela à torre. A base da estrutura foi submetida a excitação de base com o componente Leste-Oeste do sismo de Landers (1992), registrado na estação Desert Hot Spring. O sismo com $PGA = 0,15g$ e magnitude de momento de $M_w = 7,30$ e foi aplicado paralelo ao eixo do plano do rotor. A resposta sísmica foi medida em quatro pontos ao longo da torre.

Figura 17 – Aerogerador de 65kW posicionada para o ensaio de mesa sísmica da UCSD - LHPOST



Fonte: Adaptado de NHERI (2010)

Prowell (2011) concluiu que a resposta sísmica é governada principalmente pelo primeiro modo. Com isso, o autor sugere que, uma análise (utilizando a abordagem de Rayleigh-Ritz) baseada no primeiro modo pode produzir uma estimativa satisfatória da resposta da estrutura. A abordagem do espectro de resposta forneceu bons resultados para estimar as forças e os momentos devido à ação sísmica, no entanto, para aerogeradores modernos, de maior altura, os modos mais superiores podem desempenhar um papel importante na resposta sísmica global.

Em relação ao fator de amortecimento da estrutura, os resultados encontraram um baixo nível, de menos de 1%, que os autores consideraram apropriado para o aerogerador em estado estacionado.

Posteriormente foi realizada uma investigação adicional, com objetivo de incluir a orientação relativa do rotor e do sismo e analisar a estrutura em estado estacionado e operacional (PROWELL *et al.*, 2014). Uma instrumentação mais densa foi implantada para medir resposta no plano e fora do plano da torre. A orientação das pás foi modificada, e no ensaio uma das pás foi orientada horizontalmente. Foi desenvolvido um modelo em elementos finitos no FAST® e foram feitos ajustes nesse modelo para coincidir com os modos experimentais obtidos.

Prowell *et al.* (2014) concluíram que em estado operacional, o amortecimento observado é semelhante aos valores estimados enquanto estacionados. O primeiro modo frente-trás é uma exceção a esta observação com amortecimento aumentando para aproximadamente 2% em estado operacional, quando comparado a 1% em estado estacionado.

3.3.3 Estudos sobre sismicidade no Brasil

O estudo dos efeitos sísmicos em estruturas é um tema pouco discutido nos trabalhos nacionais. A posição territorial interplacas, aliada ao baixo risco sísmico e a pouca probabilidade de ocorrência de sismos de grande magnitude levaram por muitos anos a acreditar que no país não ocorriam sismos. Entretanto com o estudo de Saadi, (1993) sobre as placas neotectônicas brasileiras, foi possível evidenciar que o país possui cerca de 48 falhas geológicas e que estas podem causar eventos sísmicos.

A criação de um banco de dados de monitoramento, como do Observatório Nacional e da Rede Sismográfica Brasileira, permitiu um maior conhecimento dos eventos sísmicos no território, e a criação de um Catálogo Sísmico Brasileiro. A necessidade de projetos com elevado fator de segurança incentivou as investigações sobre assunto. De acordo com Santos (1992), a inclusão dos efeitos das ações dinâmicas provocadas por

sismos era negligenciada e tornou-se importante a partir da construção de grandes obras, como centrais nucleares e hidrelétricas.

Um dos primeiros estudos foi o de Falconi (2003), que analisou e comparou as normas de projeto sísmico de seis países sul-americanos. Com base nesse estudo, Santos e Lima (2004), desenvolveram conceitos e elaboraram um mapa de sismicidade da América do Sul e a partir dessas recomendações foi desenvolvida a norma brasileira de sismos (ABNT, 2006).

Com a análise da bibliografia nacional, foi possível evidenciar que os trabalhos desenvolvidos têm ênfase em estruturas de múltiplos pavimentos, e não há trabalhos com a abordagem de estruturas esbeltas como torres eólicas e torres de transmissão. Em relação a ação do sismo, é possível verificar que os trabalhos utilizaram o espectro de projeto da ABNT NBR 15421 (ABNT, 2006) ou acelerogramas sísmicos internacionais, como permitido pela norma. Isto evidencia que os registros são recentes e não há um acelerograma de um evento sísmico com características brasileiras para aplicação nas análises.

3.3.4 Recomendações das Normas Internacionais

Para que um aerogerador seja fabricado e comercializado, é necessário que o projeto seja certificado, e atenda aos requisitos de desempenho e segurança de acordo com os padrões e sistemas internacionais. Os principais Regulamentos Internacionais, específicos de aerogeradores são:

- *Germanischer Lloyd's Guidelines for the Certification of Wind Turbines*: desenvolvido por uma sociedade certificadora alemã (GL, 2010);
- *Guidelines for Design of Wind Turbines*: elaborado pela *Det Norske Veritas* (DNV), sociedade certificadora dinamarquesa juntamente com a *RISø National Laboratory* (RISø, 2001);
- IEC 61400-1 ao 13: desenvolvido pelo Comitê Técnico da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC, 2005).

As principais recomendações são em relação a análises sísmica são:

O *Germanischer Lloyd Guidelines* (GL, 2010) recomenda que as ações do sismo devem ser combinadas com as ações normais de projeto, utilizando-se um coeficiente de ponderação de ação excepcional de $\gamma=1,0$. As análises podem ser feitas no domínio do tempo ou no domínio da frequência, devendo ser adotados no mínimo três modos de vibração em cada análise. O GL (2010) não possui recomendação sobre o coeficiente de amortecimento a ser adotado para a estrutura.

O *Guidelines for Design of Wind Turbines* (RISØ, 2001) permite representar a estrutura do aerogerador utilizando um modelo simplificado de um grau de liberdade com massa concentrada no topo, devendo a massa total ser considerada a soma da massa da nacelle, do rotor e um quarto da massa da torre. Para a análise recomenda-se que seja determinada a frequência fundamental da estrutura e a partir desta determina-se as acelerações de projeto a partir de um espectro de resposta de projeto. Entretanto, análises no domínio do tempo ou da frequência também são permitidas. Nenhuma recomendação é fornecida sobre o coeficiente de amortecimento, sendo este incorporado no espectro de resposta de projeto utilizado, que normalmente é de 5%.

O *IEC Guidelines* (IEC, 2005) apresenta recomendações semelhantes ao (GL, 2003). As ações do sismo devem ser combinadas com a maior ação de projeto (ao longo de toda sua vida útil), podendo a ação ser operacional ou de parada de emergência. O mesmo coeficiente de ponderação de ação excepcional $\gamma=1,0$ recomendados pelo (GL, 2010) pode ser utilizado. Para a análise não há recomendação em relação ao modelo estrutural, definindo-se apenas que este deve determinar o primeiro período (ou frequência) e a partir deste determina-se as acelerações de projeto a partir de um espectro de resposta de projeto. As análises também podem ser feitas no domínio da frequência ou no domínio do tempo. *IEC Guidelines* (IEC, 2005) recomenda um amortecimento de 1%.

As Normas que apresentam maiores recomendações sobre a consideração da ação sísmica, são geralmente específicas de construções, como o EC-8 (2012), ASCE 7 (2005) e o AISC (2005). Para as características do território brasileiro, tem-se a NBR 15421 (2006), específica para verificação sísmica de construções em geral. Embora as Normas sejam utilizadas para maioria das situações de edificações, eles não são adequados para os aerogeradores, que se comportam de maneira diferente das estruturas convencionais, devendo ser adotadas considerações adicionais nas análises sísmicas.

4 DINÂMICA APLICADA A ESTRUTURAS DE AEROGERADORES

Neste capítulo apresentam-se alguns conceitos da teoria de dinâmica estrutural aplicada aos modelos propostos dos aerogeradores.

4.1 Equação do movimento para sistemas Lineares

Os problemas de dinâmica das estruturas podem caracterizados pelas forças internas características da estrutura (forças de inércia, amortecimento e rigidez elástica), que se equilibram as forças externas aplicadas.

A equação do movimento dinâmico para um sistema N graus de liberdade, pode ser escrita como:

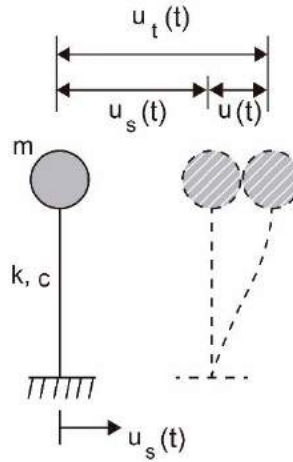
$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u(t)\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

onde as forças inerciais são representadas pelo produto da matriz de massa $[\mathbf{M}]$ e o vetor de aceleração da estrutura $\{\ddot{u}(t)\}$, as forças de amortecimento pela a matriz de amortecimento $[\mathbf{C}]$ e o vetor velocidade da estrutura $\{\dot{u}(t)\}$ e a rigidez elástica pela matriz de rigidez da estrutura $[\mathbf{K}]$ e o vetor deslocamento da estrutura $\{u(t)\}$. $\{P(t)\}$ é a força excitadora e todos os vetores estão associados ao instante de tempo (t) .

Tendo-se uma estrutura submetida a ação sísmica, representada na Figura 18 por um oscilador simples com aceleração na base, define-se o deslocamento total da estrutura $u_t(t)$, a soma do deslocamento da base $u_s(t)$ e o deslocamento da massa em relação a base $u(t)$, dado por:

$$u_t(t) = u_s(t) + u(t) \quad (2)$$

Figura 18 – Sistema submetido ao movimento do solo



Fonte: A autora (2019)

Considerando-se a ação sísmica como força excitadora, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u(t)\} = -[\mathbf{M}]\{(\ddot{u}_s)(t)\} \quad (3)$$

onde $-[\mathbf{M}]\{(\ddot{u}_s)(t)\}$ é a força excitadora devido a ação sísmica e $\{(\ddot{u}_s)(t)\}$ a aceleração na base, que pode ser representada por um acelerograma.

Para a solução da equação (3), dois métodos podem ser utilizados:

- Integração direta: consiste em integrar o sistema de equações sem utilizar transformações do sistema de equações, respeitando o acoplamento das equações. Este método tem grande aplicação em problemas não lineares, devido ao seu procedimento numérico executado em instantes discretos no tempo.
- Superposição Modal: é o método mais conveniente para solução de problemas lineares. Uma vantagem pode ser obtida das propriedades de ortogonalidade das formas de modo da estrutura. Com isso, o sistema de equações pode ser desacoplado expressando o vetor de deslocamento como uma combinação linear das formas do modo estrutural.

4.1.1 Análise Modal (vibração livre sem amortecimento)

A análise modal é a primeira etapa para determinação da resposta dinâmica da estrutura, pelo método da superposição modal, sendo nesta etapa determinados os modos e frequências naturais da estrutura.

A equação do movimento livre sem amortecimento é definida como:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u(t)\} = 0 \quad (4)$$

Sendo (4) um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, a solução pode ser escrita em termos de uma função harmônica $\{u(t)\} = \{\phi_n\} \sin w_n t$, o que representa que cada grau de liberdade da estrutura em vibração livre apresenta um movimento harmônico. Substituindo-se a solução e suas derivadas, em (4), a equação do equilíbrio pode ser reescrita como:

$$[[\mathbf{K}] - w^2 [\mathbf{M}]]\{\phi\} = 0 \quad (5)$$

onde w e $\{\phi\}$ representam os vetores de frequência e do modo de vibração associados a cada modo e grau de liberdade da estrutura.

Além da solução trivial ($\{\phi\} = 0$), (5) tem soluções não nulas se o respectivo determinante for nulo:

$$\det[[\mathbf{K}] - w^2 [\mathbf{M}]] = 0 \quad (6)$$

A equação (6) é um problema de autovalores e autovetores, em que a expansão do determinante gera uma equação algébrica no N-ésimo grau. As raízes dessa equação representam as frequências ao quadrado (w_n^2) dos n modos de vibração, para uma estrutura de n graus de liberdade. Obtidos os autovalores, é possível determinar os autovetores substituindo-se na da equação (5). Para a solução da análise modal, podem ser utilizadas formulações analíticas e os métodos de Rayleigh, Rayleigh melhorado e Ritz.

4.1.2 Método da Superposição modal

O método da superposição modal consiste na combinação linear dos modos de vibração para a determinação da resposta da estrutura. Os modos são obtidos na análise modal. A maneira que cada modo contribui para a resposta é ponderada utilizando um fator de participação de cada modo.

Tendo-se as matrizes generalizadas de massa, rigidez e força para o modo n , dadas por:

$$[M_n] = [\phi]_n^T [\mathbf{M}] [\phi]_n \quad (7)$$

$$[K_n] = [\phi]_n^T [\mathbf{K}] [\phi]_n \quad (8)$$

$$[P_n] = [\phi]_n^T \{p(t)\} \quad (9)$$

A equação de equilíbrio do N-ésimo modo para um sistema sem amortecimento resulta em:

$$[\phi]_n^T [\mathbf{M}] [\phi]_n + [\phi]_n^T [\mathbf{K}] [\phi]_n = [\phi]_n^T p(t) \quad (10)$$

$$M_n \ddot{Y}_n + K_n Y_n = P_n(t) \quad (11)$$

Com isso, o sistema de equações agora é composto de N equações com uma incógnita cada, cujas soluções permitem determinar as coordenadas nodais. Uma vez obtido Y_n , o deslocamento devido ao N-ésimo modo é dado por:

$$u_n(t) = \phi_n Y_n(t) \quad (12)$$

A soma da contribuição de todos os modos de vibração é o deslocamento total, dado por:

$$u(t) = \Sigma \phi_n Y_n(t) \quad (13)$$

4.2 Amortecimento

O amortecimento é um mecanismo interno de dissipação gradual de energia, que causa o decréscimo das amplitudes em uma estrutura ou corpo livre em movimento. Devido a quantidade significativa de energia sísmica inserida na estrutura, parte desta pode ser dissipada por meio do amortecimento, sendo menor o dano, quanto mais cedo as vibrações da estrutura cessam.

As causas da dissipação de energia são complexas, podendo ocorrer devido a características internas da estrutura, como o fenômeno de histerese do material ou o atrito entre superfícies de contato de elementos estruturais; ou externos à estrutura, tais como os devido o contato entre elementos não estruturais (paredes, divisórias, forros, etc.).

Devido a essa interação entre os elementos, torna-se impossível determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento da estrutura da maneira como é determinada a matriz de rigidez. Diferente do módulo de elasticidade, que é utilizado na definição da matriz de rigidez, as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem estabelecidas (CHOPRA, 2012).

Dessa forma o amortecimento é uma propriedade com grande incerteza, pois não pode ser definido apenas a partir das características dos materiais e da geometria da estrutura, devendo ser determinado experimentalmente ou utilizando valores da literatura e de normas (SORIANO, 2014). Para as construções em geral, adota-se que o amortecimento estrutural tem relação constante de amortecimento viscoso, tipicamente 2% para estruturas em aço e 5% em concreto (SORIANO, 2014).

4.2.1 Amortecimento em aerogeradores

O amortecimento aerodinâmico consiste em uma força aeroelástica que surge da interação entre o aerogerador e o vento. Em um aerogerador em movimento, quando o topo da torre se desloca para frente, as pás experimentam um pequeno aumento na velocidade do vento e respondem aerodinamicamente. A resposta consiste em uma força aerodinâmica adicional que neutralizar o movimento do topo da torre. Quando o topo da torre se desloca para trás, a força aerodinâmica diminui, reduzindo-se os movimentos superiores da torre.

De acordo com Salzmann e Tempel (2005), amortecimento aerodinâmico pode ter um grande impacto na vida útil de um aerogerador, pois pode reduzir significativamente as deformações no topo e a fadiga nas seções inferiores da torre. Como valores reais de amortecimento são muito difíceis quantificar, pode-se estimar o amortecimento aerodinâmico de um aerogerador utilizando-se estratégias de identificação, dados de monitoramento (DEVRIENDT; WEIJTJENS, 2017; HANSEN et al., 2006; FONTECHA; KEMPER; FELDMANN, 2019) ou com formulações analíticas (VALAMANESH; MYERS, 2014; SALZMANN; TEMPEL, 2005).

Para os modelos propostos, dos aerogeradores de 65kW e de 5MW, apenas o amortecimento estrutural foi considerado, adotando-se 1% para combinação em estado estacionado e 2% para combinações em funcionamento. Estes valores estão em acordo com os valores adotados em trabalhos anteriores, como indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa de coeficientes de amortecimento de aerogeradores

Autor, ano	Aerogerador de referencia	Altura do hub	Amortecimento – Estacionado	Amortecimento – Operação Normal
(Bazeos et al, 2002)	450 kW	38m	0,5%	-
(Ishihara e Sarwar, 2008)	400-kW e 2-MW	36-67m	0,5%	-
(Prowell, 2011)	65kW	22m	1%	3,5%
(Prowell, 2011)	900 kW	55m	-	4,7-5,9%
(Prowell et al., 2012)	1,5 MW	70m	-	7,6-7,9%
(Damgaard et al, 2012)	2,3 MW	-	2,25%	-
(Kjørlaug, Kaynia, 2014)	5,0 MW-NREL	90m	1%	2%

Fonte: A autora (2019)

4.3 Métodos de análise dinâmica sísmica

Os métodos determinísticos de análise dinâmica podem ser classificados como estáticos e dinâmicos. Os métodos dinâmicos podem ser no domínio da frequência e do tempo. No domínio da frequência, tem-se a Análise pelo Espectro de Resposta (AER) e a Análise do Espectro de Potência (AEP) e no domínio do tempo, tem-se a Análise no Histórico do Tempo (AHT). Na Figura 19 é apresentada uma breve classificação dos métodos.

Figura 19 – Classificação do métodos estáticos e dinâmicos de análise sísmica



Fonte: A autora (2019)

Os métodos estáticos geralmente são utilizados em estruturas simples e regulares, que possuem simetria e que apresentam contribuição do modo fundamental predominante nas respostas dinâmicas. O método das forças estáticas equivalentes (MFE), recomendado pela NBR 15421 (ABNT, 2006) e pelo EC-8 (2012), consiste na aplicação de um conjunto de forças estáticas proporcionais às ações gravitacionais atuantes na estrutura, atuantes na base da estrutura e para cada uma das duas direções horizontais na qual a estrutura é analisada.

O EC-8 (2012) também permite a análise estática não linear aproximada (*push-over*), desde que seja verificada por comparação com outros métodos. Na análise, são aplicadas sucessivas cargas estáticas e verificada a situação de ruptura da estrutura.

A escolha do método de análise a ser adotado deve basear-se nas características da estrutura como complexidade sistema estrutural, condições de simetria e características regionais como o grau de sismicidade e tipo de solo. Portanto, se escolhida de forma inadequada pode fornecer resultados incompatíveis com as solicitações.

4.3.1 Análise pelo Espectro de Resposta

A análise por espectro de resposta é um método muito utilizado para análise sísmica, devido à simplicidade e ao baixo custo computacional necessário. Partindo-se de uma análise modal, é possível obter a resposta máxima de uma estrutura.

O espectro de resposta pode ser definido como uma representação gráfica da resposta máxima aproximada, de deslocamentos, velocidades ou aceleração, obtida através de uma excitação de um conjunto de osciladores de um grau de liberdade, caracterizados por diferentes valores de frequência (ou período) com mesmo coeficiente de amortecimento (NEWMARK; ROSEMBLUETH, 1982).

Tendo-se a equação do movimento de um sistema de um grau de liberdade submetida a uma aceleração na base:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_s(t) \quad (14)$$

Esta pode ser escrita como:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{u}_s(t) \quad (15)$$

onde:

$$\xi = \frac{c}{2m}; w^2 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (16)$$

Para a solução da equação (15), podem ser utilizados vários métodos como: o de Newmark, a integral de Duhamel ou as transformadas de Laplace ou Fourier. De acordo com o desenvolvimento analítico de Chopra (2012), o espectro de deslocamento relativo do movimento de aceleração da base, para os parâmetros de ξ, w é definido como pseudodeslocamento. Este pode ser escrito como:

$$S_d(\xi, w) = |x(t)|_{\max} \quad (17)$$

Da mesma maneira, podem ser definidas pseudo-aceleração espectral e pseudo-velocidade espectral como:

$$S_v(\xi, w) = |\dot{x}(t)|_{\max} \quad (18)$$

$$S_a(\xi, w) = |\ddot{x}(t)|_{\max} \quad (19)$$

A resposta máxima do sistema pode ser determinada no domínio do tempo ou da frequência, e o processo é continuado para toda a faixa de frequências do sistema. O método pode ser repetido para considerar diferentes taxas de amortecimento da estrutura. Os resultados compõem os espectros de resposta elásticos que, de acordo com as características da ação sísmica, fornecem as respostas máximas em função da frequência ou período da estrutura.

Obtida representação gráfica definida por pseudo-espectro de aceleração da base, a análise pelo espectro de resposta pode ser dividida nas seguintes etapas:

1. Resolve-se o problema de autovalor do sistema para obter as frequências naturais e modos próprios normalizados. Este passo segue a transformação das equações reais de movimento para o domínio modal.
2. Para cada grau de liberdade da estrutura, tem-se uma resposta máxima utilizando o gráfico do espectro. As respostas podem ser de deslocamentos, velocidades ou acelerações. Como a magnitude dos fatores de participação geralmente diminui com o aumento do número de modos, nem todos os modos precisam ser usados em uma análise.
3. Obtidas as respostas de cada grau de liberdade, combina-se a resposta de cada modo para encontrar a provável resposta máxima. Se múltiplas direções

estiverem envolvidas, combina-se as respostas individuais ao longo de cada direção.

As combinações podem ser feitas utilizando-se os seguintes métodos:

Soma Absoluta (ABSSUM): considera o valor máximo da resposta a soma da resposta de cada modo, dada por:

$$x = \sum_{i=1}^m |x_i|_{\max} \quad (20)$$

Raiz Quadrada da soma dos quadrados (RQSQ): considera o valor máximo da resposta da raiz quadrada da soma dos quadrados da resposta em cada modo, dada por:

$$x = \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{i,\max}^2} \quad (21)$$

Combinação quadrática completa (CQC): considera o valor máximo da resposta uma combinação dos modos, dada por:

$$x = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \rho_{ij} x_i x_j} \quad (22)$$

Onde:

$$\rho_{in} = \frac{8\zeta^2(1+\beta_{in})\beta_{in}^{3/2}}{(1-\beta_{in}^2)^2 + 4\zeta^2\beta_{in}(1+\beta_{in})^2} \quad (23)$$

$$\beta_{in} = \frac{p_i}{p_n} \quad (24)$$

4.3.2 Análise no Histórico do Tempo

A análise no método do histórico de tempo (*time-history*) é desenvolvida em várias etapas, utilizando incrementos de tempo. Em cada passo, são avaliadas as condições iniciais e obtidas as respostas. Neste método o comportamento não linear pode ser

facilmente considerado, alterando-se as propriedades da estrutura ao longo do tempo de análise.

No método do histórico de tempo linear, a estrutura é modelada como um sistema de múltiplos graus de liberdade (NGL) com uma matriz linear de rigidez elástica e uma matriz de amortecimento viscoso equivalente. A ação sísmica é modelada utilizando o histórico de tempo, os deslocamentos e forças internas são encontrados usando análise elástica linear. A vantagem do procedimento dinâmico linear quanto ao procedimento estático linear é que todos os modos podem ser considerados. A resposta da estrutura ao movimento do solo é calculada no domínio do tempo, e toda a informação de fase é assim preservada.

Como citado anteriormente, para a solução da equação dinâmica, dois métodos de solução são possíveis: por integração direta e por superposição modal.

Na solução por integração direta, as equações de equilíbrio do movimento são totalmente integradas à medida que a estrutura é submetida ao carregamento dinâmico. A análise envolve a integração de propriedades e do comportamento estrutural em uma série de passos de tempo (CSI, 2012).

O método da superposição modal avalia e sobrepõe formas de vibração livre para caracterizar padrões de deslocamento. Os modos de vibração descrevem as configurações nas quais uma estrutura se deslocará naturalmente. Normalmente, os padrões de deslocamento lateral são de interesse primário. Os primeiros modos de vibração tendem a fornecer a maior contribuição para a resposta estrutural, e a medida que esses aumentam, os modos contribuem menos. É razoável truncar a análise quando o número de modos é suficiente (CSI, 2012).

Para uma estrutura com “n” graus de liberdade, tem-se “n” modos de vibração, em que cada modo tem um padrão de deslocamento independente e normalizado que pode ser amplificado e sobreposto para criar um deslocamento resultante. Com isso, a precisão da resposta total depende do número de modos do número de modos selecionados na análise.

4.4 Descrição dos métodos de solução

Para as análises modal e dinâmica, são propostos três modelos: i) Modelo I simplificado com solução analítica; ii) Modelo II com elementos finitos de barras; iii) Modelo III com elementos finitos de cascas e sólidos. A evolução dos modelos tende a seguir o desenvolvimento do projeto do aerogerador, desde o modelo mais simples apenas com massa no topo (i) ao modelo com a seção das torres discretizada (iii). A utilização

dos três modelos permite avaliar a aproximação dos métodos de solução e as respostas obtidas para os modelos.

Para as análises em Elementos finitos, as seguintes etapas foram realizadas:

- Desenvolvimento de um modelo pelo Método dos Elementos Finitos utilizando o programa SAP2000;
- Validação dos modelos comparando-se os resultados obtidos com o modelo analítico e os da bibliografia de Kjørlaug (2013) e Prowell (2011).

O programa computacional escolhido para as análises foi o SAP2000, programa amplamente utilizado para análises de estruturas. O programa utiliza o Método dos Elementos Finitos para a solução e possui uma interface gráfica orientada a objetos, o que permite facilmente a construção dos modelos.

No programa tem-se opções análises do tipo estática e dinâmica, linear e não-linear, análise dinâmica com sismos, análise de ponte com carga móvel, permite inclusão de não-linearidade geométrica (incluindo o método P-delta), permite considerações de fluência e retração.

Para a modelagem da estrutura, foram utilizados elemento do tipo casca (SHELL) e barra (FRAME) para a discretização da torre e do tipo sólido (SOLID) para a nacele.

O elemento FRAME é um elemento finito linear, com dois nós e seis graus de liberdade em cada nó (três deslocamentos e três rotações). O elemento é usado para modelar o comportamento de elementos lineares como vigas e colunas, e sua solução é baseada na formulação de (BATHE; WILSON, 1976).

O elemento SHELL é um elemento finito plano, com três ou quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó (três deslocamentos e três rotações). O elemento é utilizado para modelar o comportamento de membrana e de placa das estruturas. O comportamento de membrana é baseado na formulação isoparamétrica e o programa utiliza como formulação padrão a formulação de placas finas (Teoria de Kirchhoff), entretanto pode ser escolhida a formulação de placas espessas de Midlin-Reissner.

O elemento SOLID é um elemento finito tridimensional, com oito nós e seis faces quadrilaterais, utilizado para modelar estruturas e sólidos tridimensionais. É baseado em uma formulação isoparamétrica.

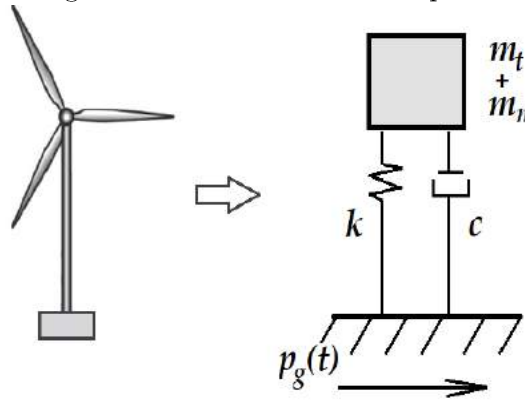
4.4.1 Modelo I

O modelo I é um modelo teórico simplificado (Figura 20), cujas características da estrutura (massa, rigidez e amortecimento) e das forças externas aplicadas são representados por um sistema de um grau de liberdade, (ou oscilador linear de um 1GL).

O problema pode ser representado pela equação do movimento dinâmico de um grau de liberdade (equação diferencial de segunda ordem, linear, com coeficientes constantes).

A massa do sistema é considerada como a massa total do aerogerador, somando-se a massa da torre, m_t , e a massa da nacele e rotor, m_n . A rigidez do sistema é adotada de acordo com a seção da torre. A resposta dinâmica é obtida resolvendo-se a equação diferencial por formulações numéricas ou analíticas.

Figura 20 – Aerogerador e sistema de 1GL equivalente – Modelo I



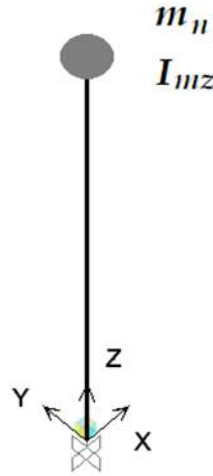
Fonte: A autora (2019)

Este método de solução é eficaz para prever a resposta sísmica quando a estrutura se comporta predominantemente no primeiro modo. Se houver contribuições significativas de modos superiores, tem-se uma tendência a subestimar as contribuições desses modos na resposta.

4.4.2 Modelo II

O modelo II é um modelo numérico construído com elementos finitos, no SAP2000®, no qual a torre é discretizada com elementos de barras de seção cônica variável, como indicado na Figura 21. A nacele e o rotor são inseridos ao modelo apenas como massa e inércias de massa aplicadas em um nó localizado no topo da torre. Na base é considerado um apoio o tipo engastado (restrição de rotações e deformações). A equação do movimento para sistema de NGL é representado pela equação (3), e resolvida por métodos numéricos (indicado no item 4.1).

Figura 21 – Modelo II - elementos de barras e massa adicionada no topo



Fonte: A autora (2019)

Inserindo-se a inércia de massa, é possível considerar as características de rigidez torcional ao modelo de barras, sendo fundamental para capturar os modos torcionais na análise modal. Para estimar um valor real da inércia de massa de um conjunto rotor e nacele, são necessárias medidas, da distribuição e do posicionamento das massas dos equipamentos no interior da nacele, do hub e das pás, uma vez que a inércia de massa, em relação ao eixo z (eixo de yaw), é determinada pela equação (25).

$$I_{mz} = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (25)$$

Onde:

I_{mz} : é a soma da inércia de massa rotacional (conjunto nacele e rotor);

m_i : é a massa total do conjunto;

r_i : é a distância de cada massa do conjunto ao eixo de rotação.

Como informações detalhadas do conjunto nacelle, rotor e pás, inexistem no meio acadêmico, sendo de propriedade apenas dos fabricantes, nos modelos desenvolvidos neste trabalho, adotou-se uma estratégia de calibrar o valor da inércia de massa torsional de acordo com a primeira frequência torsional da estrutura, obtida na bibliografia. Com isso, foram adotados os seguintes valores:

Tabela 2 – Propriedades de Inércia de massa dos modelos

Aerogerador	I_{mz}
	[kg/m ²]
Nordtank 65kW	1600
NREL 5MW	12.500.000

Fonte: A autora (2019)

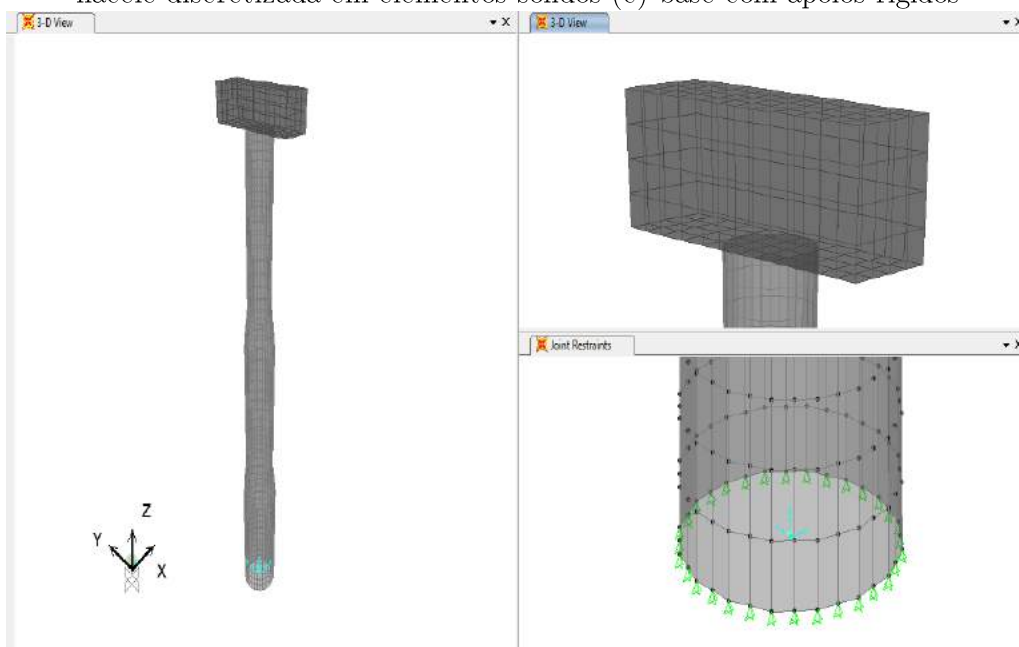
O método de solução possui uma vantagem em relação ao anterior, pois considera a estrutura com “n” graus de liberdade, sendo possível obter uma resposta em cada grau de liberdade da estrutura.

4.4.3 Modelo III

Neste modelo, desenvolvido no SAP2000®, a seção da torre é discretizada com elementos finitos de casca e a nacele com elementos sólidos hexaédricos, como indicado na Figura 22. Ao utilizar o elemento sólido, com as dimensões aproximadas e peso igual ao rotor e a nacele, foi possível considerar de maneira aproximada as características de rigidez torsional dos modelos, sem a necessidade da estratégia de calibração utilizada no modelo II.

A posição do elemento sólido foi adotada no eixo da torre, nos modelos, diferente de um aerogerador real, que possui uma excentricidade do posicionamento da nacele. A densidade do elemento sólido foi ajustada para que o peso total fosse igual a soma do peso do rotor e da nacele.

Figura 22 – Características do modelo III - (a) modelo com elementos de casca na torre (b) nacele discretizada em elementos sólidos (c) base com apoios rígidos



Fonte: A autora (2019)

Na base é considerado um apoio o tipo engastado (restrição de rotações e deformações) nos nós de contorno do elemento de casca. No topo, a discretização da

malha de casca e de sólidos a conexão dos elementos é feita apenas por nós coincidentes dos elementos.

4.5 Ações e combinações adotadas na análise dinâmica

De acordo com as formulações do espectro de resposta e da análise no histórico do tempo apresentadas no item 4.3, dois aerogeradores são estudados, de 65kW e de 5MW, com discretização de acordo com os modelos propostos no item 4.4. Os modelos foram escolhidos possuírem uma extensa bibliografia de dados de geometria, distribuição de massas e propriedades dinâmicas.

4.5.1 Ação dos sismos

Para caracterização da ação sísmica utiliza-se acelerogramas com PGA compatíveis com as acelerações máximas de solo ($a_s = 0,10$ a $0,15g$) para a zona sísmica 3, de acordo com o item 6.1 da ABNT NBR 15421(2006). Adicionalmente aplica-se uma faixa superior ao recomendado pela Norma, ($a_s = 0,20 - 0,30g$), prevendo-se uma situação de atualização, de acordo com Assumpção (2017) e uma faixa extremamente elevada ($a_s = 0,56g$).

Na base dos modelos, são aplicados como ações não simultâneas, os acelerogramas dos sismos de: Nahanni (1985), Landers (1992), Hollister (1961), El Centro (1940), Imperial Valley (1979), Loma Prieta (1989) e Northridge (1994) indicados na Figura 23 e Tabela 3. Os acelerogramas foram escolhidos por serem registros clássicos, utilizados em inúmeras pesquisas e por sua localização, na costa Oeste dos EUA, região onde estão localizados diversos parques eólicos. Para as ações sísmicas (CS), com três orientações dos acelerogramas são propostas:

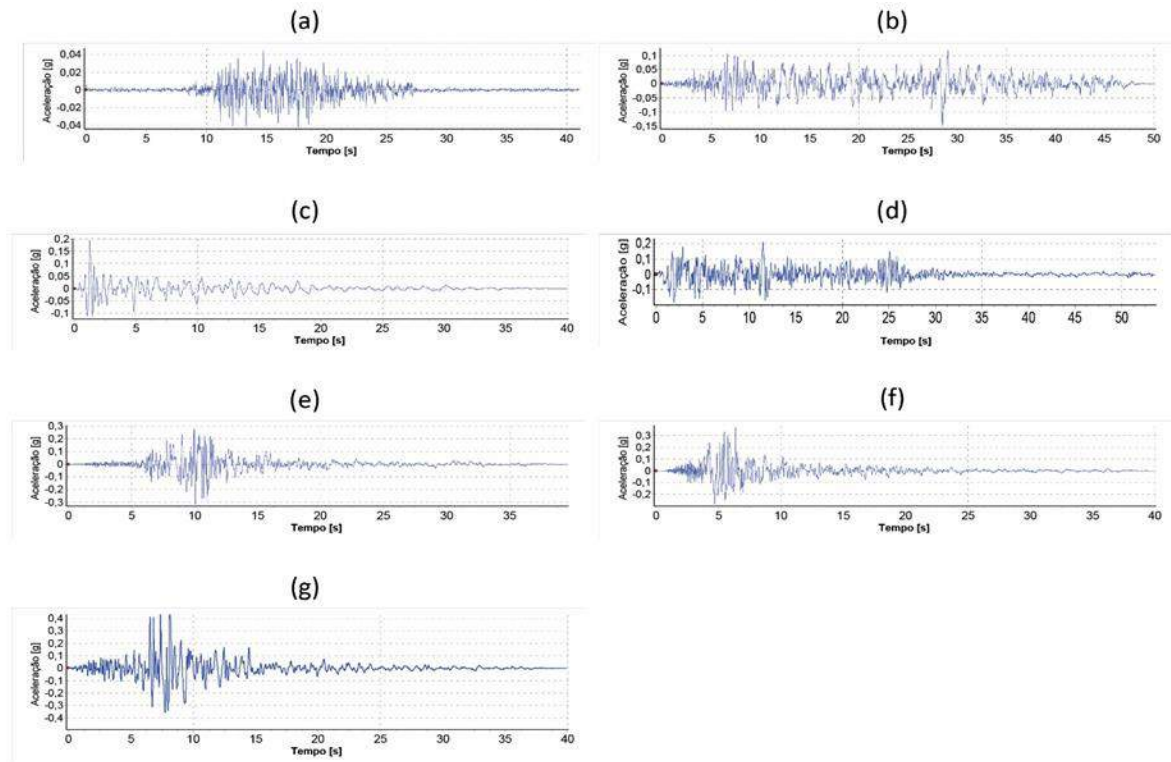
- CSX: acelerograma aplicado na base do modelo, no eixo x, paralelo ao plano do rotor;
- CS45°: acelerograma aplicado na base do modelo, a um ângulo de 45° do eixo x e ao plano do rotor;
- CSY: acelerograma aplicado na base do modelo, no eixo y, perpendicular ao plano do rotor.

Tabela 3 – Características dos acelerogramas sísmicos utilizados nas análises

Acelerograma	Estação	Data	Frequências [Hz]	Magnitude [Mw]	PGA [m/s ²]
Nahanni	NWT 2	23/12/1985	0.11-11.0	-	0,045
Landers	CDMG 12149	28/06/1992	0.08-60.0	7,30	0,15
Hollister	USGS ST.1028	09/04/1961	0.10-60.0	-	0,18
El Centro	USGS 117	08/05/1940	0.10-50.0	7,10	0,21
Imperial Valley	USGS 5115	15/10/1979	0.12-40.0	-	0,28
Loma Prieta	CMD 47381	18/10/1989	0.10-40.0	7,00	0,35
Northridge	CMD 24278	17/01/1994	0.12-23.0	6,70	0,56

Fonte: Adaptado de PEER (2018)

Figura 23 – Acelerogramas dos sismos de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge

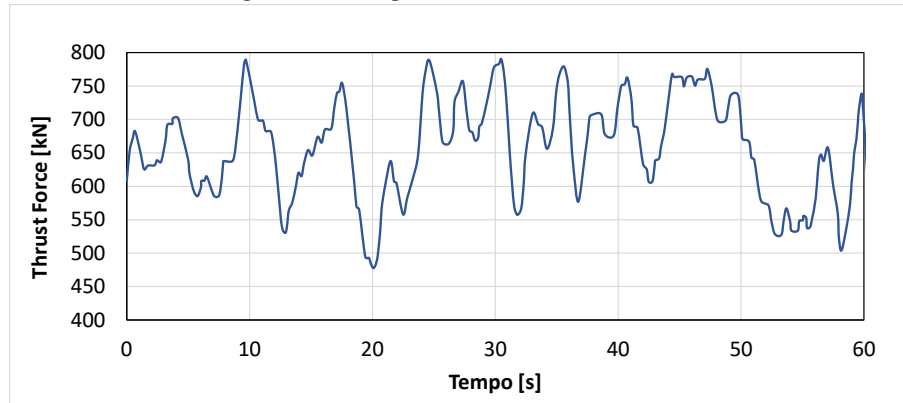


Fonte: Adaptado de PEER (2018)

4.5.2 Ação do vento

Com objetivo de comparar as respostas da ação dos sismos com a ação do vento, para o aerogerador de 5MW, é desenvolvida uma análise adicional considerando-se a ação do vento transiente, de acordo com Jonkman (2011) *apud* Kjörlaug (2013). Na Figura 24 é indicada a variação da força do vento ao longo do tempo.

Figura 24 – Ação do vento considerada



Fonte: Adaptado de Jonkman (2011) *apud* Kjølraug (2013)

Para a ação do vento, são propostas:

- CVE: ação do Vento Estático aplicado como força estática de 800kN, no topo do aerogerador, no eixo y, perpendicular ao plano do rotor;
- CVT: ação do Vento Transiente aplicado como força variável ao longo do tempo, no topo do aerogerador, no eixo y, perpendicular ao plano do rotor.

4.5.3 Ações combinadas

Para o aerogerador de 5MW é feita uma análise que simula o estado de funcionamento, considerando-se as ações simultâneas de sismo e vento. Empregando-se as combinações normais dos estados limites de serviço e de utilização, expressas pela equação (26) e os coeficientes de ponderação estão de acordo com as recomendações da NBR 8681:2003 para combinações raras, tem-se:

$$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_q \left(F_{q1k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{qjk} \right) \quad (26)$$

sendo:

- F_{gk} valor característico das ações permanentes diretas;
- F_{q1k} valor característico da ação variável principal (ação do sismo);
- F_{qjk} valor característico das demais ações variáveis (ação do vento);
- ψ_{0j} fator de combinação das ações variáveis.

Considerando-se as ações simultâneas de sismo e ventos, os coeficientes de ponderação são tomados com valor $\gamma_g = 1,2$ e $\gamma_q = 1,0$, e $\psi_{0j} = 1,0$ para combinações raras no ELU, e a equação (27) pode ser definida como:

$$F_d = 1,2F_{gk} + 1,0(F_{q1k} + 1,0 \cdot F_{qjk}) \quad (27)$$

Define-se então como COMB1 a seguinte combinação de ações:

$$COMB1 = 1,2AP + 1,0(CS + 1,0 \cdot CV) \quad (28)$$

sendo:

AP ações permanentes diretas devido ao peso próprio do aerogerador;

CS ação variável principal (ação do sismo CSX, CSY, CS45°);

CV ação variável secundária (ação do vento CVT,CVE).

4.6 Propriedades do aço estrutural

O material estrutural dos aerogeradores deste estudo são os aços S275 e S375, cujas propriedades são indicadas na Tabela 4. O comportamento elástico do aço foi considerado nos modelos numéricos, utilizando-se a curva de tensão-deformação do aço.

Tabela 4 – Propriedades do aço estrutural

Aerogerador	Aço	Tensão de escoamento f_y [MPa]	Tensão de ruptura f_u [MPa]	Módulo de cisalhamento G [MPa]	Coefficiente de poisson ν [-]
NREL 5MW	S355	355	490	81.000	0,30
Nordtank 65kW	S275	275	430	81.000	0,30

Fonte: A autora (2019)

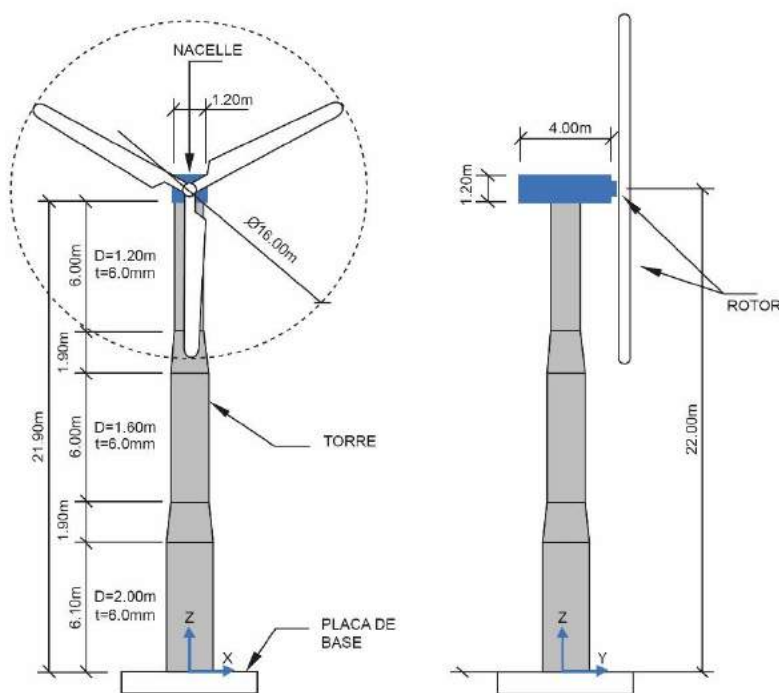
5 MODELOS NUMÉRICOS DE UM AEROGERADOR DE 65kW

Neste capítulo os três modelos de solução propostos são utilizados para a análise dinâmica sob ação de sismos com os dados de um aerogerador de 65kW. Os objetivos são construir os modelos numéricos, calibrar as propriedades dinâmicas dos modelos, comparar e analisar as respostas obtidas para as diferentes formulações utilizadas.

5.1 Descrição do aerogerador

O aerogerador foi desenvolvido na década de 1980 pela empresa dinamarquesa Nordtank®. Com potência de 65kW, foi criado inicialmente para a Europa e depois para atender ao mercado dos EUA, sendo que um exemplar desse aerogerador foi utilizado nos experimentos de mesa sísmica em escala real na UCSD, como descrito em Prowell (2011) e Prowell *et al.* (2012). As dimensões deste aerogerador são indicadas na Figura 25.

Figura 25 – Dimensões do Aerogerador de 65kW



Fonte: Adaptado de Prowell (2011)

A torre é composta de três seções, e a base é fixada na placa da mesa sísmica com chapa de aço e chumbadores. As propriedades dos componentes estruturais do aerogerador de 65kW são indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades de massa e materiais do Aerogerador de 65kW

Componente	Material	Peso total	Tensão de escoamento f_y	Modulo de elasticidade
[-]	[-]	[kg]	[MPa]	[MPa]
Torre	Aço S275	6400	275	210 000
Nacele	Aço S275	2400	275	210 000
Hub	Aço S275	1900	275	210 000
Pás	Fibra de vidro		-	10 000

Fonte: Adaptado de Prowell *et al.* (2012)

5.2 Análise modal

A identificação das propriedades modais é a primeira etapa para o estudo do comportamento dinâmico da estrutura. A análise modal permite a calibração das características dinâmicas dos modelos numéricos e torna-se fundamental para as análises utilizando os espectros de resposta.

Para a análise dos modelos II e III é desenvolvida uma análise modal do tipo *ritzvectors* no SAP2000® e os resultados obtidos, frequências naturais e os modos de vibração são comparados com resultados da bibliografia. A análise do tipo *ritzvectors* procura encontrar modos que são excitados por um carregamento específico e pode fornecer melhores resultados do que a análise do tipo *eigenvectors* quando usados para análises de espectro de resposta ou de histórico de tempo baseadas na superposição modal (CSI, 2012). As análises são consideradas completas quando pelo menos 80% do fator de participação modal é alcançado em cada uma das direções principais (eixos x, y, z) da estrutura.

5.2.1 Modelo I

Em uma formulação simplificada, o aerogerador pode ser considerado como uma coluna engastada com massa concentrada no topo, representando-se por um sistema de 1GL. A primeira frequência da estrutura pode ser determinada utilizando-se a equação proposta por Blevis (2016):

$$w_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m_n + 0,24m_t)}}, \quad w_n \text{ em } Hz \quad (29)$$

onde:

E	Módulo de elasticidade do aço;
I	momento de inércia da seção da torre;
L	altura da torre;
m_t	massa total da torre;
m_n	massa total da nacelle e rotor;

Adotando-se a inércia média da torre como a média das inércias de todas as seções ao longo da altura, tem-se:

$$EI_{med} = 2 \cdot 10^9 N \cdot m^2 \quad (30)$$

e primeira frequência da pode ser calculada estrutura como:

$$w_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^9}{22^3 (6400 + 0,24.2400)}} = 1,919 Hz \quad (31)$$

A solução obtida no modelo I permite obter resultados exatos para estruturas rígidas com deformações em um modo, mas para sistemas com distribuição massa e flexibilidade como os aerogeradores, estes resultados são apenas aproximados. No entanto, torna-se recomendável um valor teórico inicial para comparação com os resultados numéricos.

5.2.2 Modelo II

O modelo II foi construído no SAP2000® com 144 elementos de barras, massas e inércias no topo, como descrito no item 4.4.2.

Os resultados da análise modal são apresentados na Tabela 6, as seis frequências mais importantes e que caracterizam a estrutura. São dois modos de deslocamento lateral, no eixo y ou frente-trás (FA), no eixo x ou lado-lado (SS), um modo torsional (TO) com rotação em torno do eixo z e um modo de deslocamento vertical (VER). São indicadas a participação de cada modo e os resultados obtidos podem comparados com os dois ensaios de mesa sísmica desenvolvidos por Prowell (2011) e Prowell *et al.* (2012).

O fator de participação modal é um parâmetro importante que permite avaliar a importância de um determinado modo de vibração na resposta dinâmica da estrutura. No modelo, os modos de maior participação, os modos laterais (FA e SS), são mais prováveis de serem excitados pela ação sísmica.

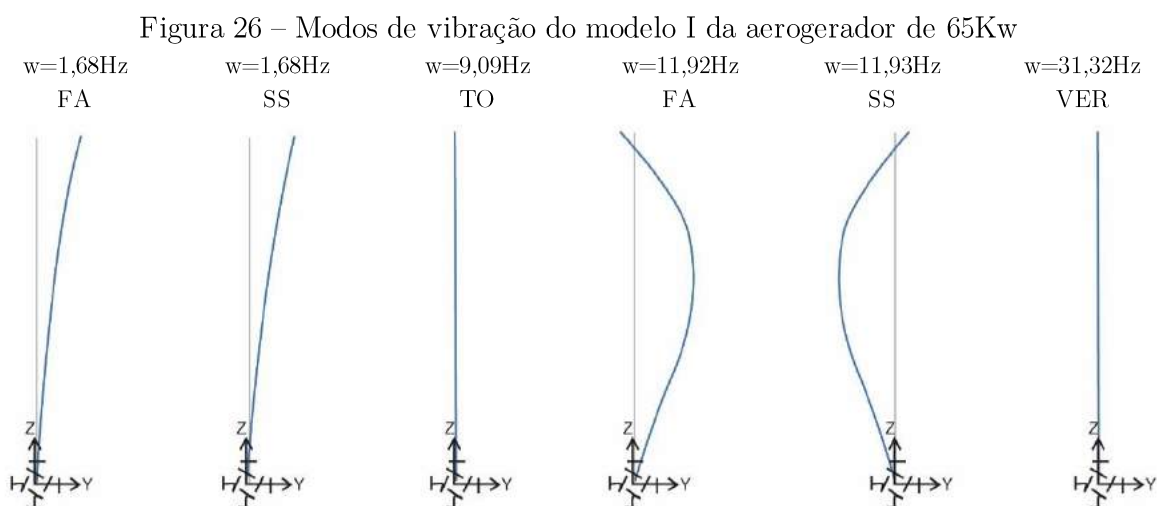
Tabela 6 – Frequências e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo II – 65kW

Modelo II		Part. Modal unitária	Part. Modal Acumulada	Prowell (2011)	Prowell <i>et al.</i> (2012)
modo	f [Hz]	%	%	f [Hz] - modo	f [Hz] -modo
1º. - FA	1,68	69	69	1,68 - SS	1,70 - FA
1º. - SS	1,68	69	69	1,68 - FA	1,71 - SS
1º. - TO	9,09	100	100	9,20 - TO	-
2º. - FA	11,92	17	86	10,08 - SS	11,90 - FA
2º. - SS	11,93	17	86	10,90 - FA	12,40 - SS
1º. - VER	31,32	83	83	-	-

Fonte: A autora (2019)

É possível verificar que a participação modal dos primeiros modos laterais é bem elevada, cerca de 69% e apenas 17% para os segundos modos laterais. Somando-se esses modos, verifica-se uma contribuição dos modos laterais de 86%. Em cada direção, a participação modal acumulada obtida é superior a 80%, o que indica que os seis primeiros modos já representam os principais modos de vibração da estrutura. Comparando-se as frequências obtidas com em trabalhos anteriores de Prowell (2011) e Prowell *et al.* (2012), os resultados obtidos no modelo II possuem uma boa aproximação.

Os modos de vibração são indicados na Figura 26 e para os primeiros 6 modos a análise foi considerada completa, pois pelo menos 80% do fator de participação modal foi alcançado em cada uma das direções (x, y, z).



Fonte: A autora (2019)

Uma vantagem do modelo II é que discretizado com elementos de barras, apresenta resultados com boa aproximação e compatíveis com fases iniciais de projeto do

aerogerador. A maior dificuldade de construção desse modelo é estimar as inércias de massa do conjunto nacele e rotor, que no modelo de cascas já é incorporado ao modelo pelos elementos de sólidos.

5.2.3 Modelo III

O modelo III foi construído no SAP2000® com a torre discretizada com 1536 elementos finitos de cascas e a nacele e o cubo discretizados com 192 elemento sólidos, como descrito no item 4.4.3.

Os resultados da análise modal são apresentados na Tabela 7, as frequências naturais e participação modal, e comparados com os resultados do o modelo de cascas de Kjølraug (2013). Neste modelo, os modos de vibração adicionais encontrados, de deformação dos elementos de cascas, foram suprimidos dos resultados apresentados neste estudo.

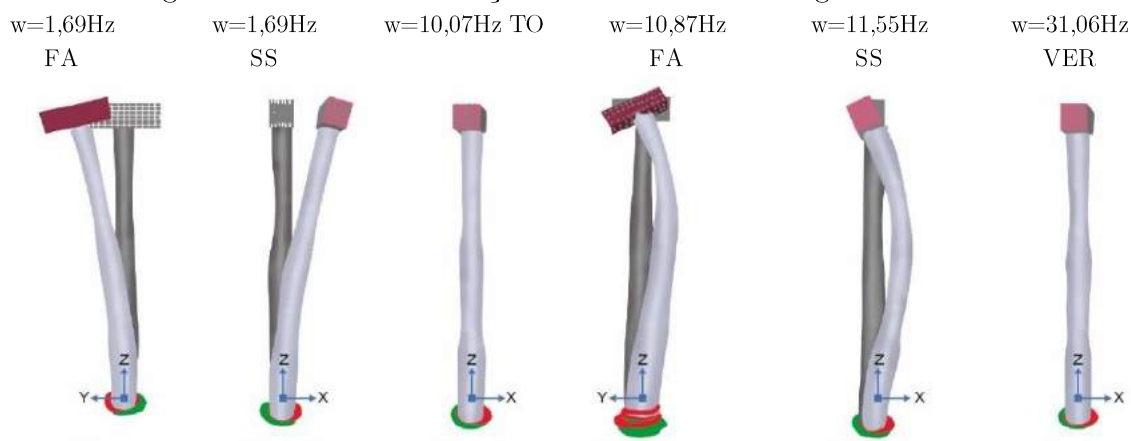
Tabela 7 – Frequências e participação modal obtidas para o modelo III – 65kW

Modelo III		Part. Modal unitária	Part. Modal Acumulada	Kjølraug, (2013)
modo	f [Hz]	%	%	f[Hz] - modo
1º. - FA	1,69	65	65	1,68 - SS
1º. - SS	1,69	65	65	1,68 - FA
1º. - TO	10,07	67	67	9,20 - TO
2º. - FA	10,87	16	81	10,08 - SS
2º. - SS	11,55	17	82	10,90 - FA
1º. - VER	31,06	76	76	-

Fonte: A autora (2019)

Esse modelo acompanha a tendência do anterior, participação modal elevada dos primeiros modos, com cerca de 65% para os laterais (FA e SS) e 67% para o torsional. Com a determinação dos primeiros 50 modos, a análise foi considerada completa, o que se torna uma desvantagem em relação ao modelo de barras, em que foram necessários apenas 6 modos. Na Figura 27 são indicados os modos de vibração predominantes do modelo III.

Figura 27 – Modos de vibração do modelo III da aerogerador 65kW



Fonte: A autora (2019)

5.3 Análise dinâmica

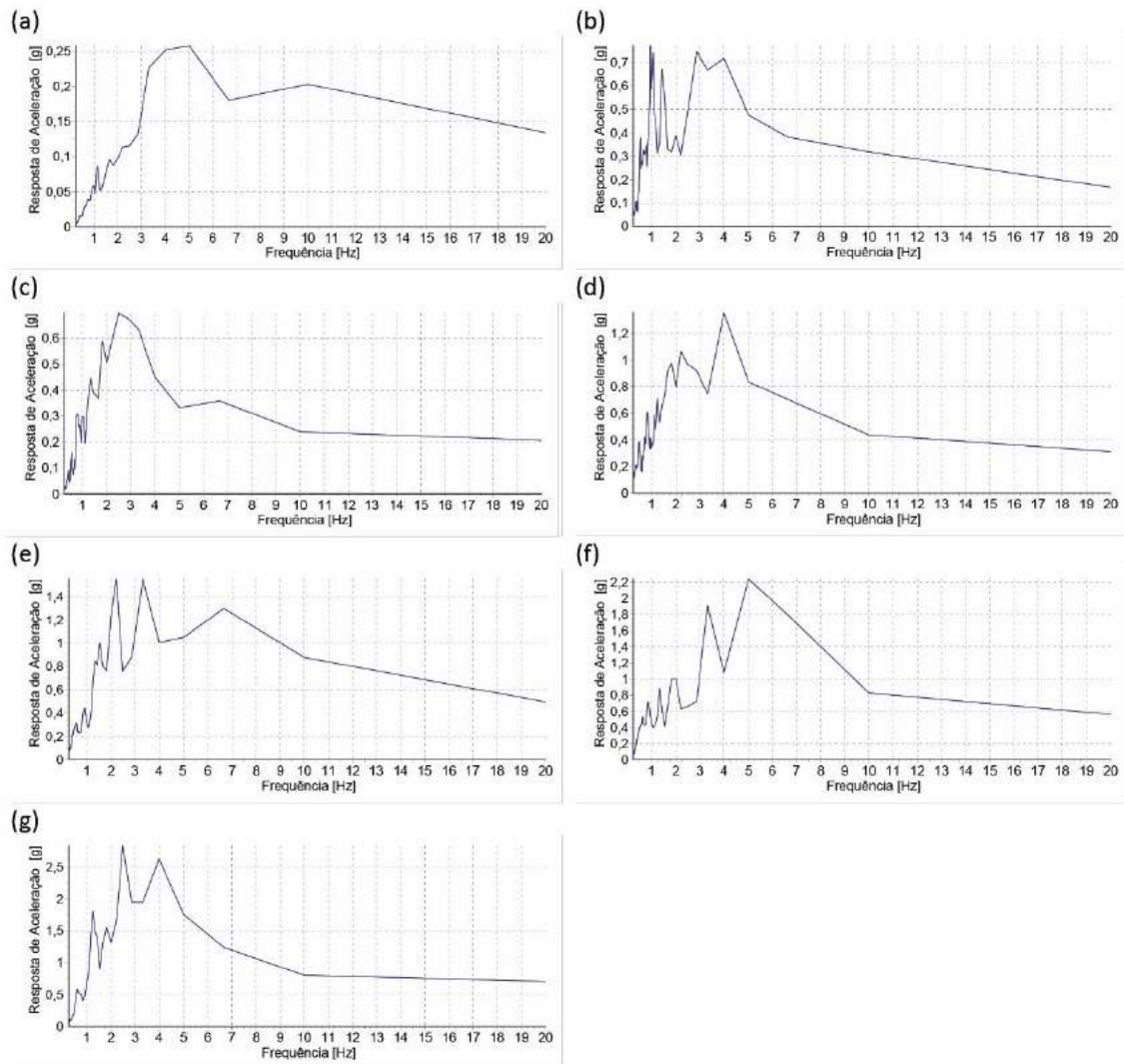
Na solução teórica (modelo I) utiliza-se a análise por espectro de resposta linear, que permite obter a resposta dinâmica considerando-se a estrutura um sistema de 1GL. Os modelos numéricos II e III são resolvidos utilizando-se o *time history* do SAP2000®. Na análise do histórico de acelerações no tempo, considera-se a ação sísmica no domínio do tempo e a resposta dinâmica da estrutura é obtida por sobreposição modal.

Para as ações sísmicas, são aplicadas na base dos modelos os sete acelerogramas de sismos reais, indicados em 4.5.1. O aerogerador de 65kW foi considerado em condição estacionada, sem a ação do vento. Adotou-se um fator de amortecimento estrutural de 1% para todos os modos, como recomendado em Prowell (2011).

5.3.1 Modelo I

De forma simplificada, o método do espectro de resposta tem como base os seguintes passos fundamentais: i) construir uma representação gráfica dos espectros (definido no item 4.3.1) para a ação sísmica e o amortecimento de projeto; ii) determinar graficamente as respostas, em função da frequência da estrutura. Os espectros de resposta das ações sísmicas com amortecimento são apresentados (Figura 28 e Figura 29).

Figura 28 – Espectros de aceleração do modelo I 65kW - (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge

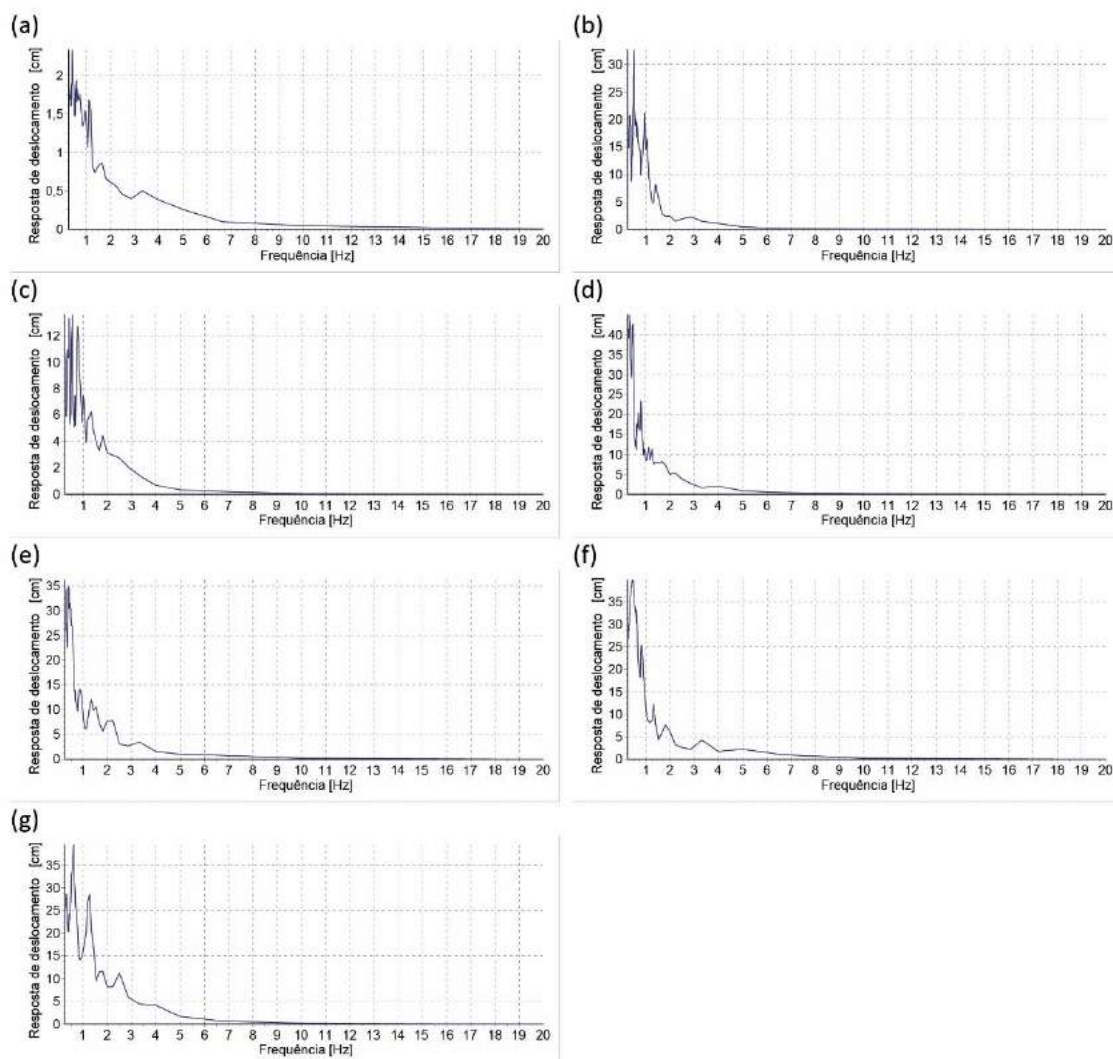


Fonte: Adaptado de PEER (2018)

Verifica-se que os espectros de aceleração possuem um trecho crescente inicial, um trecho de máximos de resposta e um trecho decrescente. Para os espectros de Nahanni e Loma Prieta, os trechos de máximos são em frequências superiores a 3Hz. Nos demais espectros, os trechos máximos iniciam-se em frequências superiores a 2Hz.

A frequência natural da estrutura ($w_1=1,58\text{Hz}$) posiciona-se em um trecho favorável, não nos máximos, mas no início do trecho crescente dos espectros e como esperado apresenta elevadas acelerações.

Figura 29 – Espectros de deslocamento do modelo I 65kW - (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge



Fonte: Adaptado de PEER (2018)

Verifica-se que os espectros de deslocamentos possuem apenas um trecho decrescente inicial, que diminui a medida que aumenta a frequência. O trecho mais desfavorável dos espectros ocorre com frequências inferiores a 1Hz.

Em relação aos deslocamentos, a frequência da estrutura ($w_1=1,58\text{Hz}$) posiciona-se no trecho decrescente e fora do trecho de resposta máximo, por isso as respostas de deslocamento são muito pequenas.

As respostas máximas do modelo I, de acordo com a frequência da estrutura considerada como um sistema de 1GL são indicadas na Tabela 8, juntamente com o fator de amplificação das respostas, que representa razão entre a resposta de aceleração máxima e o PGA do acelerograma aplicado.

Tabela 8 – Respostas máximas de aceleração e deslocamento do modelo I – 65kW

Acelerograma	PGA [g]	Aceleração [g]	Fator de amplificação [-]	Deslocamento [m]
Nahanni	0,045	0,100	2,00	0,007
Landers	0,15	0,320	2,13	0,030
Hollister	0,18	0,370	2,05	0,035
El Centro	0,21	0,750	3,57	0,070
Imperial Valley	0,28	0,850	3,03	0,070
Loma Prieta	0,35	0,951	2,71	0,068
Northridge	0,56	1,288	2,28	0,115

Fonte: A autora (2019)

5.3.2 Modelo II

Neste modelo os acelerogramas foram aplicados apenas no eixo x (caso CSX) devido a simetria do modelo de barras. As respostas de aceleração e deslocamento máximos são indicadas na Tabela 9, e tem-se boa aproximação com os resultados do modelo I. Analisando-se os fatores de amplificação, verifica-se que a estrutura está submetida a elevada aceleração no topo, mesmo em sismos de PGA moderada como o de El Centro.

Tabela 9 – Respostas máximas de aceleração e deslocamentos do modelo II - 65kW

Acelerograma	PGA [g]	Aceleração X [g]	Fator de amplificação [-]	Deslocamento X [m]
Nahanni	0,045	0,128	2,84	0,007
Landers	0,15	0,302	2,01	0,023
Hollister	0,18	0,337	1,87	0,029
El Centro	0,21	0,752	3,58	0,060
Imp. Valley	0,28	0,865	3,07	0,059
LomaPrieta	0,35	0,994	2,84	0,061
Northridge	0,56	1,350	2,41	0,098

Fonte: A autora (2019)

Os deslocamentos máximos obtidos são muito pequenos para causar algum dano aos equipamentos da nacele, no entanto não há parâmetros de comparação destes deslocamentos recomendados por normas ou na bibliografia.

Analisando-se as deformações obtidas ao deslocamento máximo recomendável no estado limite último (ELU) para estruturas de aço, de acordo com a ABNT NBR 8800,

é de 5,55cm ou $H/400$, ainda assim verifica-se que são inferiores. No entanto, o limite de $H/400$ parece um pouco conservador, especialmente para estruturas de elevada flexibilidade como de aerogeradores.

5.3.3 Modelo III

Para este modelo, os acelerogramas foram aplicados em três direções distintas dos modelos (casos CSX, CSY e CS45), com objetivo de investigar uma orientação mais desfavorável da ação do sismo em relação aos eixos principais da estrutura. Ao comparar os resultados obtidos (Tabela 10 e Tabela 11) nas duas direções, verifica-se que são muito próximos, o que pode indicar que, para os modelos analisados não há uma direção mais desfavorável e suscetível a ação do sismo. Comparando-se as respostas dos modelos II e III, verifica-se que possuem uma boa aproximação, como indicado nas Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 10 – Respostas de deslocamento do modelo III – 65kW

Acelerograma	PGA [g]	Deslocam. X [m]	Deslocam. Y [m]	Deslocam. 45° [m]	Deslocam. X – Modelo II [m]
Nahanni	0,045	0,007	0,008	0,007	0,007
Landers	0,15	0,037	0,036	0,035	0,023
Hollister	0,18	0,041	0,041	0,040	0,029
El Centro	0,21	0,087	0,091	0,088	0,060
Imp. Valley	0,28	0,066	0,066	0,058	0,059
LomaPrieta	0,35	0,078	0,077	0,072	0,061
Northridge	0,56	0,105	0,103	0,100	0,098

Fonte: A autora (2019)

Tabela 11 – Respostas de aceleração do modelo III – 65kW

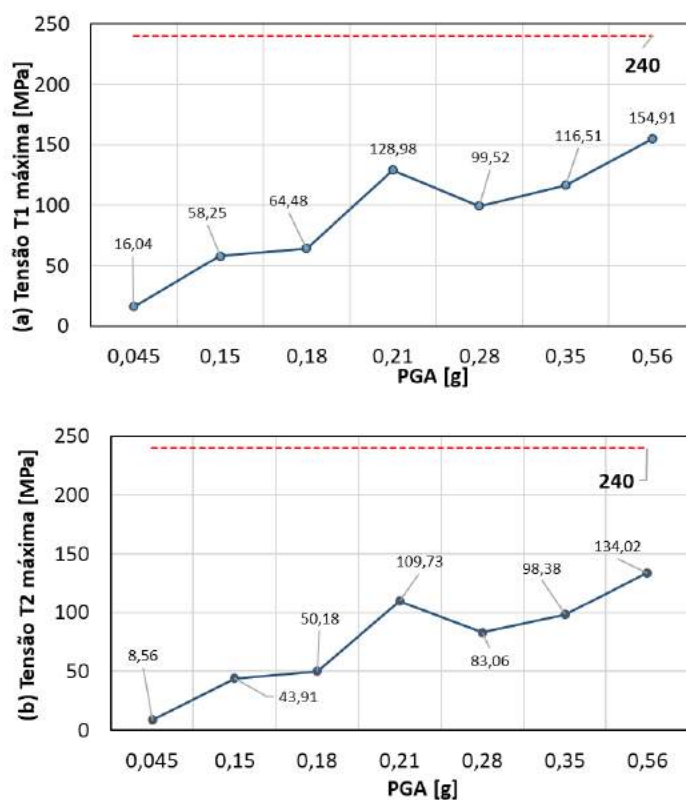
Acelerograma	PGA [g]	Aceleração X [g]	Aceleração Y [g]	Aceleração 45° [g]	Fator de amplificação [-]	Aceleração X – Modelo II [g]
Nahanni	0,045	0,113	0,110	0,102	2,44	0,128
Landers	0,15	0,436	0,432	0,406	2,86	0,302
Hollister	0,18	0,539	0,527	0,578	2,88	0,337
El Centro	0,21	1,097	1,129	1,054	5,23	0,752
Imp. Valley	0,28	0,897	0,881	0,902	3,17	0,865
LomaPrieta	0,35	1,038	1,030	1,020	2,94	0,994
Northridge	0,56	1,481	1,465	1,398	2,50	1,350

Fonte: A autora (2019)

Como esperado nas análises, o aumento da PGA dos acelerogramas proporciona um incremento aumento do valor das respostas, no entanto, para o acelerograma de El Centro (PGA=0,21g) as respostas de aceleração e deslocamento tiveram um incremento maior que o esperado.

Um outro ponto importante a ser obtido neste modelo são as respostas de tensões ao longo da altura da torre, indicadas na Figura 30. As tensões principais T1 e T2, são as tensões no elemento finito de SHELL, obtidas nas análises sísmicas são comparadas com tensão de escoamento do aço (S275) de 275MPa. Define-se a tensão T1 como paralela ao sentido da circunferência da torre, e a tensão T2 paralela à altura da torre, perpendicular a T1.

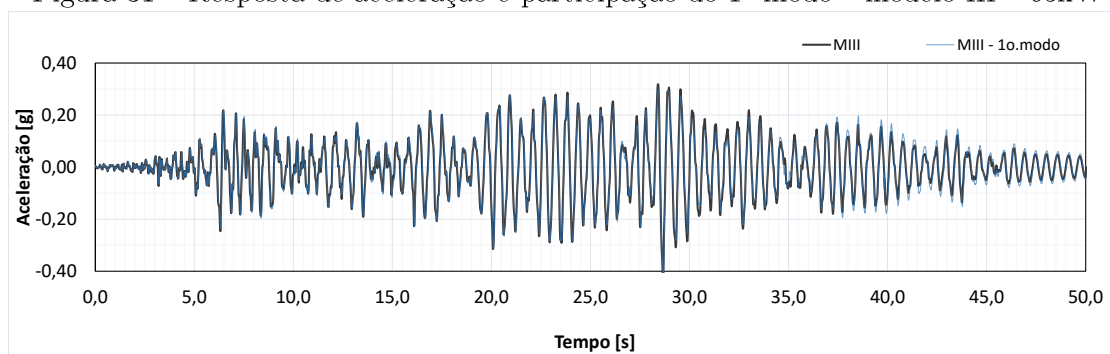
Figura 30 – Tensões principais máximas (a) T1 e (b) T2 de acordo com o PGA dos acelerogramas – modelo III – 65kW



Fonte: A autora (2019)

Em uma investigação adicional, compara-se a resposta de aceleração do modelo III, composta da contribuição de todos os modos e com a contribuição apenas do 1º. modo. Utiliza-se apenas o acelerograma do sismo de Landers e as respostas são indicadas na Figura 31. Verifica-se a elevada contribuição do 1º modo na resposta, pois a resposta apenas deste modo já representa uma grande parcela da resposta dinâmica da estrutura.

Figura 31 – Resposta de aceleração e participação do 1º modo – modelo III – 65kW



Fonte: A autora (2019)

5.4 Comentários e discussão

Neste capítulo foram apresentados três modelos para a análise dinâmica do aerogerador de 65kW, aplicáveis em diferentes etapas de projeto. De acordo com os resultados obtidos as seguintes considerações podem ser feitas.

Os três modelos propostos são capazes de representar o comportamento dinâmico da estrutura do aerogerador sob ação sísmica. Na análise modal, o modelo I teve uma maior divergência de resultados, comparando-se com os modelos II e III. Para a análise sísmica, os modelos I e II tiveram uma maior aproximação de resultados entre si, e o modelo III uma maior divergência de resultados quando comparados entre os modelos.

Como todos os modelos apresentaram uma boa aproximação, para um aerogerador de tamanho médio como o de 65kW, a escolha de cada um dos modelos depende da resposta dinâmica necessária e da fase de projeto. Em fases iniciais podem ser utilizados os modelos simplificados ou com elementos de barras e em fases posteriores, modelos com mais discretizados, com elementos de cascas.

Observou-se uma característica dos espectros, nos trechos de baixas frequências, ocorrem as maiores respostas. Para os espectros analisados, a faixa de maior resposta encontram-se na faixa inferior a 1Hz para deslocamentos e entre 0 a 5Hz para acelerações. Como a primeira frequência ($w_1=1,69$ Hz) da estrutura posiciona-se próxima, a estrutura está submetida a elevadas acelerações e deslocamentos.

Verificou-se na análise modal uma elevada participação dos primeiros modos, o que indica que a estrutura possui o modo fundamental predominante. Devido a essa característica, as respostas de deslocamento (lateral e frontal) possuem maior participação e o modo torsional possui pequena participação na resposta global da estrutura. A participação predominante dos primeiros modos (modo fundamental) indica que o modelo de barras pode ser utilizado com boa aproximação.

As respostas de deslocamento máximo obtidas são muito pequenas para causar algum dano aos equipamentos da nacele e rotor, no entanto não há parâmetros nas normas para comparação. No entanto, analisando-se as respostas máximas de aceleração, verificou-se que o conjunto nacele e rotor podem ser submetidos a elevadas acelerações (0,110 a 1,129g), mesmo com acelerogramas com PGA muito baixa (0,045 a 0,15g). Em todas as análises do modelo III, em estado estacionado, as tensões foram inferiores a tensão de escoamento do aço.

6 MODELOS NUMÉRICOS DE UM AEROGERADOR DE 5MW

Nesse capítulo são feitas as análises modal e dinâmica sob ação de sismo, de um aerogerador de 5MW, com dimensões compatíveis com as do mercado atual, utilizando-se os três modelos de solução propostos no Capítulo 4.

6.1 Descrição do aerogerador

A aerogerador de 5MW é um modelo teórico criado pela NREL® para estudo e desenvolvimento da tecnologia e foi escolhido neste trabalho devido a geometria e resultados de simulações estarem publicamente disponibilizados. As propriedades de massa e geometria desse aerogerador são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades do aerogerador – NREL 5MW

Propriedades	Valores
Potência	5MW
Velocidade Nominal do vento	11,4m/s
RPM Operacional	12,1RPM
Diâmetro do rotor	126m
Altura da torre	87 m
Diâmetro inferior da torre	6m
Diâmetro superior da torre	3,87m
Espessura da torre	27 a 19mm
Altura do hub	90 m
Diâmetro do hub	3m
Massa da torre	347.460 kg
Massa da Nacele	240.000 kg
Massa do rotor(hub e pás)	110.000 kg
Massa total do aerogerador	697.460 kg

Fonte: Adaptado de Jonkman *et al.* (2009)

6.2 Análise modal

A análise modal é a primeira etapa no estudo do comportamento dinâmico da estrutura e permite a calibração das características dinâmicas dos modelos numéricos. As frequências naturais obtidas da estrutura são utilizadas para calcular as respostas pelo método dos espectros de resposta.

Para a solução do modelo I é utilizada uma formulação analítica e nas análises dos modelos II e III é desenvolvida uma análise numérica do tipo *ritzvectors* no

SAP2000®. As análises são consideradas completas quando pelo menos 80% do fator de participação modal é alcançado em cada uma das direções principais (eixos x, y, z) da estrutura.

6.2.1 Modelo I

Em uma formulação simplificada, o aerogerador pode ser representando por um sistema de 1GL. A primeira frequência da estrutura pode ser determinada utilizando-se a equação proposta por Blevis, (2016):

$$w_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(m_n + 0,24m_t)}}, \quad w_n \text{ em } Hz \quad (32)$$

Adotando-se a inércia média da torre como a média das inércias de todas as seções ao longo da altura, tem-se:

$$EI_{med} = 3,57 \cdot 10^{11} N \cdot m^2 \quad (33)$$

e primeira frequência da estrutura pode ser calculada como:

$$w_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3,57 \cdot 10^{11}}{87^3(347460 + 0,24 \cdot 350000)}} = 0,308 Hz \quad (34)$$

A solução obtida no modelo I permite obter resultados exatos para estruturas rígidas com deformações em um modo, e torna-se importante como um valor teórico inicial para comparação com os resultados numéricos.

6.2.2 Modelo II

O modelo II foi construído no SAP2000® com 192 elementos de barras, massas e inércias no topo, como descrito no item 4.4.2.

Na Tabela 13 são indicadas as frequências para o modelo II. A análise modal foi considerada completa com 6 modos, de deslocamento lateral (FA) e (SS), (TO) como rotação em torno do eixo Z e deslocamento vertical (VER). Os resultados obtidos podem

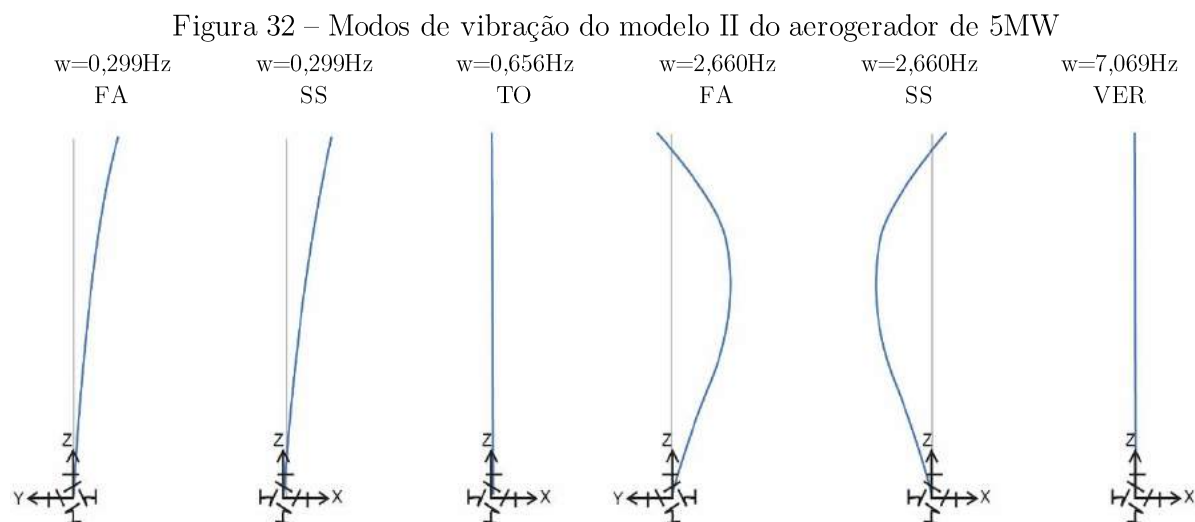
ser comparados com Jonkman *et al.* (2009), obtidos nos programas computacionais de análise aerodinâmica: ADAMS e FAST.

Tabela 13 – Frequências naturais e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo II – 5MW

Modelo II		Part. Modal unitária	Part. Modal Acumulada	Jonkman <i>et al.</i> (2009) FAST	Jonkman <i>et al.</i> (2009) ADAMS
modo	f [Hz]	%	%	f [Hz] - modo	f [Hz] -modo
1º. - SS	0,299	71,3	71,3	0,324-SS	0,294-SS
1º. - FA	0,299	71,3	71,3	0,312-FA	0,295-FA
1º. - TO	0,656	100	100	0,621-TO	0,647-TO
2º. - SS	2,660	14,1	85,4	2,900-FA	2,434-FA
2º. - FA	2,660	14,1	85,4	2,936-SS	2,535-SS
1º. - VER	7,069	80,6	80,6	-	9,646-VER

Fonte: A autora (2019)

Na Figura 32 são indicados os modos de vibração do modelo II, os modos laterais (FA e SS), de rotação (TO) e vertical (VER) e os modos superiores laterais (2º.SS - 2º.FA).



Fonte: A autora (2019)

6.2.3 Modelo III

O modelo III foi construído no SAP2000® com 1810 elementos finitos de cascas para a torre e 24 elementos sólidos para a nacelle, como descrito no item 4.4.3.

Para o modelo II, as frequências obtidas na análise são indicadas na Tabela 14. Os modos de deformação de cascas foram suprimidos, e a análise foi considerada completa com 74 modos. Os resultados obtidos são comparados com o modelo de cascas desenvolvido por Kjølraug (2013).

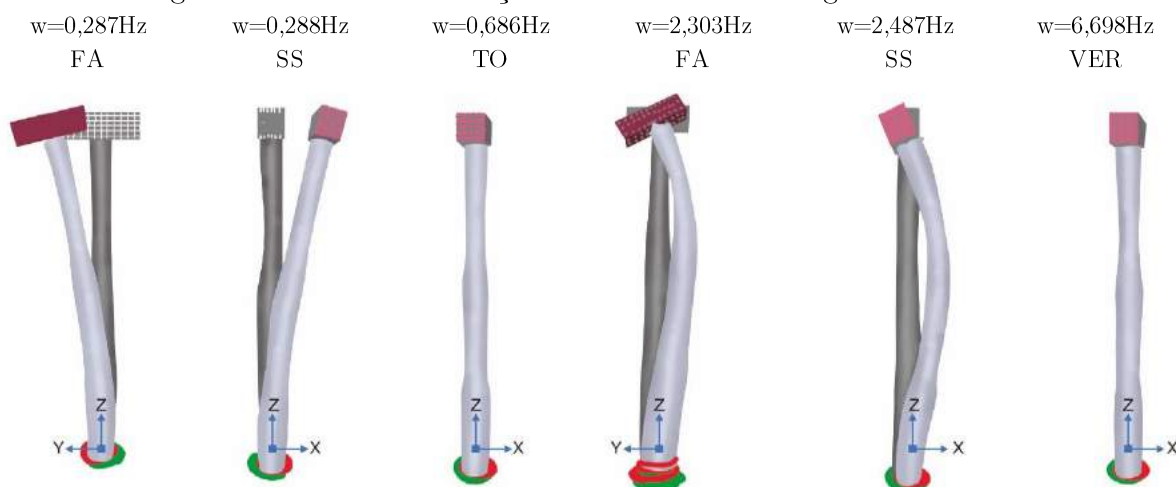
Tabela 14 – Frequências naturais e respectivos fatores de participação modal obtidas para o modelo III – 5MW

Modelo III		Part. Modal unitária	Part. Modal Acumulada	Kjølraug (2013)
modo	f [Hz]	%	%	f [Hz] - modo
1º. - SS	0,287	69	69	0,294-SS
1º. - FA	0,288	69	69	0,295-FA
1º. - TO	0,686	81	81	0,647-TO
2º. - SS	2,303	13	82	2,434-FA
2º. - FA	2,487	14	83	2,543-SS
1º. - VER	6,698	49,7	84	9,646 - VER

Fonte: A autora (2019)

Os resultados obtidos podem ser considerados válidos e os modos de deformação (SS e FA) também foram coincidentes com os resultados de Jonkman *et al.* (2009) e Kjølraug (2013). Na Figura 33 são indicados os modos de vibração do modelo III, os modos laterais (FA e SS), de rotação (TO) e vertical (VER). Os modos superiores laterais (2º.SS - 2º.FA) possuem pequenas rotações (no eixo z), por isso podem ser considerados modos acoplados flexão e torção.

Figura 33 – Modos de vibração do modelo III do aerogerador de 5MW



Fonte: A autora (2019)

6.3 Análise dinâmica

Para a solução teórica do modelo I, utiliza-se a análise por espectro de resposta considerando-se a estrutura um sistema de 1GL. Para os modelos numéricos II e III, é feita uma análise do tipo *time history* do SAP2000® e a resposta dinâmica da estrutura é obtida por sobreposição modal. São aplicadas na base dos modelos os sete acelerogramas de sismos reais indicados em 4.5.1, considerando-se combinações que simulam o estado estacionado e estado em funcionamento do aerogerador.

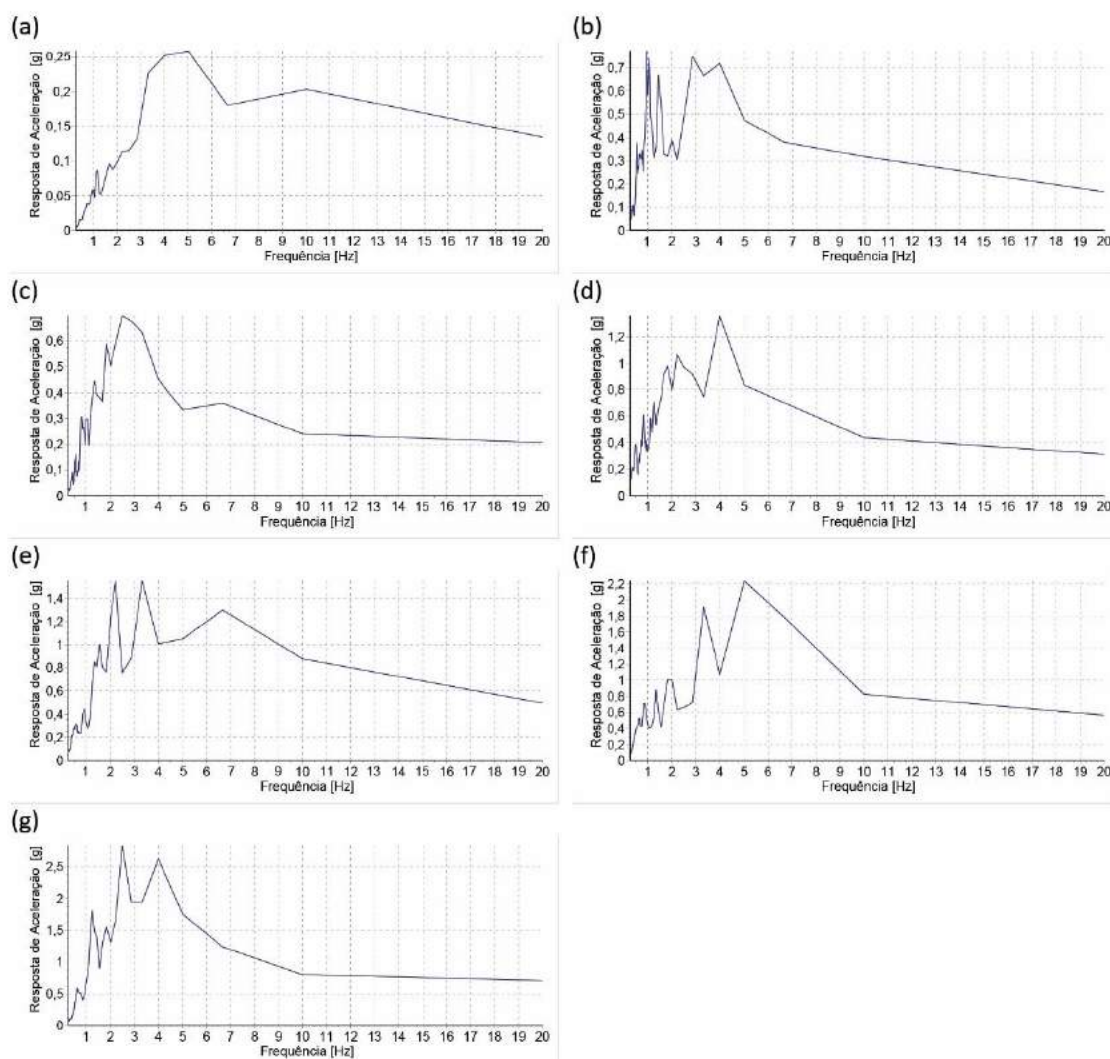
Para a combinação simulando o estado estacionado do aerogerador, é aplicada a ação isolada do sismo (CSY), e para a combinação em estado de funcionamento, tem-se a ação do vento estático (CVE) combinada com a ação do sismo (CSY), conforme indicado em 4.5.3. Adotou-se o amortecimento estrutural constante de 1% para todos os modos, para combinações em estado estacionado e 2% para combinações em estado em funcionamento, como recomendado em Prowell (2011).

6.3.1 Modelo I

As respostas máximas de aceleração e deslocamento para a ação dos sismos obtidas pelo espectro de resposta linear (modelo I) são indicadas na Figura 34 e Figura 35.

Os sete acelerogramas distintos têm como objetivo verificar os efeitos das diferentes de frequências do movimento sísmico nas estruturas, uma vez que apenas o PGA não é indicativo de maior amplificação na estrutura, e cada movimento pode induzir de maneira diferente.

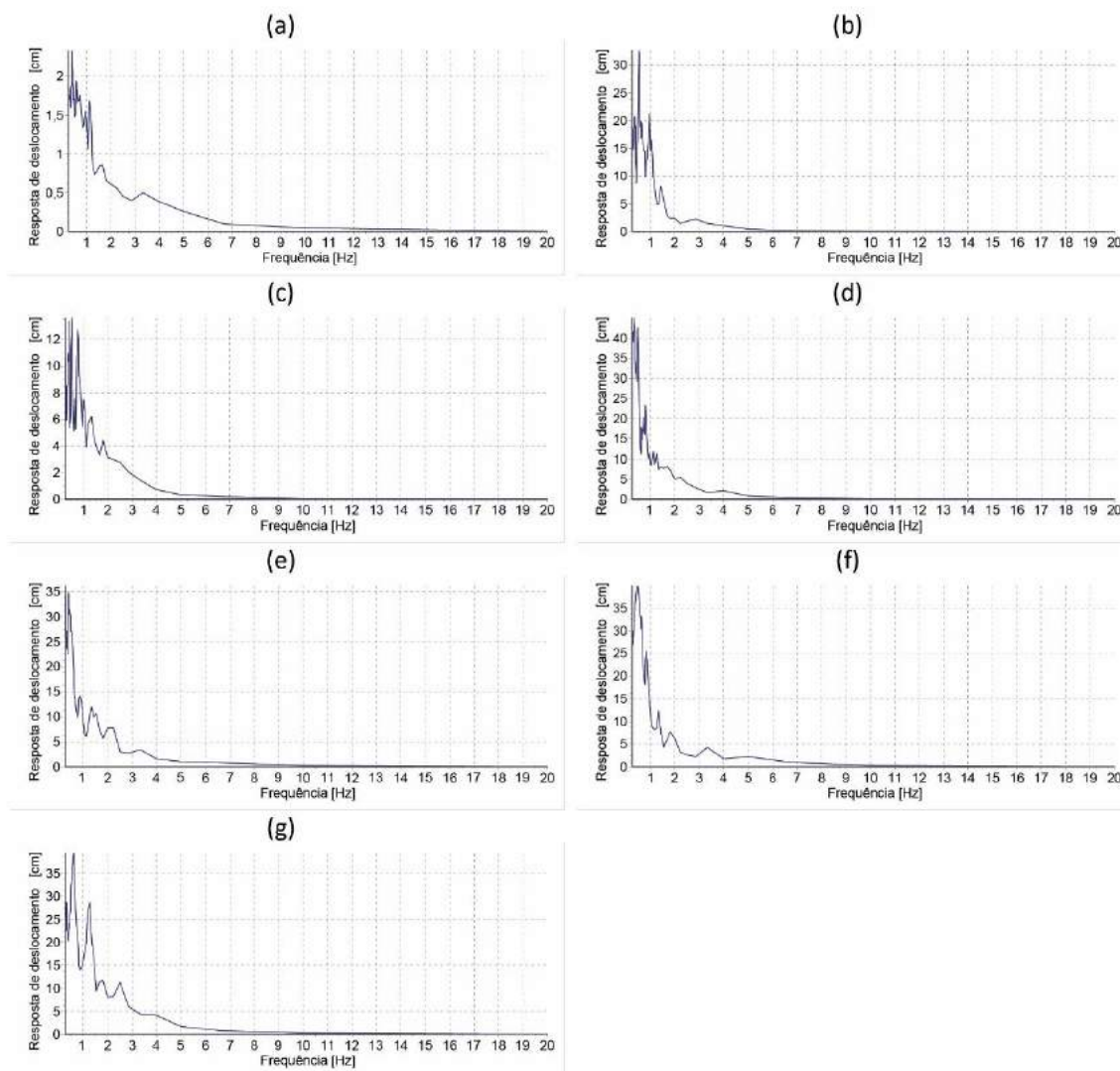
Figura 34 – Espectro de resposta de aceleração dos acelerogramas de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge – modelo I – 5MW



Fonte: Adaptado de PEER (2018)

Os espectros de aceleração possuem um trecho crescente inicial, um trecho de máximos de resposta e um trecho decrescente. Os trechos máximos iniciam-se em frequências superiores a 2Hz e nos espectros de Nahanni e Loma Prieta, os máximos são em frequências superiores a 3Hz. A frequência natural da estrutura ($w_1=0,28$ Hz) posiciona-se no início do trecho crescente dos espectros, por isso apresenta baixas acelerações.

Figura 35 – Espectro de resposta de deslocamento dos acelerogramas de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge – modelo I – 5MW



Fonte: Adaptado de PEER (2018)

Os espectros de deslocamentos possuem apenas um trecho decrescente inicial, que diminui à medida que aumenta a frequência. O trecho mais desfavorável dos espectros ocorre com frequências inferiores a 1Hz. A frequência da estrutura ($w_1=0,28$ Hz) posiciona-se no trecho de máximos e as respostas de deslocamento são elevadas.

6.3.2 Modelos II e III

Nos modelos II e III os acelerogramas são aplicados apenas no eixo Y (caso CSY) e as respostas de aceleração e deslocamento máximo para os modelos II e III obtidas pelo

time history analysis do SAP2000 são indicadas nas Tabela 15 e Tabela 16 e comparadas com as obtidas pelos espectros de resposta do modelo I.

Tabela 15 – Resumo de respostas máximas de aceleração – modelos I, II, III - 5MW

Acelerograma	PGA [g]	Aceleração Modelo I [g]	Aceleração Modelo II [g]	Aceleração Modelo III [g]	Fator de amplificação [-]
Nahanni	0,045	0,050	0,057	0,057	1,10
Landers	0,15	0,154	0,192	0,173	1,15
Hollister	0,18	0,203	0,207	0,203	1,13
El Centro	0,21	0,329	0,377	0,299	1,57
Imp. Valley	0,28	0,352	0,378	0,345	1,26
Loma Prieta	0,35	0,420	0,412	0,467	1,22
Northridge	0,56	0,580	0,582	0,571	1,04

Fonte: A autora (2019)

Analisando-se as respostas de aceleração, verifica-se que os resultados dos três modelos possuem uma boa aproximação. Os fatores de amplificação obtidos para os modelos são baixos, sendo o máximo de 1,57g para o sismo de El Centro. Comparando-se o os fatores de amplificação do aerogerador de 5MW e do de 65kW (fatores de amplificação entre 1,87 a 5,23 indicados na Tabela 11), verifica-se que são inferiores, devido à baixa frequência da estrutura ($w_1=0,28$ Hz) e seu posicionamento em relação as frequências do movimento sísmico.

Tabela 16 – Resumo de respostas máximas de deslocamento - modelos I, II, III - 5MW

Acelerograma	PGA [g]	Deslocam. Modelo I [m]	Deslocam. Modelo II [m]	Deslocam. Modelo III [m]
Nahanni	0,045	0,017	0,020	0,018
Landers	0,15	0,152	0,167	0,167
Hollister	0,18	0,062	0,066	0,063
El Centro	0,21	0,399	0,431	0,423
Imp. Valley	0,28	0,261	0,289	0,287
Loma Prieta	0,35	0,295	0,322	0,309
Northridge	0,56	0,276	0,299	0,302

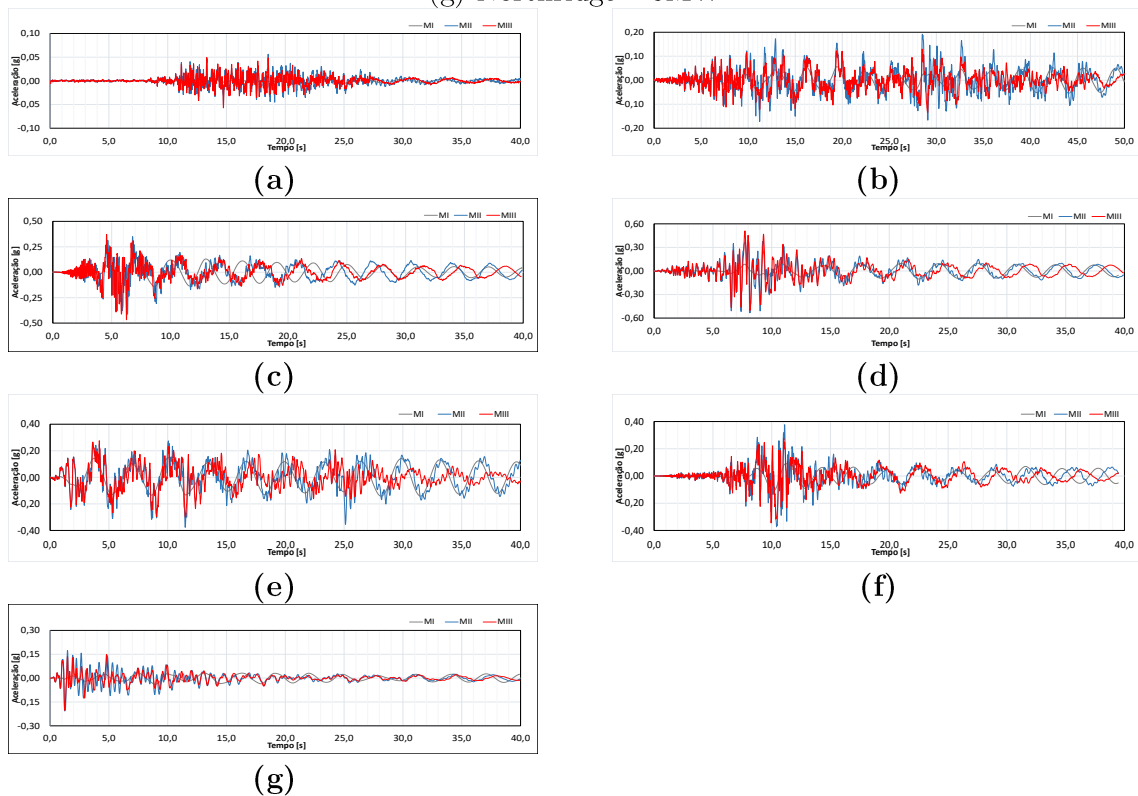
Fonte: A autora (2019)

Em relação as respostas de deslocamentos, verifica-se que os resultados dos três modelos possuem uma boa aproximação, e que os deslocamentos máximos de 0,423m ocorrem para o sismo de El Centro. Comparando-se os deslocamentos do aerogerador de

5MW e do de 65kW (deslocamentos de 0,008 a 0,103m indicados na Tabela 10), verifica-se os resultados do aerogerador de 5MW são bem superiores, devido principalmente a diferença de altura da torre (22m do aerogerador de 65kW e 97m do aerogerador de 5MW).

Na Figura 36 tem-se que as respostas em função do tempo dos modelos I, II, III e verifica-se que possuem uma boa aproximação, e apenas os trechos finais das respostas do sismo de Imperial Valley possuem uma divergência entre os modelos.

Figura 36 – Resposta de acelerações ao longo do tempo dos modelos I, II, III dos acelerogramas de (a) Nahanni, (b) Landers, (c) Hollister, (d) El Centro, (e) Imperial Valley, (f) Loma Prieta, (g) Northridge – 5MW



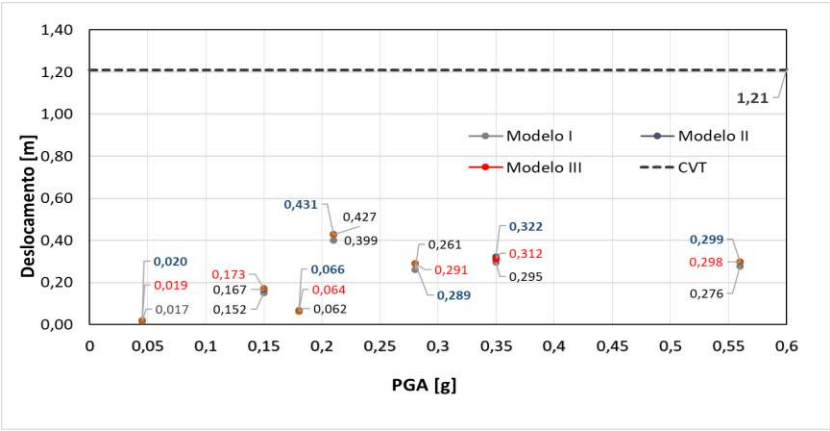
Fonte: A autora (2019)

6.3.3 Combinação para o estado estacionado do aerogerador

Para simular o estado estacionado do aerogerador, considera-se a ação isolada dos acelerogramas sísmicos (CSY) aplicada na base dos modelos na direção y. As respostas máximas das análises são indicadas (Figura 37 e Figura 38), juntamente com as respostas máximas obtidas em análise adicional considerando apenas a ação do vento transiente (CVT), com objetivo de estimar a magnitude das respostas sísmicas em relação as respostas da estrutura do aerogerador em funcionamento.

Comparando-se as respostas de deslocamentos devido ação dos sismos (CSY) com a ação do vento (CVT), verifica-se que as respostas devido ao sismo são muito inferiores a do vento (Figura 37). Para um acelerograma de PGA elevada (0,56g), estas representam apenas cerca de 30% do deslocamento devido ao vento, o que indica que para os modelos do aerogerador de 5MW, em estado estacionado, os deslocamentos no topo devido à ação do sismo representam são inferiores aos que a estrutura está submetida em funcionamento.

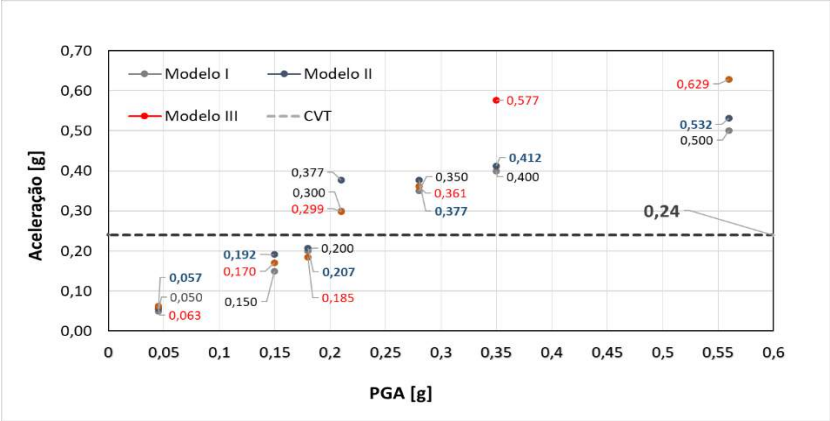
Figura 37 – Resposta de deslocamentos máximas – estado estacionado dos modelos I, II, III – 5MW



Fonte: A autora (2019)

Comparando-se as respostas máximas de aceleração devido ação dos sismos (CSY) com a ação do vento (CVT), verifica-se que os sismos com PGA superior a 0,20g apresentam acelerações no topo mais elevadas que a ação do vento (CVT). Para os modelos do aerogerador de 5MW, em estado estacionado, as acelerações no topo devido à ação do sismo são superiores às que a estrutura está submetida em funcionamento.

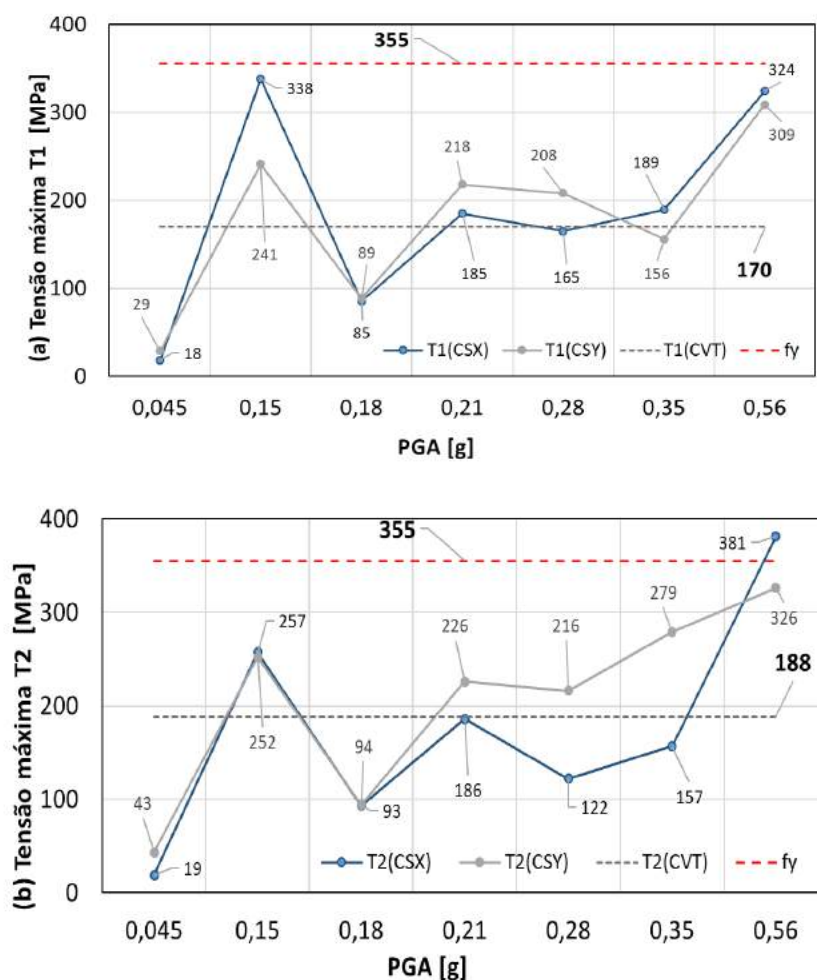
Figura 38 – Resposta de acelerações máximas – estado estacionado dos modelos I, II, III – 5MW



Fonte: A autora (2019)

Para análise de tensões na torre, as tensões principais (T1 e T2) em estado estacionado são comparadas as tensões devido ações isoladas do sismo (CSX, CSY) com a ação isolada do vento transiente (Figura 39).

Figura 39 – Resposta de tensões máximas (a) T1 e (b) T2 na torre de acordo com a PGA – estado estacionado do modelo III – 5MW



Fonte: A autora (2019)

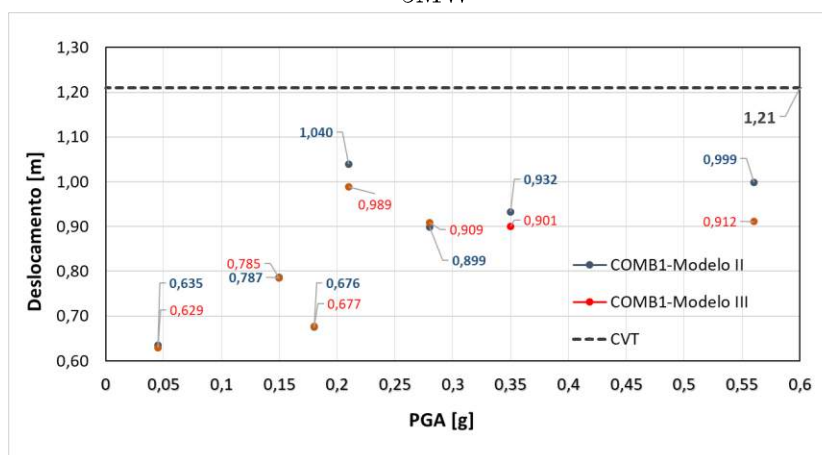
Comparando-se as tensões máximas, verifica-se que as tensões T1 e T2 devido ação dos sismos, em pelo menos um dos casos CS ultrapassam as tensões devido ação do vento transiente (170MPa e 188MPa) para acelerogramas como PGA acima 0,21g, o que indica que mesmo em estado estacionado, as tensões a estrutura está submetida são próximas ao estado de funcionamento. Em todas as análises as tensões são inferiores à de escoamento do aço, de 355 MPa, exceto a T2 do sismo de Northridge, que com 381MPa é superior a tensão do aço.

6.3.4 Combinações para o estado em funcionamento do aerogerador

Para o estado em funcionamento da estrutura, considera-se uma combinação do ELU (COMB1) com a ação do acelerogramas sísmicos (CS) aplicada na base dos modelos e a ação do vento estático (CVE) aplicada no nó equivalente ao centro do rotor, com os respectivos fatores de ponderação definidos em 4.5.3.

As respostas máximas de deslocamentos para a COMB1, considerando-se a ação do sismo (CSY) na mesma direção y do vento, são indicadas na Figura 40. Nas análises da COMB1, as acelerações máximas não são consideradas, devido a ação estática do vento.

Figura 40 – Resposta de deslocamentos máximas – estado em funcionamento dos modelos II, III – 5MW

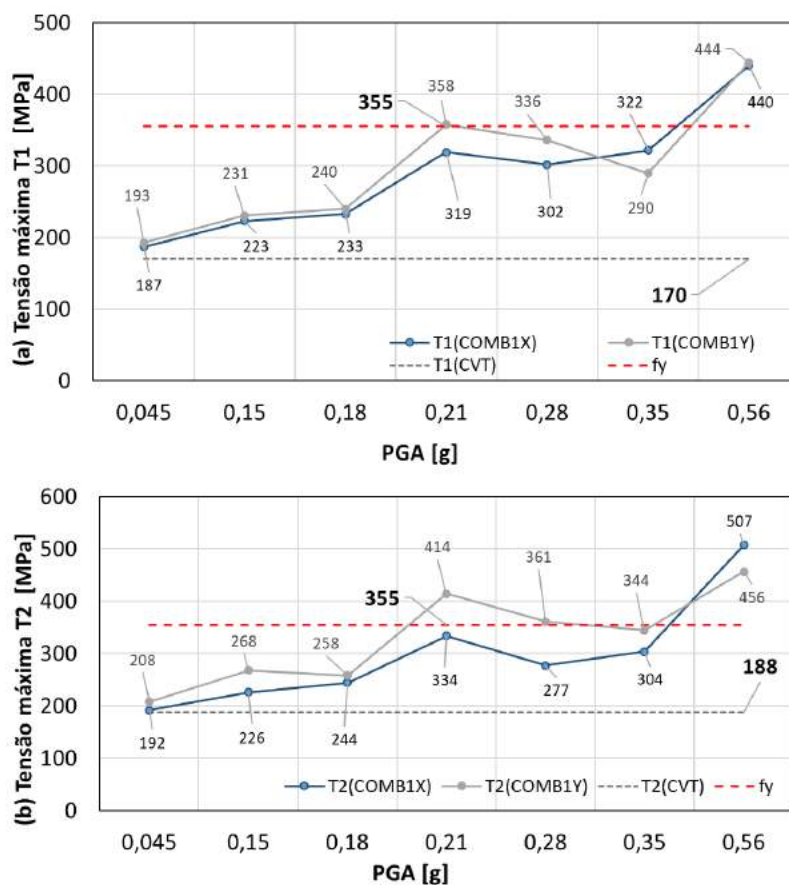


Fonte: A autora (2019)

Analisando-se as respostas de deslocamentos da COMB1 com a ação do vento (CVT), verifica-se que todas são inferiores, mesmo para um acelerograma de PGA elevada (0,56g). Os deslocamentos máximos ocorrem para os sismos de El Centro e Northridge podem chegar a 1% da altura da torre (0,9m).

Para a análise de tensões na estrutura, as tensões principais (T1 e T2), são comparadas as tensões devido a COMB1 composta de (CSX, CSY) e do vento estático (CVE) com as tensões devido ação isolada do vento transiente (Figura 41).

Figura 41 – Resposta de tensões máximas (a) T1 e (b) T2 na torre de acordo com a PGA – estado em funcionamento do modelo III – 5MW



Fonte: A autora (2019)

Comparando-se as tensões máximas da COMB1, verifica-se que em todos os casos as tensões são superiores a ação do vento transiente (170MPa e 188MPa), o que indica que para o aerogerador de 5MW analisado, a combinação de sismo e vento pode levar a estrutura a tensões superiores à de funcionamento. Este acréscimo de tensões é da ordem de até 37% para os sismos de PGA baixa (0,045 a 0,18g), de 100% para os sismos de PGA moderada (0,21 a 0,35), e chegam a 200% para o sismo de PGA elevada (0,56g). Uma análise importante é que para sismos de PGA moderada (acima de 0,21g), pelo menos uma das tensões principais ultrapassam a tensão de escoamento do aço, de 355 MPa.

6.4 Comentários e discussão

Neste capítulo, foram apresentados três modelos para a análise dinâmica do aerogerador de 5MW. De acordo com os resultados obtidos têm-se, as seguintes considerações:

A extensa bibliografia de dados do aerogerador de 5MW permitiu que as ações dos sismos fossem comparadas com a ação do vento, predominante na estrutura do aerogerador. Foi possível criar duas combinações, simulando o estado estacionado e o em funcionamento do aerogerador.

De modo geral, os três modelos são capazes de representar a resposta dinâmica da estrutura do aerogerador NREL de 5MW sob ação sísmica. Os modelos numéricos (II e III) apresentaram uma boa aproximação de resultados, o que ressalta que a escolha da discretização dos modelos, em elementos de barras ou de cascas, depende da resposta dinâmica necessária associada a fase de projeto do aerogerador.

Em relação as análises pelo espectro (modelo I) verifica-se que a primeira frequência do aerogerador é muito baixa ($w_1=0,28$ Hz), o que torna a estrutura flexível-flexível e afasta a faixa mais desfavorável dos espectros analisados, que se encontram entre 0 a 1,0Hz. No entanto, espera-se que esta condição favorável se aplique apenas para este aerogerador de 5MW, uma vez há uma tendência a aerogeradores com frequências mais elevadas, posicionados na faixa flexível-rígido.

Em relação as análises das combinações em estado estacionado, verifica-se que acelerações no topo devido à ação do sismo são superiores as que estrutura está submetida em funcionamento, para sismos com PGA superior a 0,20g. O mesmo ocorre para as tensões máximas T1, T2, que para a ação do sismo são superiores as tensões devido o vento transiente.

Para as análises das combinações em estado de funcionamento, verifica-se que em todos os casos, pelo menos uma das tensões é superior ao estado de funcionamento, e que o acréscimo de tensões é da ordem de 100% para sismos de PGA moderada (0,21 a 0,35g).

As respostas de deslocamento, para os estados em funcionamento e estacionado, são inferiores as obtidas devido a ação do vento, o que indica que os deslocamentos podem não ser tão prejudiciais. Em funcionamento, a torre está submetida a elevados deslocamentos e a flexibilidade estrutural parece ser um parâmetro importante do projeto. No entanto, um estudo recente mostrou que as torres com maiores deslocamentos têm até 2,2 vezes mais paradas, devido às vibrações mais intensas dos componentes na nacelle (ZENDEHBAD; CHOKANI; ABHARI, 2016).

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são indicadas as principais conclusões e contribuições obtidas no trabalho, bem como, recomendações para investigações adicionais e trabalhos futuros.

Com o presente trabalho apresentou-se três modelagens simplificadas e numéricas para representar a estrutura de um aerogerador e resolver problemas de dinâmica de estruturas submetidas a ação dos sismos. Os objetivos desse estudo foram o desenvolvimento de modelos para representação das características dinâmicas da estrutura de aerogeradores e a compreensão da resposta dinâmica obtida.

Na maioria dos aerogeradores, as cargas críticas são frequentemente impostas por flutuações do vento. No entanto, estudos atuais mostram que as atividades sísmicas próximas de falhas sísmicas são capazes de gerar terremotos de tamanho moderado, capazes de superar a ação do vento de projeto. Com a instalação de parques eólicos em regiões sísmicamente ativas, como por exemplo, a região de Poço Branco e João Câmara-RN, a consideração apropriada das ações sísmicas é importante para a segurança dos parques eólicos.

Em uma etapa inicial buscou-se analisar as principais características dinâmicas da estrutura, para este fim foram construídos três modelos simplificados e numéricos com os dados do aerogerador de 65kW. Para a análise sísmica foram considerados diferentes intensidades de acelerogramas, compatíveis com as acelerações máximas de solo recomendadas pela ABNT NBR 15421 (2006). Os resultados das análises modal e dinâmica foram validados com os dados do ensaio de mesa sísmica da USCD. De acordo com as análises e resultados para as ações sísmicas, as seguintes conclusões foram obtidas:

Os três modelos foram capazes de representar o comportamento dinâmico da estrutura do aerogerador de 65kW em condição estacionada e sob ação sísmica. Os resultados obtidos com as abordagens foram comparados e as respostas dinâmicas obtidas apresentaram uma boa aproximação.

Na análise modal verificou-se uma elevada participação dos primeiros modos laterais (FA-SS), o que indica um comportamento flexional da estrutura nessa direção. Uma condição favorável da predominância dos primeiros modos é que a abordagem simplificada pode ser empregada com boa aproximação.

Observou-se que a frequência do movimento sísmico é um parâmetro importante e que controla a resposta sísmica. Para os modelos do aerogerador de 65kw, verificou-se que a primeira frequência da estrutura ($w_1=1,69$ Hz) aproxima-se dos trechos de máximos dos espectros de resposta de aceleração (inferior a 1Hz) e deslocamento (entre 0 e 5Hz). Com isso a estrutura está submetida a elevadas acelerações e deslocamentos.

Verifica-se que para os melos analisados, as acelerações no topo são bem elevadas, tendo-se um fator de amplificação maior que 3 (aerogerador de 65kW e o acelerograma do El Centro) em relação a aceleração do solo.

Em uma segunda etapa, os três modelos propostos foram construídos com os dados do aerogerador de 5MW. Com os dados de vento da bibliografia foi possível criar duas combinações em estado estacionado e em funcionamento. De acordo as análises e resultados obtidos, foram obtidas as seguintes conclusões:

Os três modelos são capazes de representar as características dinâmicas da estrutura do aerogerador de 5MW, e todos os modelos numéricos apresentaram uma boa aproximação de resultados.

A primeira frequência da estrutura é muito baixa ($w_1=0,28$ Hz), o que torna a estrutura do tipo flexível-flexível. Com isso, a estrutura afasta-se da faixa mais desfavorável dos espectros de aceleração (superiores a 2Hz) e aproxima-se da faixa desfavorável de espectros de deslocamentos (inferiores a 1Hz). Com isso, as respostas de acelerações, para o sismo isolado, foram muito baixas e as deslocamentos foram elevadas. No entanto, espera-se que esta condição favorável se aplique apenas para este aerogerador de 5MW, uma vez há uma tendência a aerogeradores com frequências mais elevadas, posicionados na faixa flexível-rígido.

Para as combinações em estado estacionado, verifica-se que as respostas de aceleração e de tensão, para sismos de PGA moderada, são superiores as acelerações e tensões que a estrutura está submetida em combinações em estado funcionamento.

Para as combinações em estado em funcionamento, verifica-se que as respostas de tensão são superiores as tensões que a estrutura está submetida em funcionamento, e que em sismos de PGA elevada (0,56g de Northridge) podem superar a tensão de escoamento do aço.

Diante das análises é possível concluir que a ação isolada do sismo, mesmo com PGA elevada, não é capaz de levar a tensão limite do aço da torre, e que a situação mais desfavorável ocorre na situação de funcionamento normal combinada com a ação do sismo.

Mesmo com poucos dados para comparação da magnitude entre as ações sísmicas e a ação do vento (ação de funcionamento do aerogerador), é possível evidenciar que os deslocamentos, devido à ação do sismo, não são tão elevados, e que o aerogerador já apresenta deslocamentos maiores em funcionamento. Entretanto com as respostas obtidas, de elevadas de acelerações e tensões ao longo da torre, conclui-se que são fundamental importância que as ações sísmicas sejam levados em consideração no projeto e para todas as seções e conexões da torre.

7.1 Sugestão para trabalhos futuros

Na sequência do trabalho, surgem aspectos interessantes para uma investigação mais detalhada do comportamento dinâmico de estruturas de turbinas eólicas submetidas as ações sísmicas. Os seguintes estudos são sugeridos:

- Inclusão de ações dinâmicas do vento (vento normal e turbulento), para que sejam analisados os diferentes estados de funcionamento da turbina e sejam compostas as combinações de carregamentos com a ação do sismo;
- Consideração do amortecimento aerodinâmico para combinações em estado de funcionamento da turbina;
- Consideração da não-linearidade geométrica da estrutura;
- Consideração da não-linearidade do material;
- Consideração de cargas cíclicas e análise de fadiga do material;
- A inclusão nos modelos numéricos, do elemento de fundação, do solo e efeitos da interação solo-estrutura;
- Utilizar diferentes exemplares de turbinas eólicas, com diferentes propriedades de materiais com torres em concreto e mistas.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA). **Boletim anual de geração eólica**. 2017. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>. Acesso em: 23 set. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8800**: Projeto e execução de estruturas de aço de edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): **NBR 15421**: Projeto de Estruturas Resistentes a Sismos. Rio de Janeiro, 2006.
- AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (AISC). **Specification for Structural Steel Buildings. Standard ANSI/AISC 360-05**. American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill., USA, 2005.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Minimum design loads for building and other structures**. Standard ASCE/SEI 7-05. American Society of Civil Engineers, Reston, Va., USA, 2005.
- ASSUMPÇÃO, M. Tremores de Terra e o Novo Mapa de Ameaça Sísmica do Brasil. **ANAIS da 69ª Reunião Anual da SBPC** - Belo Horizonte, julho, 2017.
- ASSUMPÇÃO, M.; DIAS NETO, C. M. Sismicidade e Estrutura da Terra Sólida. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Oficina de Textos, São Paulo, 2000.
- ASSUMPÇÃO, M.; PIRCHINER, M.; DOURADO, J. C.; BARROS, L. V. Terremotos no Brasil: Preparando-se para Eventos Raros. **Boletim SBGF**. n. 96, p: 25-29, 2016.
- AUSTIN, S. JERATH, S. Effect of soil-foundation-structure interaction on the seismic response of wind turbines. **Ain shams engineering Journal**. v. 8, p: 323-331, 2017.
- BATHE, K. J.; WILSON, E. L. **Numerical Methods in Finite Element Analysis**, New Jersey, Prentice-Hall., 1976.
- BAZEOS, N.; HATZIGEORGIOU, G. D.; HONDROS, I. D.; KARAMANEAS, H.; KARABLIS, D. L.; BESKOS, D. E. Static. Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower. **Engineering Structures**, v. 24, n. 8, p: 1015–1025, 2002.

BERROCAL; J.; ASSUMPCÃO, M.; ANTENAZA, R.; DIAS NETO, C.M.; ORTEGA, R.; FRANÇA, H.; VELOSO, J. A. **Sismicidade do Brasil**, IAG. Universidade de São Paulo, CNEM, 1984.

BEZERRA, R. H., FERREIRA, J.M., NASCIMENTO, A.F. Neotectônica e sismicidade no Brasil. **Boletim SBGf. Publicação da Sociedade Brasileira de Geofísica**. n. 96, p: 30-31. 2016.

BLEVINS, R. D. **Formulas for dynamics, acoustics and vibration**. Wiley, 2016.

BOLETIM SÍSMICO BRASILEIRO (BSB). **Mapa de sismicidade**. 2016. Disponível em: <http://moho.iag.usp.br/>. Acesso em: 01 ago. 2018.

BUILDING STANDARD LAW (BSL) **The Building standard law of Japan**, The building centre of Japan, 2004 (in Japanese).

CHOPRA, A. K. **Dynamics of Structures** – Theory & Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., 4. ed. Nova Iorque: 2012.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. 2. ed. Berkeley, CA: McGraw-Hill, Nova Iorque, 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIAS PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRIO DE S. BRITO (CRESESB). **Tutorial de energia eólica**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com__content&lang=pt&cid=231. Acesso em: 23 nov. 2018.

COMPUTERS & STRUCTURES INC (CSI). **CSI Knowledge Base**. University of California, 2012. Disponível em: <https://wiki.csiberkeley.com/display/kb/>. Acesso em: 11 dez. 2018.

DAMGAARD M.; ANDERSEN J.K.F; IBSEN L.B.; ANDERSEN L.V. **Natural Frequency and Damping Estimation of an Offshore Wind Turbine Structure**. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 2012.

DEVRIENDT, C.; WEIJTJENS, W. Damping of offshore wind turbines. In: **Proceedings of the Offshore Wind Energy 2017**, London, UK, p: 6–8, June 2017.

DÍAZ, O.; SUÁREZ, L. E. Seismic analysis of wind turbines. **Earthquake Spectra**, v. 30, n. 2, p: 743–765, 2014.

DNV. **Design of Offshore Wind Turbine Structures**. Det Norske Veritas AS, January 2002.

EC8-1. **Eurocode 8**: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules Seismic Actions and Rules for Buildings. European Committee for Standarization, 2004.

EC-8. **EN 1998-1**: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings, CEN, Brussels, Belgium, 2012.

FALCONI, R.A. Espectros Sísmicos de Riesgo Uniforme para Verificar Desempeño Estructural em Países Latinoamericanos. **Anais do XVII Seminário Iberoamericano de Ingeniería Sísmica**. Mendoza. Argentina. 2003.

FONTECHA, R.; KEMPER, F.; FELDMANN, M. On the Determination of the Aerodynamic Damping of Wind Turbines Using the Forced Oscillations Method in Wind Tunnel Experiments. **Energies**. v. 12, n. 2452, p: 1-19, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334029791_On_the_Determination_of_the_Aerodynamic_Damping_of_Wind_Turbines_Using_the_Forced_Oscillations_Method_in_Wind_Tunnel_Experiments. Acesso em: 23 dez. 2019.

GE RENEWABLE ENERGY. **LM Wind Power** - Expanding Wind Portfolio. 2016. Disponível em: <https://www.ge.com/renewableenergy/stories/ge-acquires-lm-wind-power>. Acesso em: 23 dez. 2018.

GE REPORTS. **Let It Blow**: How Brazilian Wind Farms Benefit From GE's Largest Acquisition. 06/01/2016. Disponível em: <https://www.ge.com/reports/let-it-blow-how-brazilian-wind-farms-benefit-from-ge-alstom-acquisition/>. Acesso em: 23 dez. 2018.

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

GLOBAL SEISMIC HAZARD ASSESSMENT PROGRAM (GSHAP). **The Global Seismic Hazard Assessment Program**. Global Seismic Hazard Map. 1999. Disponível em: <http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP>. Acesso em: 08 mar. 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **GWEC Global Wind 2017 Report**. Disponível em: https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf. Acesso em: 17 out. 2018.

HANSEN, M. H.; THOMSEN, K.; FUGLSANG, P.; KNUDSEN, T. Two methods for estimating aeroelastic damping of operational wind turbine modes from experiments. **Wind Energy** v. 9, p: 179–191, 2006. doi:10.1002/we.187

HAU, E. **Wind Turbines**. Springer-Verlag Berlin & Heidelberg, 2006.

HONG, Rex Chin-Yih. **Response of a wind turbine blade to seismic and turbulent wind excitations**. Urbana, Univ.of Illinois, Ph.D.Thesis, 1984.

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

ISHIHARA, T.; SARWAR, M. W. **Numerical and Theoretical Study on Seismic Response of Wind Turbines**. Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, 2008.

JAMIESON, P. **Innovation in wind turbine design**. Wiley, 2011.

JONKMAN, J.; BUTTERFIELD, S.; MUSIAL, W.; SCOTT, G. **Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development**. Technical Report NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2009.

KENNER, S.; SEGALL, P. A Mechanical Model for Intraplate Earthquakes: Application to the New Madrid Seismic Zone. **Science**, n. 289, p: 2329–2332, 2000.

KJØRLAUG, R. A. **Seismic response of wind turbines**. Master Thesis. Norwegian University of science and technology civil and environmental engineering, Norway, 2013.

KJØRLAUG, R. A.; KAYNIA, A. M. Vertical earthquake response of megawatt-sized wind turbine with soil-structure interaction effects. **Earthquake Engineering Structural Dynamics**, v. 44, p: 2341–2358, 2014.

LAVASSAS, I.; NIKOLAIDIS, G.; ZERVAS, P.; EFTHIMIOU, E.; DOUDOUMIS, I. N.; BANIOPOULOS, C. C. **Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1-MW Wind Turbine Tower**. Engineering Structures, 2003.

MOURA, A. S. **Avaliação de metodologias de projeto de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna**. 2007, 352 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA (NBCC). **National Research Council of Canada**, Ottawa, Canana. 2005.

NEWMARK, N. M.; ROSEMBLUETH, E. **Fundamentals of Earthquake Engineering**. Prentice-Hall, Inc. 1982.

NHERI. **NEESR-II A Seismic Study of Wind Turbines for Renewable Energy (WTRU)** (2010). Disponível em: <http://nheri.ucsd.edu/projects/2010-wind-turbine/>. Acesso em: 03 nov. 2018.

NUTA, E., CHRISTOPOULOS, C. PACKER, J.A., Methodology for seismic risk assessment for tubular steel wind turbine towers: application to Canadian seismic environment, **Can. J. Civil Eng.**, n. 38, v. 3, p: 293-304, 2011.

OLIVEIRA, P. H. S. de. **Sismicidade e esforços tectônicos na zona sísmica Acaraú, Nordeste do Brasil**. 2015. 135f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

PEER. **Pacific Earthquake Engineering Research Center**: NGA Database. University of California, Berkeley, Janeiro, Novembro 2018. Disponível em: <http://peer.berkeley.edu/nga/>. Acesso em: 03 nov. 2018.

PINET, P. R. **Invitation to oceanography**. 4th. Edition, Jones e Bartlett Publishers, LLC, 2008.

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

PROWELL, I.; ELGAMAL, A.; UANG, C. M.; LUCO, J. E.; ROMANOWITZ, H.; DUGGAN, E. Shake Table Testing and Numerical Simulation of a Utility-Scale Wind Turbine Including Operational Effects. **Wind Energy**, v. 17, n. 7, p: 997-1016, 2014.

PROWELL, I.; UANG, C. M.; ELGAMAL, A.; LUCO, J. E.; GUO, L. Shake Table Testing of a Utility-Scale Wind Turbine. **Journal of Engineering Mechanics**, n. 138, p: 900-909, July 2012.

RISØ. Guidelines for Design of Wind Turbines. **Wind Energy Department of RISØ National Laboratory and Det Norske Veritas**, Copenhagen, Denmark, 2001.

RITSCHER, U., WARNKE, I., KIRCHNER, J., MEUSSEN, B. **Wind turbines and earthquakes**. World Wind Energy Conference, Cape Town, South Africa, 2003.

ROCHA, André Barroso. **Uma avaliação comparativa entre torres para aerogeradores de aço tubulares e de concreto pré-moldado protendido na região de Serra do Mel**. 2016, 75f. Monografia. Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares. In: GEONOMOS, **Revista do Centro de Pesquisa** Professor Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências – UFMG, v. 1, 1993. Disponível em: <http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/233>. Acesso em: 11 nov. 2018.

SAADI, A. **Map of quaternary faults and lineaments of Brazil**: A project of international lithosphere program task group II-2, major active faults of the world, 2002.

SALZMANN, D. J. C.; TEMPEL, J. V. D. Aerodynamic damping in the design of support structures for offshore wind turbines. In: **Proceedings of the Copenhagen Offshore Wind Conference**, Delft, The Netherlands, 26–28 October 2005.

SANTOS, S. H.; LIMA, S. S. Elements for Future Brazilian Standard for Seismic Resistance of Concrete Structures of Building. **IBRACON Structural Journal**, n.1, p: 47-62, 2004.

SANTOS S. H. C. **Aplicação dos Modelos de Biela-Tirante ao Projeto de Estruturas Sismo-Resistentes**. 1992, 272f. Tese (Doutorado - COOPE/UFRJ) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1992.

SBC Energy Institute. **Aerogeradores**. Disponível em: <https://www.ucsusa.org/>. Acesso em: 23 set. 2018.

SCHULTE, S. M.; MOONEY, W. D. An updated global earthquake catalogue for stable continental regions: reassessing the correlation with ancient rifts. **Geophysical Journal International**, v. 161, n. 3, p. 707–721, 2005.

SCIENCE LEARNING HUB. **Seismic waves**: image. Disponível em: <https://www.sciencelearn.org.nz/images/352-seismic-waves>. Acesso em: 23 dez. 2018.

SHEDLOCK, K. M.; J. G. TANNER. **Seismic hazard map of the western hemisphere**. 1999. Disponível em:
<http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/americas/amerstext.html>. Acesso em: 23 ago. 2018.

SORIANO, Humberto Lima. **Elementos Finitos**. Formulação e Aplicação na Estática e Dinâmica das Estruturas. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2014

SVENSSON, F. **Numerical Investigation of Soil-Structure Interaction for Onshore Wind Turbines Grounded on a Layered Soil**. 154f. Master Thesis. Germany, 2010.

SYKES, L.R. Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zone of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. **Rev. Geophys. Space Phys.** v. 245, p: 298–302, 1978.

TADDEI, F. **Numerical Investigation of Soil-Structure Interaction for Onshore Wind Turbines Grounded on a Layered Soil**. 2014, 154f. Master Thesis. Germany, 2014.

TALWANI, P. Characteristic features of intraplate earthquakes and the models proposed to explain them. In: GREGERSEN, S., BASHAM, P. W. (Eds.). **Earthquakes at North Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Post-Glacial Rebound**. Kluwer, Dordrecht, 1989, p: 289–297.

TALWANI, P. RAJENDRAN, K. Some seismological and geometric features of intraplate earthquakes. **Tectonophysics**, n. 186, p: 19–41, 1991.

VALAMANESH, V.; MYERS, A. T. Aerodynamic Damping and Seismic Response of Horizontal Axis Wind Turbine Towers. **Journal of Structural Engineering**. v. 140, n. 11, p: 1-32, 2014. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001018

VELOSO, J. A. V. Os surpreendentes terremotos intraplaca. **Boletim Sociedade Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, n. 96, p: 10-14, 2016.

WIKIMEDIA COMMONS. **TOWER**. Disponível em:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/FowlerRidgeWindFarm>. Acesso em: 23 out. 2018.
 WITCHER, D. Seismic analysis of wind turbines in the time domain. v. 1, n. 1, 2005.
 DOI: <https://doi.org/10.1002/we.135>

ZENDEHBAD, M.; CHOKANI, N.; ABHARI, R. S. **Volumetric 3D wind measurements using a single mobile-based LiDAR**. ASME J. Sol. Energy Eng. Incl. Wind Energy Build. Energy Conservation. 138, 2016.

ZOBACK, M. L. Stress field constraints on intraplate seismicity in eastern North America, **J. Geophys. Res.**, n. 97, v. 11, p: 761–11,782, 1992.