

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES
SOB A AÇÃO DO VENTO**

DODANI RENAN DE MORAIS

PORTO ALEGRE
2020

DODANI RENAN DE MORAIS

**ANÁLISE DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES
SOB A AÇÃO DO VENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

PORTO ALEGRE
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Morais, Dodani Renan de
Análise dinâmica estrutural de aerogeradores sob a
ação do vento / Dodani Renan de Moraes. -- 2020.
123 f.
Orientador: Herbert Martins Gomes.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2020.

1. Vibrações. 2. Ação do vento. 3. Análise no
domínio da frequência. 4. Geração de vento
correlacionado. 5. NBR 6123:1988. I. Gomes, Herbert
Martins, orient. II. Título.

DODANI RENAN DE MORAIS

**ANÁLISE DINÂMICA ESTRUTURAL DE AEROGERADORES
SOB A AÇÃO DO VENTO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de março de 2020

Prof. Herbert Martins Gomes
Dr. pela Univ. Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Felipe Schaefer de Almeida (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. José Luis Vital de Brito (UNB)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)
Dr. techn. pela Universität Innsbruck

Dedico este trabalho a meus pais Jair e Josenara, minha namorada Shirlei e meus amigos Léo Jaime e Raquel pela compreensão durante o período de seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nada seria possível.

Agradeço ao Prof. Herbert Martins Gomes, meu orientador, pela indispensável contribuição dada para que este trabalho fosse realizado. Pela disponibilidade concedida, empenho e dedicação em orientar e passar o máximo de conhecimento, contribuindo para o desenvolvimento do trabalho e de meu aprendizado.

Agradeço aos colegas que ao longo do curso dividiram dúvidas e dificuldades e compartilharam conhecimento e experiências.

Agradeço a meus amigos e minha família, pela paciência, pelos esforços realizados, pela preocupação comigo e pelo apoio que me foi dado em todos os momentos.

O que faz andar o barco não é a vela enfunada, mas o
vento que não se vê.

Platão

RESUMO

MORAIS, D. R. **Análise dinâmica estrutural de aerogeradores sob a ação do vento.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A crescente demanda por energia e a conscientização da sociedade quanto à preservação dos recursos naturais tem feito com que a utilização de fontes de energia renováveis seja cada vez mais desenvolvida e recorrente. Uma destas fontes é o vento, explorado para a geração de energia através da implantação de aerogeradores, também conhecidos como turbinas ou torres eólicas, que em conjunto formam os parques eólicos. Os aerogeradores são estruturas, normalmente dotadas de pás que captam a força do vento e, por meio de um gerador, convertem a energia cinética do vento em energia elétrica. Para a implantação de torres eólicas, além de se conhecer a viabilidade econômica e em termos de segurança, é importante conhecer e avaliar esforços e deslocamentos que poderão ocorrer nas pás, na torre e nas fundações. Diante disso, este trabalho propõe uma ferramenta para pré-avaliar o comportamento dinâmico de aerogeradores sujeitos à ação do vento. Conhecer este comportamento é importante especialmente devido à natureza aleatória do vento. Para simulação da ação do vento é adotado um modelo de geração de sinais de velocidade do vento correlacionados no tempo e no espaço, o qual segue uma densidade espectral de potência de von Kármán com parâmetros como intensidade de turbulência, desvio padrão de turbulência, perfil de velocidade média de acordo com a altura e coeficientes de decaimento para correlação conforme a distância entre os pontos de ação do vento. A implementação da estrutura e das condições simuladas é realizada em ambiente e linguagem de programação Matlab. Simulações com diferentes condições de vento (velocidade média e outros parâmetros) são realizadas e para cada uma é feita a análise nos domínios do tempo e da frequência. Verifica-se o tempo de simulação e o esforço computacional na avaliação dos valores RMS (*Root Mean Square*) de sinais de aceleração e deslocamentos em pontos específicos do aerogerador, assim como reações nas fundações. Resultados obtidos indicam que para simulações longas o método do domínio da frequência se mostra mais eficiente. O parâmetro do vento com maior impacto nos resultados foi a velocidade média, seguido do expoente da camada limite atmosférica.

Palavras-chave: *Vibração estrutural, Torres de Geradores Eólicos, Análise no domínio da frequência, NBR 6123:1988, Geração de vento correlacionado.*

ABSTRACT

MORAIS, D. R **Dynamic structural analysis of wind turbines under the wind action**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The growing energy demand and the society's awareness regarding the preservation of natural resources has made the use of renewable energy sources increasingly developed and recurrent. One of these sources is the wind, exploited for power generation through the installation of wind turbines, also known as wind towers, which in groups form wind farms. The wind turbines are structures, normally equipped with blades that capture the wind force and, through a generator, convert the kinetic energy of the wind into electrical energy. For the deployment of wind towers, in addition to knowing the viability in terms of economy and safety, it is important to know and evaluate stresses, forces and displacements that may occur in the blades, tower and foundations. Therefore, this work proposes a tool to pre-evaluate the dynamic behavior of wind turbines subjected to the action of the wind. Knowing this behavior is especially important due to the random nature of the wind. For the simulation of the wind action, a model of generation of wind speed signals correlated in time and space is adopted, which follows a von Kármán Power Spectral Density with parameters such as turbulence intensity, turbulence standard deviation, average wind speed profile according to the height and decay coefficients for correlation in accordance to the distance between the wind action points. The implementation of the simulated structure and conditions is performed in Matlab programming language and environment. Simulations with different wind conditions (mean speed and other parameters) are carried out and for each one an analysis is made in the time and frequency domains. The simulation time and the computational effort are verified in the evaluation of the RMS (*Root Mean Square*) values of acceleration and displacement signals in specific points of the wind turbine, as well as reactions in the foundations. Obtained results indicate that for long simulations the frequency domain method presents itself to be more efficient. The wind parameter with the greatest impact on the results was the average speed, followed by the exponent of the atmospheric boundary layer.

Key-words: *Structural vibration, Wind Turbine Tower, Frequency Domain Analysis, NBR 6123:1988, correlated wind generation.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1 MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA	25
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.3 METODOLOGIA.....	26
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	26
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	28
2.1 A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	28
2.2 A ENERGIA EÓLICA NO MUNDO.....	30
2.3 CONTRIBUIÇÃO SOCIOAMBIENTAL DA ENERGIA EÓLICA.....	32
2.4 GERADORES EÓLICOS	33
2.4.1 Turbinas de Eixo Vertical (VAWT).....	34
2.4.2 Turbinas de Eixo Horizontal (HAWT).....	35
2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES DE AEROGERADORES.....	40
3. MODELAMENTO ESTRUTURAL	44
3.1 MATRIZ DE RIGIDEZ	45
3.2 MATRIZ DE MASSA CONDENSADA (<i>LUMPED</i>).....	47
3.3 MATRIZ DE MASSA CONSISTENTE.....	48
3.4 ANÁLISE MODAL	49
3.4.1 Ortogonalidade dos Modos de Vibração	51
3.5 MATRIZ DE AMORTECIMENTO	52
4. ANÁLISE DINÂMICA.....	54
4.1 ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DO TEMPO	55
4.1.1 Método de Newmark	56
4.2 ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	57
5. MODELAMENTO DA AÇÃO DO VENTO.....	61
5.1 CONCEITOS INICIAIS SOBRE VENTOS.....	61

5.2	GERAÇÃO DE CAMPOS ESTOCÁSTICOS CORRELACIONADOS PARA O VENTO.....	67
5.2.1	Simulação do Vento Correlacionado Espacialmente	68
5.2.2	Simulação do Vento Correlacionado na dimensão da altura	71
5.2.3	Simulação do Vento Correlacionado em uma superfície.....	76
5.3	AÇÃO DO VENTO NAS ESTRUTURAS	79
6.	VERIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SIMULAÇÃO ESTRUTURAL NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA	85
7.	SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO SOBRE UM AEROGERADOR	94
7.1	INFORMAÇÕES SOBRE O AEROGERADOR	94
7.2	INFORMAÇÕES SOBRE O VENTO PARA AS SIMULAÇÕES	99
8.	RESULTADOS	102
9.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	109
10.	CONCLUSÕES.....	114
10.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DOS ALGORITMOS PARA A ANÁLISE ESTRUTURAL DE AEROGERADORES	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Capacidade total de geração de energia eólica instalada no Brasil (GWEC, 2018).	29
Figura 2.2 – Evolução da capacidade instalada da fonte eólica (ABEEÓLICA, 2017).....	29
Figura 2.3 – Capacidade nova instalada em 2017 e capacidade total acumulada até dez. 2017 (GWEC, 2018; ABEEÓLICA, 2017).	30
Figura 2.4 – Capacidade nova instalada (vermelho) e capacidade total acumulada por ano (azul), de 2001 a 2017 (GWEC, 2018).....	31
Figura 2.5 – Investimentos na energia eólica em milhões de dólares e percentual sobre o total das fontes renováveis por ano (ABEEÓLICA, 2017).....	32
Figura 2.6 – Previsão de capacidade de produção eólica mundial de 2017 a 2022 (GWEC, 2018).	32
Figura 2.7 – Turbinas eólicas <i>onshore</i> e <i>offshore</i> (GWEC, 2016).	34
Figura 2.8 – Modelos de geradores eólicos de eixo vertical a) Darrieus; b) Savonius; c) Solarwind; d) Helicoidal (PINTO, 2014).....	35
Figura 2.9 – Sistema básico de uma turbina com caixa de engrenagens e seu gerador ligado à rede elétrica (PINTO, 2014).....	35
Figura 2.10 – Aerogerador de eixo horizontal e seus principais componentes (PINTO, 2014).	36
Figura 2.11 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).....	37
Figura 2.12 – Turbinas eólicas horizontais com rotores <i>upwind</i> e <i>downwind</i> (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).....	37
Figura 2.13 – HAWT de 1, 2 e 3 pás (OLIVEIRA, 2012; GWEC, 2018).....	38
Figura 2.14 – Tamanhos de turbinas de eixo horizontal (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).....	39
Figura 2.15 – Aerogeradores com torre tubular de aço, tubular de concreto e treliçada (GUIDELINES..., 2002).....	40
Figura 3.1 – Elemento de viga 3D no sistema local de coordenadas.....	45

Figura 3.2 – Matriz de rigidez no sistema local de coordenadas (FERREIRA, 2009).....	46
Figura 3.3 – Matriz de massa <i>lumped</i> (CLOUGH; PENZIEN, 2003).....	48
Figura 3.4 – Matriz de massa consistente (PAZ; LEIGH, 2004).....	49
Figura 4.1 – A área abaixo da curva de densidade espectral é igual à $E[\{\mathbf{x}^2(t)\}_k]$ (NEWLAND, 1984).....	59
Figura 5.1 – Espectro de energia para o vento (adaptado de BLESSMANN, 1995).....	62
Figura 5.2 – Exemplo de Rosa dos Ventos com vento anual predominante a Noroeste (300°) e com velocidades médias em torno de 10 m/s (obtidos pela distribuição de Weibull para aquele setor da Rosa dos Ventos). (Adaptado de GIACOMOLLI, 2018).	63
Figura 5.3 – Representação das Parcelas médias e flutuantes do vento no espaço e ao longo do tempo (Adaptado de ARSHAD e O’KELLY, 2015).	64
Figura 5.4 – Histograma da quantidade de tempo que o vento sopra para cada faixa de velocidade (PINTO, 2014).	65
Figura 5.5 – Espectros de Davenport, Harris, von Kármán e Kaimal (BLESSMANN, 1995).	66
Figura 5.6 – (a) Linha vertical e pontos usados para simular as flutuações da velocidade do vento; (b) Séries de flutuação da velocidade ao longo do tempo e para diferentes alturas; (c) Diferentes alturas e flutuações máximas e mínimas da velocidade do vento; (d) Variações da velocidade do vento ao longo do tempo (percebe-se a correlação com a altura medida).	72
Figura 5.7 – Perfil vertical de velocidade média do vento ao longo da altura. ..	73
Figura 5.8 – Intensidade de turbulência (TI) conforme velocidade do vento para as direções longitudinal (I_u), lateral (I_v) e vertical (I_w).	74
Figura 5.9 – Espectros de velocidade do vento para direções (a) longitudinal, (b) lateral e (c) vertical obtidos dos sinais gerados de velocidade no tempo e a respectiva densidade espectral de von Kármán para as alturas de referência de 10m (esquerda) e 30m (direita).	75
Figura 5.10 – Plano e pontos utilizados para simular as flutuações da velocidade do vento correlacionado.	76

Figura 5.11 – Flutuação da velocidade do vento ao longo do tempo para os diferentes nós.....	77
Figura 5.12 – Correlação para diferentes distâncias entre nós do plano onde o vento é simulado.....	78
Figura 5.13 – Perfil vertical de velocidade média do vento.	78
Figura 5.14 – Correlação para pontos a 10 m e 90 m de altura em relação a outros pontos.	79
Figura 5.15 – Aplicação de forças do vento relacionado ao perfil de pressão e à área de influência do ponto em questão.	80
Figura 5.16 – Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador e esforços aerodinâmicos no sistema local do elemento de pá do aerogerador (JEONG et al., 2013).....	81
Figura 5.17 – Coeficientes aerodinâmicos de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) como função do ângulo de ataque (α) para o aerofólio NACA23012 (GUNDTOFT, 2009).....	82
Figura 5.18 – Esquema do desprendimento cadenciado de vórtices numa estrutura de seção circular.	84
Figura 6.1 – Sistema de 3 graus de liberdade sujeito à excitação de aceleração do tipo ruído branco na sua base.	85
Figura 7.1 – (a) Aerogerador e (b) modelo discretizado. $H_{hub}=60$ m, $D=60$ m.	96
Figura 7.2 – Intervalos de frequências de excitação 1P e 3P (adaptado de VAN ZYL;VAN ZIJL, 2015).	97
Figura 8.1 –Frequências naturais dos 8 primeiros modos de vibração.	102
Figura 8.2 –Valores de históricos no tempo de velocidade do vento em cada ponto da estrutura, condição A. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista lateral.	105
Figura 8.3 – Perfis de velocidade longitudinal (V_x) e transversal (V_y) do vento na condição A: Velocidade média (linha cheia vermelha), diversas simulações (linhas pretas).	106
Figura 8.4 – Perfis de velocidade do vento na direção longitudinal (V_x) das condições A e C: Velocidade média (linha cheia vermelha), diversas simulações (linhas pretas).	106

Figura 8.5 –Forças aplicadas no topo da torre do aerogerador, a 60 metros de altura, nas direções longitudinal (x) e transversal (y) ao longo do tempo, condição A.....	107
Figura 8.6 –Deslocamentos no topo da torre do aerogerador, a 60 metros de altura, nas direções longitudinal (x), transversal (y) e vertical (z) ao longo do tempo, condição A.....	107
Figura 8.7 –Reações na base da torre do aerogerador ao longo do tempo, condição A.....	108
Figura A.1 – Fluxograma dos algoritmos utilizados para a análise estrutural de aerogeradores nos domínios do tempo e da frequência.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Projetos e capacidade de geração eólica a ser acrescida entre 2018 e 2023 (GWEC, 2018).....	29
Tabela 5.1 - Valores dos coeficiente de arrasto.....	80
Tabela 6.1 - Dados de 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência, com a Regra Trapezoidal e com Gauss-Kronrod.....	87
Tabela 6.2 - Dados de 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal.....	88
Tabela 6.3 - Dados de mais 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal.....	88
Tabela 6.4 -Resumo das simulações no domínio do tempo com Newmark (60 segundos) e comparativo em relação aos resultados no domínio da frequência com Gauss-Kronrod.....	89
Tabela 6.5 -Resumo das simulações no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal e comparativo em relação aos resultados com Gauss-Kronrod.....	89
Tabela 6.6 – Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 60 segundos, passo de tempo 0,005s e 12000 pontos no tempo.	90
Tabela 6.7 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 300 segundos, passo de tempo 0,005s e 60000 pontos no tempo.	90
Tabela 6.8 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 60 segundos, passo de tempo 0,002s e 30000 pontos no tempo.	91
Tabela 6.9 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades e tempos de simulação, com passo de tempo 0,002s.....	92
Tabela 6.10 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades e tempos de simulação, com passo de tempo 0,001s.....	92
Tabela 6.11 - Comparação dos resultados obtidos no domínio do tempo com simulações de diferentes tempos de simulação e passo de tempo 0,005s.....	92
Tabela 6.12 - Comparação dos resultados obtidos no domínio do tempo com simulações de diferentes tempos de simulação e passo de tempo 0,001s.....	93
Tabela 7.1 – Resumo das propriedades do aerogerador.....	95
Tabela 7.2 - Razão de amortecimento estrutural. (BURTON et al., 2011).	98
Tabela 7.3 – Parâmetros de entrada para simulações.....	99

Tabela 8.1 – Deslocamentos RMS, acelerações RMS e o tempo gasto para a execução da simulação de cada caso no domínio do tempo e da frequência. $T=3000s$; $\Delta t=0,05s$; $nls=30000$	103
Tabela 8.2 – Valores RMS de reações encontradas na base da estrutura nos domínios do tempo e da frequência. $T=3000s$; $\Delta t=0,05s$; $nls=30000$	104
Tabela 9.1 – Cálculo de rotações das pás para intervalo de frequência de funcionamento....	109
Tabela 9.2 – Deslocamentos e acelerações RMS no topo da torre e tempo de processamento para condição A com diferentes tempos de simulação. $\Delta t=0,05s$; $nls=3000$, 30000 e 100000, respectivamente.	112
Tabela 9.3 – Valores RMS de reações na base da torre para condição A com diferentes tempos de simulação. $\Delta t=0,05s$; $nls=3000$, 30000 e 100000, respectivamente.	113

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABEEÓLICA	: Associação Brasileira de Energia Eólica
ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica
EUA	: Estados Unidos da América
EWEA	: <i>European Wind Energy Association</i>
GDL	: Graus de liberdade
GWEC	: <i>Global Wind Energy Council</i>
HAWT	: <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>
NBR	: Norma Brasileira
MDF	: Método das diferenças finitas
MEF	: Método dos elementos finitos
RMS	: <i>Root Mean Square</i>
TI	: Intensidade de turbulência (<i>Turbulence Intensity</i>)
VAWT	: <i>Vertical Axis Wind Turbine</i>

Letras romanas maiúsculas

A	: Área da seção do elemento	[m ²]
A_n	: Área de aplicação da força do vento (Cap. 5)	[m ²]
A_p	: Área de aplicação da força do vento na pá (Cap. 5 - Eq. 5.17 e 5.18)	[m ²]
$[B^e]$: Matriz que relaciona deslocamentos e deformações	[-]
C	: Coeficiente resultante de arrasto e/ou sustentação	[-]
C_D	: Coeficiente de arrasto	[-]
C_L	: Coeficiente de sustentação	[-]
C_z e C_y	: Coeficientes de decaimento exponencial determinados experimentalmente	[-]
$[C]$: Matriz de amortecimento	[Ns/m]
C_{xx}	: Cosseno diretor do eixo x para o eixo X	[-]

$Coh(d, f)$: Correlação espacial de velocidades	[-]
D	: Diâmetro do rotor	[m]
D	: Diâmetro externo do elemento	[m]
$\mathbf{D}(\omega)$: Matriz com elementos da diagonal principal $\sqrt{S_{11}(\omega)}, \sqrt{S_{22}(\omega)}, \dots, \sqrt{S_{nn}(\omega)}$	[(m/s)/Hz ^{1/2}]
$[\mathbf{D}^e]$: Matriz constitutiva do elemento	[N/m ²]
E	: Módulo de elasticidade	[N/m ²]
$E[.]$: Representação do valor médio esperado do que está entre colchetes	[-]
F_D	: Força de arrasto do vento	[N]
F_L	: Força de sustentação do vento	[N]
F_n	: Força de arrasto do vento em um nó da estrutura	[N]
$F_{ui}, F_{uj}, F_{vi}, F_{vj}$: Forças nos nós do elemento	[N]
F_{xL}, F_{yL} e F_{zL}	: Componentes das forças aerodinâmicas no sistema local	[N]
$\{\mathbf{F}\}$: Vetor de forças externas	[N]
$\{\mathbf{F}(t)\}$: Vetor de carregamento em função do tempo	[N] ou [Nm]
$\{\mathbf{F}_m(t)\}$: Vetor de carregamento modal em função do tempo	[N] ou [Nm]
$\{\mathbf{F}_m(\omega)\}$: Transformada de Fourier de $\{\mathbf{F}_m(t)\}$	[-]
G	: Módulo de elasticidade transversal	[N/m ²]
$\mathbf{H}(\omega)$: Matriz resultante da fatoração da matriz $\mathbf{S}(\omega)$	[(m/s) ² /Hz]
$H_{jk}(\omega)$: Elementos da matriz $\mathbf{H}(\omega)$	[(m/s) ² /Hz]
$H_{jm}(\omega)$: Elementos da matriz $\mathbf{H}(\omega)$	[(m/s) ² /Hz]
H_{hub}	: Altura total da torre	
$[\mathbf{H}_m(\omega)]$: Matriz função de transferência do sistema (complexa)	[-]
I_0	: Momento de inércia polar da seção transversal	[m ⁴]
I_u, I_v e I_w	: Intensidade de Turbulência nas direções principal (longitudinal), transversal (lateral) e vertical de incidência do vento	[%]
I_y	: Momento de inércia em relação ao eixo y	[m ⁴]
I_z	: Momento de inércia em relação ao eixo z	[m ⁴]
$[\mathbf{I}]$: Matriz identidade	[-]
J	: Momento de inércia polar ou constante torsional	[m ⁴]
$[\mathbf{K}]$: Matriz de rigidez	[N/m]

L	: Comprimento do elemento	[m]
L_c	: Dimensão característica da estrutura (equação para cálculo da V_{cr})	[m]
L_j	: Escala do comprimento de turbulência das componentes lateral ($j = v$) e vertical ($j = w$)	[m]
L_u	: Escala do comprimento de turbulência longitudinal (u)	[m]
$L_u^x(z), L_v^x(z), L_w^x(z)$: Componentes longitudinal, transversal e vertical do comprimento de turbulência	[m]
L_1	: Escala de comprimento de referência	[m]
$L(\omega)$: Matriz resultante da fatoração da matriz de coerência $\mathbf{F}(\omega)$	[-]
$[\mathbf{M}]$: Matriz de massa	[kg]
M_x, M_y, M_z	: Momentos na base nas direções x, y e z	[Nm]
$M_{\theta_{ui}}, M_{\theta_{uj}}, M_{\theta_{vi}}, M_{\theta_{vj}}$: Momentos nos nós do elemento	[Nm]
N	: Número de intervalos da banda de frequências	[-]
R	: Comprimento das pás	[m]
Re	: Número de Reynolds	[-]
R_x, R_y, R_z	: Reações na base nas direções x, y e z	[N]
$[\mathbf{R}]$: Matriz de rotação	[rad]
$[\mathbf{R}^e]$: Matriz de rotação do elemento e	[rad]
$\{\mathbf{R}(t)\}$: Vetor de reações	[N] ou [Nm]
$S_F(y, z, f)$: Espectro de força do vento	[N ² /Hz]
$S_j(f)$: Espectro de Potência das componentes lateral ($j=v$) e vertical ($j=w$) de turbulência	[(m/s) ² /Hz]
$S_{jj}(\omega), S_{kk}(\omega)$: Auto densidade espectral de $v_j(t)$ e $v_k(t)$	[(m/s) ² /Hz]
$S_{jk}(\omega)$: Densidade espectral cruzada de $v_j(t)$ e $v_k(t)$	[(m/s) ² /Hz]
S_t	: Número de Strouhal	[-]
$S_u(f)$: Espectro de Potência da componente longitudinal de turbulência	[(m/s) ² /Hz]
$S_v(y, z, f)$: Espectro de velocidade do vento	[(m/s) ² /Hz]
$S_x(\omega_i)$: Função densidade espectral de potência da variável x	[(.) ² /Hz]
$S_{\ddot{x}}(\omega_i)$: Função densidade espectral de potência da aceleração	[(m/s ²) ² /Hz]
$[\mathbf{S}_F(\omega)]$: Matriz função densidade espectral de potência das forças aplicadas equação 4.16	[(N) ² /Hz]

$[\mathbf{S}_{Fm}(\omega)]$: Matriz densidade espectral das forças modais	$[(N)^2/Hz]$
$[\mathbf{S}_R(\omega)]$: Matriz função densidade espectral de potência das reações	$[(N)^2/Hz]$ ou $[(Nm)^2/Hz]$
$[\mathbf{S}_x(\omega)]$: Matriz função densidade espectral de potência dos deslocamentos	$[(m)^2/Hz]$
$[\mathbf{S}_x^e(\omega)]$: Matriz função densidade espectral de potência dos deslocamentos do elemento e	$[(m)^2/Hz]$
$[\mathbf{S}_\eta(\omega)]$: Densidade espectral das variáveis modais	$[(m)^2/Hz]$
$[\mathbf{S}_\sigma^e(\omega)]$: Matriz função densidade espectral de potência das tensões no elemento	$[(N/m^2)^2/Hz]$
$\mathbf{S}(\omega)$: Matriz de densidades espectrais cruzadas da velocidade do vento	$[(m/s)^2/Hz]$
T	: Tempo de simulação	[s]
TI	: <i>Turbulence Intensity</i> (Intensidade de Turbulência)	[-]
U_{z_0}	: Velocidade longitudinal média na altura de referência z_0	[m/s]
$\bar{U}(z)$: Parcela de velocidade média, de longo prazo, do vento	[m/s]
$\{\mathbf{U}\}$: Vetor de deslocamentos nodais	[m] ou [rad]
$\{\mathbf{U}^e\}$: Vetor de deslocamentos do elemento	[m] ou [rad]
V	: Velocidade do vento incidindo na pá	[m/s]
V_{cr}	: Velocidade crítica do vento	[m/s]
V_k	: Velocidade característica do vento atuando no ponto médio (k) do elemento	[m/s]
V_{rel}	: Velocidade relativa do vento	[m/s]
$[\mathbf{Z}]$: Matriz das razões de amortecimento	[-]

Letras romanas minúsculas

c_k	: Amortecimento modal do k -ésimo modo de vibração	[Ns/m]
c_n	: Amortecimento generalizado para o modo n	[Ns/m]
c_n^{crit}	: Amortecimento crítico para o modo n	[Ns/m]
d	: Distância entre dois pontos	
$d\omega$: incremento ou intervalo de frequências	[rad/s]
f	: Frequência em hertz (Hz)	[Hz]
f	: Frequência da rajada (equação 5.6)	[Hz]
f_k	: Frequência natural do k -ésimo modo de vibração	[Hz]

f_{\min}	: Frequência mínima	[Hz]
f_{\max}	: Frequência máxima	[Hz]
$\{f^e\}$: Vetor de reações ou forças a nível de elemento	[N] ou [Nm]
i	: número imaginário $\sqrt{-1}$, equação 4.12	[-]
i e j	: Nó inicial e nó final de um elemento	[-]
k	: Nó de aplicação da força do vento	[-]
k_k	: Rigidez modal do k-ésimo modo de vibração	[N/m]
$[k^e]$: Matriz de rigidez global do elemento e	[N/m]
$[k^e]^L$: Matriz de rigidez do elemento no sistema local de coordenadas	[N/m]
m_k	: Massa modal do k-ésimo modo de vibração, k-ésimo elemento da matriz diagonalizada de massa	[-]
\bar{m}	: Massa por unidade de comprimento	[kg/m]
m_1, m_2, m_3	: Massas dos graus de liberdade 1, 2 e 3	[kg]
$[m^e]$: Matriz de massa do elemento no sistema global	[kg]
$[m^e]^L$: Matriz de massa do elemento no sistema local	[kg]
n	: Número de ciclos, de equações, de vetores, de componentes, de modos de vibração	[-]
nls	: Número de linhas espectrais	[-]
$[r]$: Matriz de rotação para o grau de liberdade	[rad]
r	: Distância da raiz da pá até um ponto na pá	[m]
t	: Tempo	[s]
u	: Deslocamento horizontal	[m]
u_i, u_j, v_i, v_j	: Deslocamentos lineares nos nós do elemento	[m]
u_r	: Velocidade do vento em uma altura de referência	[m/s]
u_1, u_2, u_3	: Deslocamentos dos graus de liberdade 1, 2 e 3	[m]
$u(y, z, t)$: Velocidade do vento	[m/s]
$\tilde{u}(y, z, t)$: Parcela de velocidade flutuante, de curto prazo, do vento	[m/s]
$\ddot{u}_i, \ddot{u}_j, \ddot{v}_i, \ddot{v}_j$: Acelerações lineares nos nós do elemento	[m/s ²]
v	: Deslocamento transversal	[m]
$v(t)$: Processo Gaussiano estacionário de média zero com componentes de velocidade do vento	[m/s]
w	: Deslocamento vertical	[m]
x, y, z	: Direções longitudinal, transversal e vertical	[-]
$x(t)$: Variável/processo aleatório em função do tempo	[.]

$\ddot{x}(t)$: Aceleração em função do tempo	[m/s ²]
\ddot{x}_n	: Aceleração do n-ésimo modo de vibração	[m/s ²]
\dot{x}_n	: Velocidade do n-ésimo modo de vibração	[m/s]
x_n	: Deslocamento do n-ésimo modo de vibração	[m]
$x_{k,rms}$: Valor RMS de x_k (Cap. 4 - Eq. 4.17) (valor RMS de determinada variável com média zero)	[m]
x_L e y_L	: Eixos locais do elemento	[-]
$\{x\}$: Vetor de deslocamento	[m]
$\{\ddot{x}\}$: Vetor de aceleração	[m/s ²] ou [rad/s ²]
$\{x(t)\}$: Vetor deslocamento em função do tempo	[m] ou [rad]
$\{\dot{x}(t)\}$: Vetor velocidade em função do tempo	[m/s] ou [rad/s]
$\{\ddot{x}(t)\}$: Vetor aceleração em função do tempo	[m/s ²] ou [rad/s ²]
$\{x^e(t)\}$: Vetor de deslocamentos do elemento e	[m] ou [rad]
y_1, y_2, z_1 e z_2	: Coordenadas de dois pontos da face da estrutura atingida pelo vento	[m]
z	: Altura	[m]
z_{min}	: Altura mínima arbitrária dependente da categoria do terreno	[m]
z_r	: Altura de referência (Cap. 5)	[m]
z_0	: Altura de referência (Cap. 5)	[m]
z_1	: Altura de referência (Cap. 7)	[m]

Letras gregas maiúsculas

$\Gamma(\omega)$: Matriz de coerência	[-]
$\Gamma_{jk}(\omega)$: Função de coerência de $v_j(t)$ e $v_k(t)$	[-]
Δf	: Passo ou intervalo de frequência	[Hz]
Δt	: Passo ou intervalo de tempo	[s]
$\Delta \omega$: Passo ou intervalo de frequência	[rad/s]
Λ	: Autovalores	[(rad/s) ²]
$[\Lambda]$: Matriz de autovalores	[(rad/s) ²]
$[\Phi]$: Matriz modal	[-]
$[\Phi^*]$: Matriz de autovetores ou modos de vibração ortonormalizada	[kg ⁻¹]

Letras gregas minúsculas

α	: Parâmetro utilizado no método de Newmark	[-]
α	: Expoente da camada limite atmosférica, dependente da rugosidade do terreno	[-]
α	: Ângulo de ataque	[rad]
α	: Ângulo de ataque da velocidade relativa em relação ao perfil da pá	[rad]
$\beta_{jm}(\omega)$: Elementos da matriz $L(\omega)$	[-]
γ	: Ângulo que a velocidade relativa do vento faz com o eixo local x_L do elemento	[rad]
δ	: Parâmetro utilizado no método de Newmark	[-]
ξ_k	: Coeficiente de amortecimento do k-ésimo modo de vibração	[-]
$\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$: Razões de amortecimento dos graus de liberdade 1, 2 e 3	[-]
$\{\eta(t)\}$: Variáveis modais	[-]
$\{\dot{\eta}(t)\}$: Velocidade das variáveis modais	[-]
$\{\ddot{\eta}(t)\}$: Aceleração das variáveis modais	[-]
$\{\eta(\omega)\}$: Transformada de Fourier de $\{\eta(t)\}$	[-]
$\theta_{ui}, \theta_{uj}, \theta_{vi}, \theta_{vj}$: Deslocamentos angulares nos nós do elemento	[rad]
θ_u	: Rotação eixo horizontal	[rad]
θ_v	: Rotação eixo transversal	[rad]
θ_w	: Rotação eixo vertical	[rad]
θ_{Xx}	: Ângulo do eixo global X em relação ao eixo local x	[rad]
θ_{Yx}	: Ângulo do eixo global Y em relação ao eixo local x	[rad]
θ_{Zx}	: Ângulo do eixo global Z em relação ao eixo local x	[rad]
$\ddot{\theta}_{ui}, \ddot{\theta}_{uj}, \ddot{\theta}_{vi}, \ddot{\theta}_{vj}$: Acelerações angulares nos nós do elemento	[rad/s ²]
ξ_k	: Coeficiente de amortecimento do k-ésimo modo de vibração	[rad]
ξ_n	: Coeficiente de amortecimento do n-ésimo modo de vibração	
π	: Número pi	
ρ	: Massa específica ou densidade do material	[kg/m ³]
$\sigma_{\bar{u}}$: Desvio padrão da flutuação da velocidade do vento	[m/s ²]

$\{\sigma^e(t)\}$: Vetor de tensões internas do elemento finito e	[N/m ²]
ϕ	: Matriz de Autovetores	[-]
ϕ	: Autovetores de $\Gamma(\omega)$	[-]
ϕ_n	: Vetor da forma modal	[-]
φ_i	: Fases aleatórias para cada frequência ω_i (Cap. 5 – Eq. 5.5)	[rad]
$\varphi_{1l}, \varphi_{2l}, \dots, \varphi_{nl}$: n sequências de fases aleatórias	[rad]
$\{\varphi_k\}$: k -ésimo autovetor ou modo de vibração	[-]
$\{\varphi_k^*\}$: k -ésimo autovetor ou modo de vibração ortonormalizado	[kg ⁻¹]
$\{\varphi_m\}$: m -ésimo autovetor ou modo de vibração	[-]
$\chi_a(f)$: Admitância aerodinâmica	[-]
ψ	: Ângulo de <i>pitch</i> que a corda da pá do aerogerador faz com o eixo local y_L do elemento	[rad]
ψ_0	: Intensidade de excitação (Capítulo 6)	[(m/s ²) ² /(rad/s)]
ω	: Frequência natural	[rad/s]
ω	: Velocidade de rotação do aerogerador Eq.(5.16)	[rad/s]
ω_i	: i -ésima frequência discreta sendo somada	[rad/s]
ω_k	: Frequência natural do k -ésimo modo de vibração	[rad/s]
ω_n	: n -ésimo autovalor ou frequência natural	[rad/s]
ω_u	: <i>Upper cutoff frequency</i> (frequência mais elevada de corte)	[rad/s]
$\omega_1, \omega_2, \omega_3$: Frequências naturais dos modos de vibração 1, 2 e 3	[rad/s]
[]*	: conjugado complexo	[-]
∞	: infinito	[-]

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da população mundial por energia elétrica, uma das fontes de energia que tem se destacado, devido a ser limpa, renovável e inesgotável, é a energia eólica. O desenvolvimento de uma maior consciência ambiental por parte dos governantes e da população mundial, juntamente com fatores financeiros envolvendo outras fontes de energia, como a variação dos preços de produtos derivados do petróleo, fazem com que fontes de energia sustentáveis como a fotovoltaica e a eólica tenham ganhado maior enfoque nos últimos anos para serem aprimoradas e utilizadas.

A energia eólica é o aproveitamento da energia cinética do vento para produzir energia mecânica que é transformada em energia elétrica através de um gerador elétrico. O processo de conversão de energia começa com a força do vento empurrando as pás do aerogerador, as quais são aerodinamicamente projetadas para isso, fazendo com que elas tenham um movimento ascendente e giratório em torno do eixo de rotação do rotor, provocando a rotação deste e, conseqüentemente, transmitindo torque e potência a um gerador. Nesta etapa a energia do movimento do vento é transformada em energia mecânica, através de caixa de engrenagens multiplicadoras, e então é convertida em energia elétrica pelo gerador, o qual é constituído por uma bobina de grande escala. A energia pode ser gerada em corrente alternada, que depois é convertida em corrente contínua por um retificador, ou pode ser gerada diretamente em corrente contínua, podendo ser usada na rede elétrica (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009; OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Dumby (2014), algumas vantagens da energia eólica são: produzir eletricidade a um custo conhecido, independente de variações futuras do preço dos hidrocarbonetos; ser uma fonte de energia descentralizada que cria atividade econômica e empregos em zonas rurais; ter o funcionamento de turbinas eólicas sem a produção de emissões tóxicas ou poluentes nem lixo, além de permitir a continuação de atividades (por exemplo agrícolas) no terreno onde se situa. Ainda segundo o autor, em relação à última vantagem citada, mesmo levando em conta todo o ciclo de vida de uma central elétrica (construção, exploração, desmantelamento), a energia eólica é de longe, a fonte com o menor impacto ambiental.

Além disso, Feijó (2010) cita como vantagens da energia eólica a renovabilidade, a perenidade,

a grande disponibilidade e o custo zero para a obtenção de suprimentos, uma vez que as instalações para este tipo de geração de energia sejam feitas de acordo com estudos adequados que garantam rendimento satisfatório.

Já como desvantagem Dumby (2014) cita a intermitência da energia eólica, assim como ocorre com a energia solar, devido ao vento não soprar sempre à mesma velocidade e quando a procura de eletricidade é maior. Este problema, porém, é minimizado, utilizando-se um sistema elétrico que combine a energia eólica juntamente com a energia gerada por outra fonte, como centrais a gás, para os momentos em que os recursos eólicos forem reduzidos. Oliveira (2012) partilha da mesma ideia dizendo que o maior problema da energia eólica é a produção muitas vezes ser descontínua e passiva face à inconstância do vento, não sendo possível armazená-lo como se faz com a água nas barragens por exemplo, o que torna o rendimento das turbinas eólicas dependente do estado do vento no momento. O autor cita que não havendo vento, não há produção, diferentemente de uma barragem onde a produção ocorre continuamente com regularidade, armazenando-se recursos nos meses de maior pluviosidade para utilizar nos meses mais secos.

1.1 MOTIVAÇÃO/JUSTIFICATIVA

O fato é que, com o passar do tempo e com o aumento tecnológico que o acompanha, a utilização da energia eólica tem se tornado cada vez mais viável em termos de eficiência produtiva, economia e preservação ambiental. Sua fonte de recursos é inesgotável e, cada vez mais, as estruturas e equipamentos responsáveis pela funcionalidade dos sistemas têm maior capacidade de produção e durabilidade. Em relação à torre, além de representar uma parcela significativa no custo de um aerogerador tem grande importância como elemento estrutural, sendo que caso entre em colapso, todo o conjunto colapsa, diferentemente de outras partes do aerogerador, que podem ser substituídas ou reparadas em caso de apresentarem falhas. Desse modo, justifica-se a escolha da análise de aerogeradores sob a ação do vento como o tema para a elaboração deste trabalho devido à importância da energia eólica considerando os investimentos mundiais neste sistema de geração de energia e devido à importância do desempenho satisfatório das torres no conjunto de aerogeradores.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho apresenta como objetivo principal a elaboração de uma análise do desempenho estrutural de aerogeradores levando em conta as ações do vento extremo na estrutura, a qual estará por isso em situação de parada de operação com as pás embandeiradas e freios aplicados, por meio da utilização de dois métodos de análise: análise dinâmica no domínio do tempo e análise dinâmica no domínio da frequência. Com a utilização de uma ferramenta desenvolvida para geração de campos aleatórios de vento correlacionados, os quais serão aplicados na estrutura do aerogerador, serão simuladas diferentes situações de ação de vento e avaliados seus efeitos estruturais nas partes que compõem o aerogerador assim como das reações da base (fundações) do mesmo. Dessa forma, como resultado deste trabalho, busca-se ter uma ferramenta útil para pré-projeto, focando na utilização da geração de campos de vento correlacionado para gerar as forças do vento aplicadas à estrutura ao invés de simplesmente se ter forças pontuais distribuídas não correlacionadas para representar o vento. Com isso, pretende-se então avaliar condições da estrutura sem considerar efeitos não lineares, como desprendimento de vórtices, e efeitos de segunda ordem.

1.3 METODOLOGIA

Este trabalho trata da análise estrutural de torres de aerogeradores com o objetivo de simular e avaliar efeitos estruturais sob diversas condições de operação e/ou carregamentos. Duas metodologias para a análise de estruturas sujeitas a carregamentos estocásticos serão investigadas (análise no domínio do tempo e da frequência) buscando destacar vantagens e desvantagens do uso de uma ou de outra metodologia em termos computacionais referente à acurácia e ao tempo de processamento. Inicialmente, são feitos testes em sistemas com poucos graus de liberdade para confirmar e validar a implementação das metodologias. Posteriormente, um exemplo de uma torre de aerogerador é analisado frente à acurácia e ao tempo de processamento. Especial atenção é dada à forma de geração da ação do vento, levando em conta a correlação espacial existente.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este item serve para sintetizar o método de pesquisa proposto com as etapas de como o trabalho está organizado. Assim, o trabalho está dividido conforme discriminado a seguir.

Primeiramente, é apresentada a **introdução** sobre o tema abordado, com justificativa para sua escolha, os objetivos da dissertação, a metodologia a ser implementada para alcançá-los e a forma como o trabalho está organizado. Após isso, está a **revisão bibliográfica** referente ao tema, com informações sobre: a energia eólica no Brasil e no Mundo; geradores eólicos, com informações sobre características, funcionamento e tipos de aerogeradores; e análise de torres de aerogeradores, com dados sobre trabalhos já realizados sobre o assunto.

Na sequência, apresentam-se informações sobre como é feita a modelagem de estruturas como a que está em estudo na etapa chamada **modelamento estrutural**. Para o modelamento da estrutura de torres de aerogeradores do trabalho é utilizado o software *MATLAB* e a estrutura implementada com elementos de viga 3D. Assim, nesta etapa são apresentadas informações sobre a equação de equilíbrio dinâmico, o tipo de elemento utilizado, as matrizes de rigidez, massa e amortecimento, informações sobre análise modal e sobre a ortogonalidade dos modos de vibração.

A seguir, mostra-se a teoria para a realização da **análise dinâmica** deste tipo de estrutura, tanto no domínio do tempo, com o método de Newmark, quanto no domínio da frequência. A quinta etapa do trabalho é chamada **modelamento da ação do vento**, a qual irá trazer conceitos sobre o próprio vento, sobre a formulação matemática para simulação dele no programa a ser utilizado, sobre a geração de campos estocásticos correlacionados para o vento, bem como testes do programa, simulando a geração do vento correlacionado em uma linha vertical e em um plano. Além disso, são apresentadas ainda informações em relação à aplicação da ação do vento nas estruturas em estudo.

A sexta etapa do trabalho, chamada **validação dos algoritmos de simulação estrutural no domínio do tempo e da frequência**, traz a análise de um sistema estrutural simples, de três graus de liberdade, com o intuito de verificar o funcionamento e precisão dos algoritmos utilizados. São apresentados dados de entrada e saída dos testes feitos, com análise e comparação dos resultados de deslocamentos nos domínios do tempo e da frequência.

Na sétima etapa será feita a **simulação da ação do vento sobre a torre de aerogerador**, a oitava etapa será para apresentação dos **resultados** obtidos, a nona para **discussão dos resultados** e a décima etapa para apresentar as **conclusões** do trabalho. Por fim, são listadas as **referências** e após elas um **apêndice**.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Atualmente, o Brasil possui no total 7.409 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, totalizando 163.468.911 kW ou 163.469 MW de potência instalada no país. Destes, 599 empreendimentos são centrais geradoras eólicas com 14.737.793 kW, aproximadamente 14.738 MW, de potência fiscalizada, representando 9,02% de toda a potência em operação do país (ANEEL, 2019).

Segundo a ANEEL (2019), para os próximos anos está prevista a adição de mais de 20.122 MW na capacidade geradora de energia elétrica do país a partir de 160 novos empreendimentos que se encontram em construção e mais 427 que ainda não tiveram a construção iniciada. Um dado que mostra o crescimento da energia eólica é que 14,6% dos empreendimentos em construção e 34,15% dos que não tiveram a construção iniciada ainda são para utilização deste tipo de geração de energia. No total, são 65 empreendimentos que gerarão mais cerca de 1.186 MW de energia eólica em construção e mais 151 que ainda não iniciaram a construção e que deverão adicionar mais 4.097 MW de energia elétrica gerada com o vento. Percebe-se a tendência de crescimento do uso da energia eólica no país, pois a potência a ser instalada com geração eólica é maior em comparação com outros tipos de fontes energéticas, ficando atrás apenas de usinas termo elétricas. Considerando-se a conclusão de todos os empreendimentos previstos, serão 183.591.083 kW (183.591 MW) de energia elétrica produzida no país, sendo 20.021.223 kW (20.021 MW) provenientes da geração eólica, representando quase 11% de toda energia gerada, um aumento de 2 % em relação ao cenário atual, ou mais de 5.000.000 kW (5.000 MW) de geração eólica adicionados. Na Figura 2.1 a seguir, é possível visualizar o crescimento da capacidade total já instalada dos anos de 2005 a 2017.

A energia eólica tem gerado não apenas eletricidade, mas o seu crescimento causa o aumento do número de trabalhadores na área. Em 2015 o número de pessoas empregadas na indústria eólica era de 41.000, em 2016 saltou para 160.000 e em 2017 190.000. Nestes anos, como pôde ser visto também no gráfico da Figura 2.1, a capacidade total instalada vem crescendo continuamente. Com isso, o número de turbinas e usinas eólicas também vem aumentando, em 2015 eram 4.360 turbinas em 349 usinas, em 2016 eram 6.000 turbinas em 430 usinas, em 2017 o total de 6.491 turbinas em 508 usinas e, atualmente, sabe-se que há 599 usinas de geração

eólica como dito anteriormente (GWEC, 2016, 2017, 2018; ABEEOLICA, 2017).

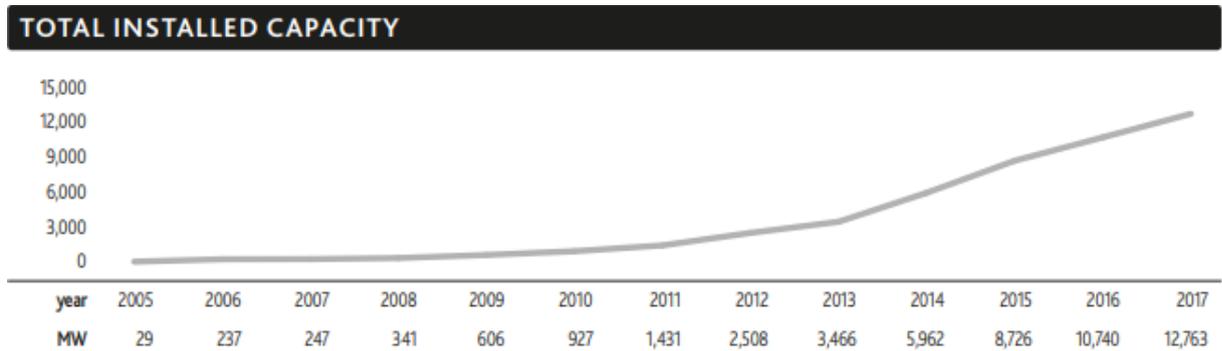


Figura 2.1 - Capacidade total de geração de energia eólica instalada no Brasil (GWEC, 2018).

O plano de desenvolvimento de 10 anos do governo prevê o Brasil atingindo uma capacidade de produção eólica de 28.5 GW em 2026, já havendo mais de 5 GW em projetos a serem executados até 2023, conforme a Figura 2.2 (GWEC, 2018). A seguir, a Tabela 2.1 mostra a previsão da quantidade a ser acrescida à capacidade instalada nos anos de 2018 a 2023, e a Figura 2.2 mostra a evolução da capacidade total instalada entre 2005 e 2017 e previsão até 2023. Ambas foram criadas com informações do ano de 2017.

Tabela 2.1 - Projetos e capacidade de geração eólica a ser acrescida entre 2018 e 2023 (GWEC, 2018).

Estimativas de Projetos e Capacidades de Geração		
Ano	Total de Projetos	Capacidade Total (MW)
2018	84	1800,35
2019	56	1291,10
2020	30	522,30
2021	2	64,00
2023	51	1434,93
Total	223	5112,95



Figura 2.2 – Evolução da capacidade instalada da fonte eólica (ABEEÓLICA, 2017).

De acordo com a Figura acima, pode-se dizer que a estimativa de crescimento para o ano de 2018 se confirmou. Entre 2017 e o momento atual, meados de 2019, a quantidade de empreendimentos passou de 508 para 599 (81 a mais) e a capacidade instalada total aumentou de 12.763 MW para 14.737 MW (1.974 MW a mais).

2.2 A ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

Em termos globais, os principais países na indústria eólica são a China, os Estados Unidos e a Alemanha. O Brasil, também figura entre os 10 principais países da lista de capacidade total acumulada e capacidade nova instalada em 2017, segundo dados da Figura 2.3 (GWEC, 2018).

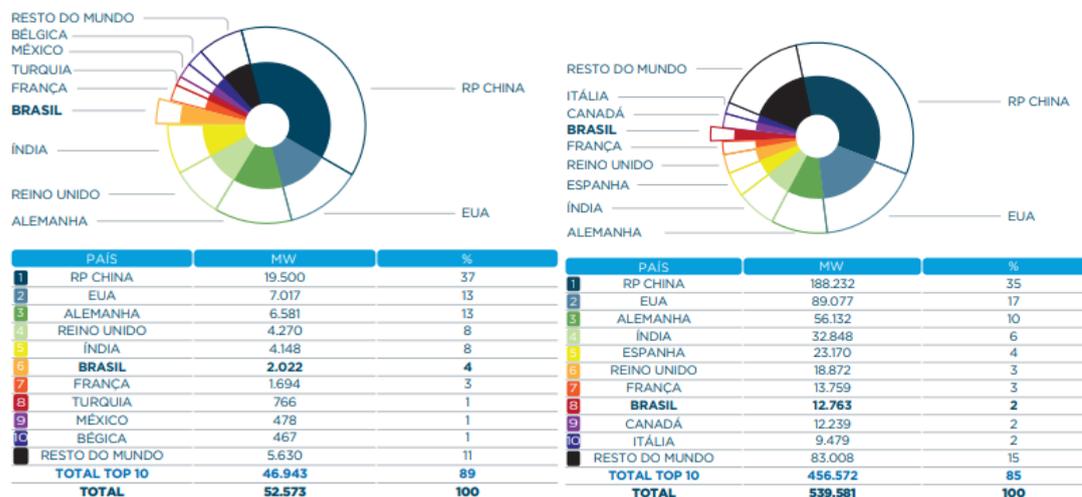


Figura 2.3 – Capacidade nova instalada em 2017 e capacidade total acumulada até dez. 2017 (GWEC, 2018; ABEEÓLICA, 2017).

Conforme visto, a China é a principal potência em termos de geração de energia eólica atualmente, com cerca de um terço de toda a produção mundial e mantendo o mesmo nível de crescimento. Conforme dados do GWEC (2018), dividindo-se os dados de capacidade de produção instalada mundial de 2017 em regiões tem-se o seguinte: a África e Oriente médio aumentaram 618 MW em sua capacidade total que passou a ser de 4.528 MW; a Ásia aumentou 24.412 MW (19.660 MW na China), passando a ter o total acumulado de 228.684 MW de capacidade instalada (sendo 188.392 MW a capacidade chinesa); a Europa aumentou 16.803 MW, passando para 177.506 MW no total (com Alemanha, Espanha e Reino Unido responsáveis por mais da metade dessa capacidade total); na América Latina o crescimento foi de 2.578 MW, totalizando 17.891 MW de capacidade instalada total (com 12.763 MW brasileiros); a América do Norte aumentou 7.836 MW, passando para o total de 105.321 MW

(mais de 89.000 MW dos EUA); e a região do Pacífico teve crescimento de 244.9 MW, totalizando 5.193 MW de capacidade instalada. No total, a geração eólica mundial cresceu 52.492 MW em 2017, chegando a uma capacidade total instalada de 539.123 MW. A Figura 2.4 traz a capacidade instalada por ano e total acumulada de 2001 a 2017.

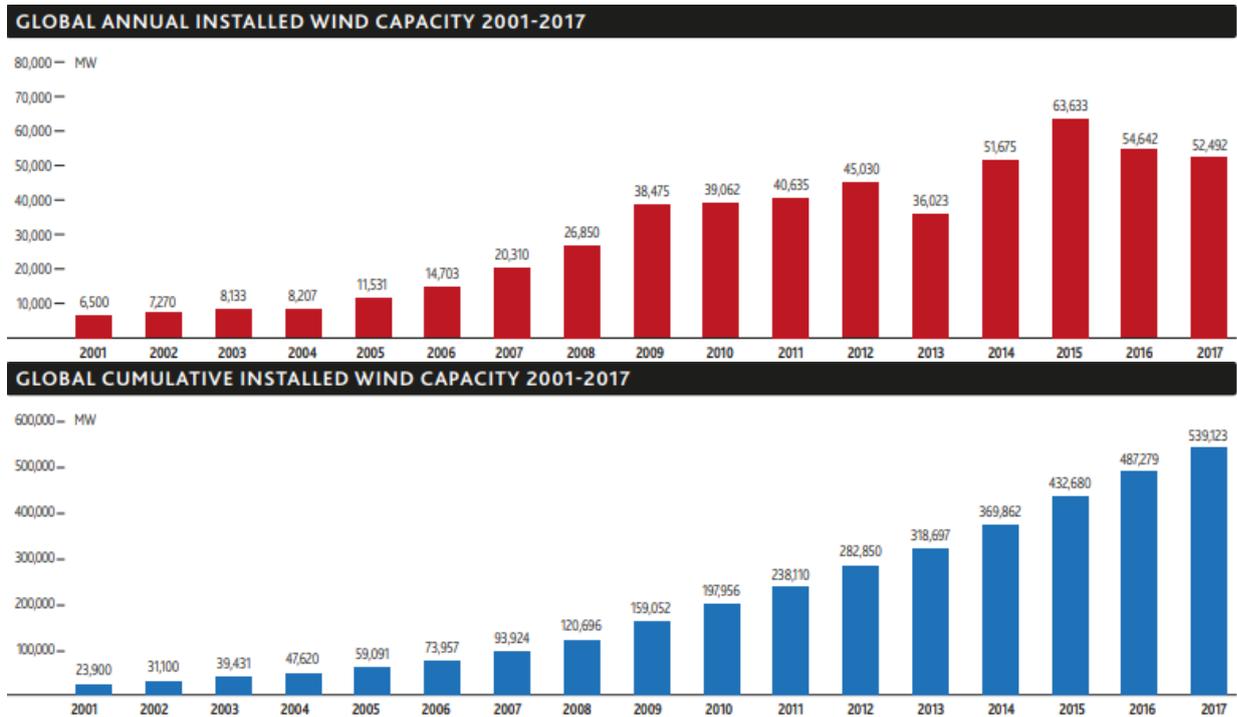


Figura 2.4 – Capacidade nova instalada (vermelho) e capacidade total acumulada por ano (azul), de 2001 a 2017 (GWEC, 2018)

Conforme visto, a capacidade mundial vem crescendo ano após ano e isso é graças aos investimentos que tem se mantido com o passar do tempo. Dentre as fontes renováveis de geração de energia, a eólica é a que vem tendo os maiores investimentos, refletindo seu grande potencial. A Figura 2.5 a seguir, traz dados de investimentos realizados de 2010 a 2017 em milhões de dólares e o percentual investido em energia eólica em relação ao total investido em fontes renováveis.

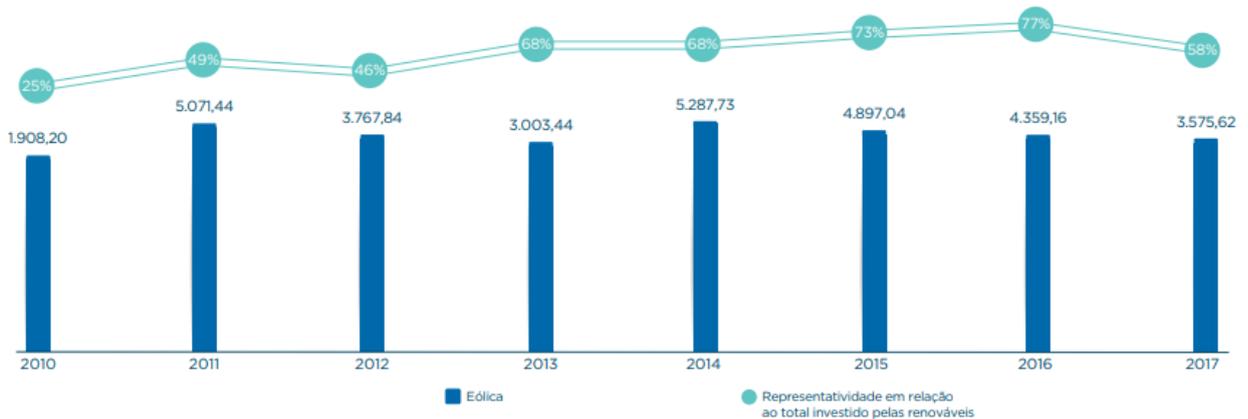


Figura 2.5 – Investimentos na energia eólica em milhões de dólares e percentual sobre o total das fontes renováveis por ano (ABEEÓLICA, 2017).

Conforme dados da Figura 2.5, o total investido no setor eólico no período entre 2010 e 2017 é de aproximadamente 32 bilhões de dólares. O nível de investimentos deve se manter, considerando que a previsão é que a capacidade total instalada no mundo suba de 539,1 GW em 2017 para 840,9 GW em 2022 (GWEC, 2018). A previsão de capacidade de produção da indústria eólica mundial para os anos de 2017 a 2020 é exibida na Figura 2.6.

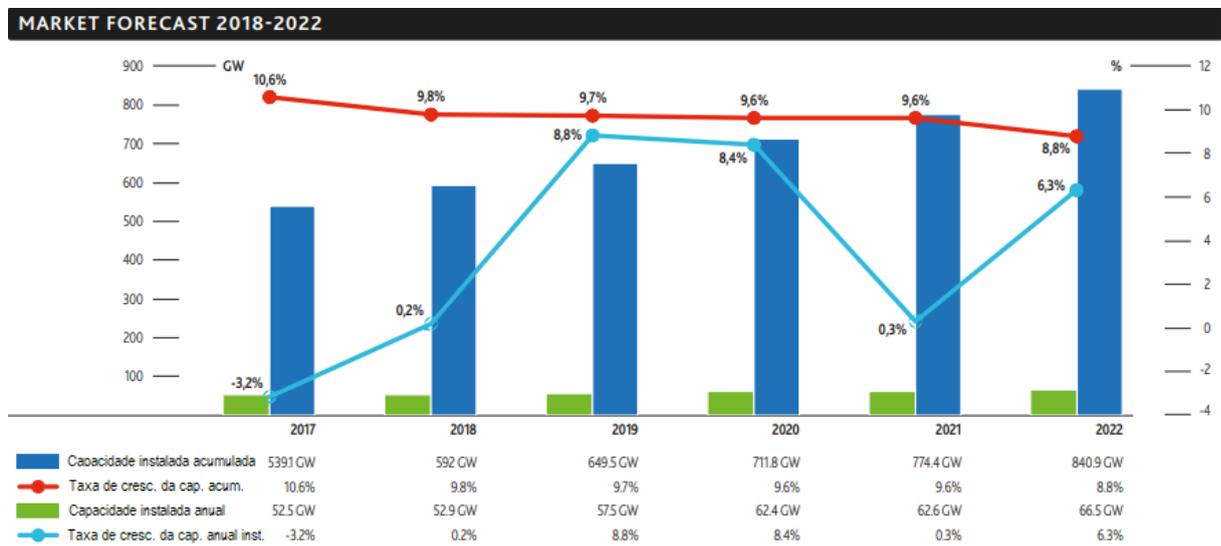


Figura 2.6 – Previsão de capacidade de produção eólica mundial de 2017 a 2022 (GWEC, 2018).

2.3 CONTRIBUIÇÃO SOCIOAMBIENTAL DA ENERGIA EÓLICA

De acordo com ABEEÓLICA (2017), a energia eólica tem baixo impacto para ser implantada e não emite CO₂ em sua operação, podendo substituir outras fontes emissoras. Com isso, no

Brasil só em 2017, evitou-se a emissão de 20,97 milhões de toneladas de CO₂, que equivale à emissão anual de 16 milhões de automóveis, número maior que duas vezes a frota de carros de passeio da cidade de São Paulo.

Além disso, há outras contribuições da fonte eólica como:

- Ser renovável, apresentar baixo impacto ambiental e contribuir para que o Brasil cumpra seus objetivos no Acordo do Clima;
- Gerar renda e melhoria de vida para proprietários de terra com arrendamento para colocação das torres, estimando-se que em 2017 mais de 4.000 famílias recebiam ao todo mais de R\$ 10 milhões mensais pelo arrendamento de terra, os quais sofrem tributação e também contribuem para o poder público;
- Permitir que continue havendo plantação ou criação de animais na terra onde são instaladas as torres, gerando empregos, pagamento de arrendamentos a proprietários de terra e possibilidade de coexistência de atividades de agricultura e pecuária com as eólicas;
- Possuir um dos melhores custo-benefício na tarifa de energia apresentando, por exemplo, os melhores preços nos leilões realizados em dezembro de 2017;
- Promover a capacitação de mão de obra local para produção e instalações.

2.4 GERADORES EÓLICOS

Geradores eólicos, aerogeradores ou turbinas eólicas são equipamentos que transformam a energia cinética do vento em energia elétrica e, como geradores de eletricidade, são conectados a algum tipo de rede elétrica (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Podem ser classificados em dois tipos, de acordo com a orientação do eixo de rotação, como aerogeradores de eixo horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) ou aerogeradores de eixo vertical (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*), sendo os mais utilizados para geração em grande escala os de eixo horizontal (PINTO, 2014). Além disso, aspectos que podem diferenciar tipos de aerogeradores são a localização, podendo ser *onshore* (localizados dentro do continente) ou *offshore* (localizados fora do continente) e o número de pás. A Figura 2.7 apresenta turbinas *onshore* e *offshore*.



Figura 2.7 – Turbinas eólicas *onshore* e *offshore* (GWEC, 2016).

2.4.1 Turbinas de Eixo Vertical (VAWT)

Os aerogeradores de eixo vertical têm como principal vantagem não precisarem de ajuste quanto à direção do vento, não requerendo um sistema para isso, e ter o pesado maquinário para geração de energia no solo. Porém, como desvantagens, a potência captada pelas pás acaba sendo menor também por ficarem próximas ao solo onde o vento tem menor velocidade, causando uma menor eficiência energética, além de, em caso de necessidade de troca do rolamento principal, toda a turbina precisar ser desmontada (GUIDELINES..., 2002).

Por conta de suas desvantagens, turbinas de eixo vertical praticamente sumiram do mercado, porém recentemente houve um ressurgimento, ainda que sem grande impacto, de sistemas inovativos de turbinas verticais com diversas aplicações como sistemas pequenos para uso em telhados de prédios e também designs inovativos em grande escala para uso *offshore* (EWEA, 2009).

Há diversos tipos de turbinas eólicas de eixo vertical. Alguns modelos são o Rotor de Darrieus, Rotor H, Rotor de Savonius, modelo híbrido Savonius-Darrieus, Modelo Helicoidal e Turbinas Turby (PINTO, 2014). A Figura 2.8 ilustra alguns dos modelos citados.

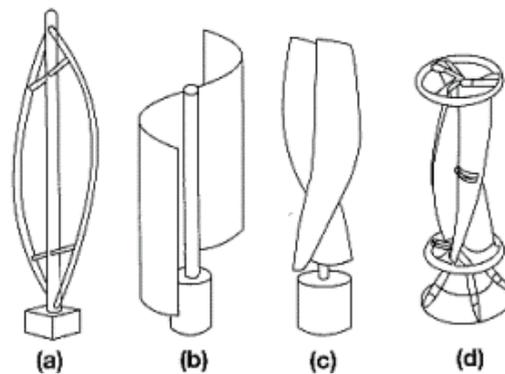


Figura 2.8 – Modelos de geradores eólicos de eixo vertical a) Darrieus; b) Savonius; c) Solarwind; d) Helicoidal (PINTO, 2014).

2.4.2 Turbinas de Eixo Horizontal (HAWT)

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais comumente utilizados, possuem o eixo de rotação posicionado paralelamente à direção do vento, com as pás operando perpendicularmente a ele e, para tanto, em geral são dotados de um sistema de orientação com a direção do vento (GUIDELINES..., 2002). Seus principais componentes são: o rotor, formado pelas pás e pelo cubo que as suporta; a transmissão, que possui as partes giratórias da turbina (inclui eixo, caixa de velocidades, elementos de acoplamento, freio mecânico e o gerador); a nacelle, que abriga elementos da turbina e o sistema de orientação; a torre e a fundação; uma instalação ou cabine de controle do sistema; e o sistema de transformação de energia, incluindo por exemplo cabos, transformadores e conversores eletrônicos de potência (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

A Figura 2.9 esquematiza o sistema básico de funcionamento de um aerogerador, da captação da energia do vento até a transmissão da energia à rede elétrica, e a Figura 2.10 ilustra um gerador eólico de eixo horizontal com seus principais componentes.

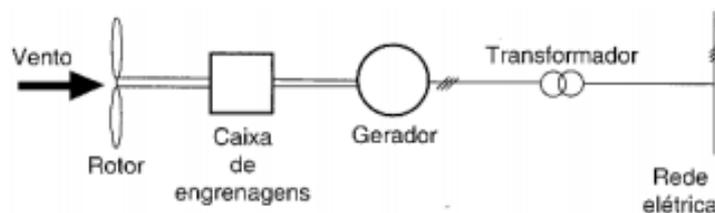


Figura 2.9 – Sistema básico de uma turbina com caixa de engrenagens e seu gerador ligado à rede elétrica (PINTO, 2014).

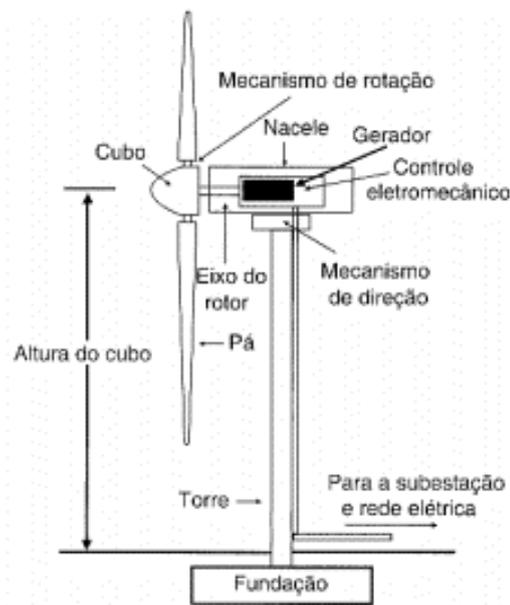


Figura 2.10 – Aerogerador de eixo horizontal e seus principais componentes (PINTO, 2014).

Além de ter a caixa de engrenagens e o gerador dentro da nacela, que é a configuração padrão, há diferentes configurações possíveis quanto ao posicionamento de componentes dos aerogeradores como ter a caixa de engrenagens e o gerador na base da torre, ter o gerador no topo da torre abaixo da nacela ou na base da torre, ter o gerador na base e duas caixas de engrenagens separadas ou, ainda, ter o gerador acionado pelo rotor sem a caixa de engrenagens (PINTO, 2014).

De acordo com Manwell, McGowan e Rogers (2009), os aerogeradores possuem uma curva característica que representa a previsão de sua performance em termos de produção energética, tendo como base informações sobre o tamanho do rotor e a velocidade do vento. Nessa curva, encontram-se três informações principais: *Cut-in speed*, que é a velocidade mínima do vento para que haja produção energética útil; *Rated wind speed*, que é a velocidade do vento para qual o gerador atinge sua capacidade máxima de produção; e *Cut-out speed*, que é a velocidade máxima do vento com a qual o aerogerador pode trabalhar, normalmente limitada por questões de design e segurança da estrutura. Um exemplo de curva de potência de turbina eólica é apresentado na Figura 2.11.

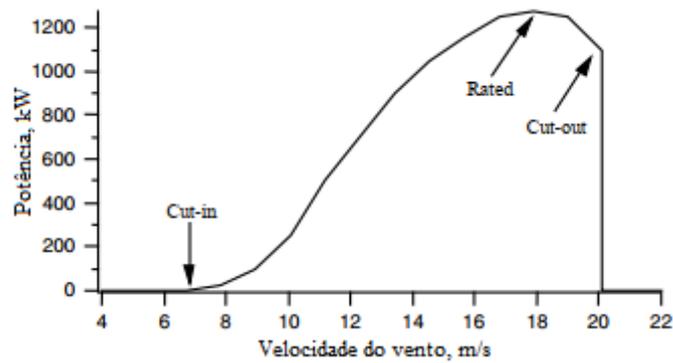


Figura 2.11 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

As turbinas horizontais também são classificadas de acordo com a orientação do rotor como *upwind*, que captam o vento de frente da área da turbina, ou *downwind*, que captam o vento pela parte de trás da área da turbina, ou sotavento. As turbinas *downwind* tem a vantagem de não necessitarem de um sistema de orientação, sendo projetadas de modo que o rotor e a nacelle sigam a direção do vento de forma passiva, podem ter pás mais flexíveis, porém possuem a desvantagem de ter a própria torre como um obstáculo ao vento. Toda vez que a pá passa atrás da torre encontra vento reduzido devido a isso, causando flexão da pá que leva a problemas de fadiga, além de reduzir o potencial de geração e aumentar ruídos. Já as turbinas *upwind* precisam do sistema de orientação para manter as pás de frente para o vento, necessitam de pás rígidas, porém não apresentam as desvantagens das turbinas *downwind* e fornecem maior potência. A maioria das turbinas possui rotor do tipo *upwind* (GUIDELINES..., 2002; PINTO, 2014). A Figura 2.12 ilustra turbinas com rotores *upwind* e *downwind*.

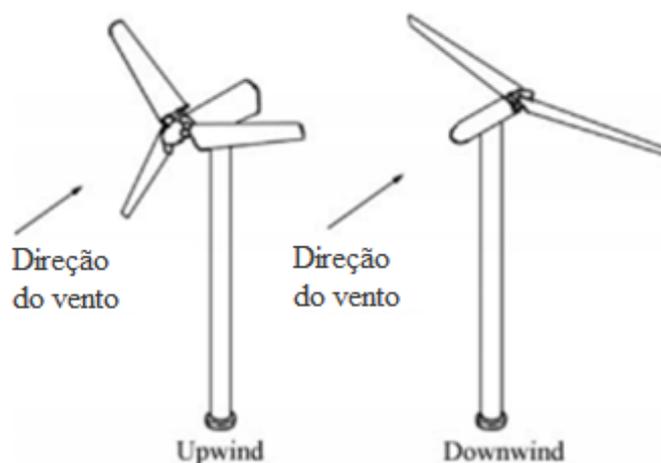


Figura 2.12 – Turbinas eólicas horizontais com rotores *upwind* e *downwind* (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Em relação ao número de pás, atualmente turbinas horizontais com rotores de três pás são as mais utilizadas. Rotores com uma ou duas pás teriam a vantagem de uma possível economia e de possuírem menor peso do rotor. Contudo, com menor número de pás, uma maior velocidade de rotação ou uma maior área de varredura é necessária para se ter a mesma produção de energia de uma turbina com três pás de tamanho similar. Além disso, o menor número de pás não necessariamente implica em economia, visto que, as pás de um rotor de três, duas ou uma pá são diferentes e, portanto, possuem custos e pesos diferentes. Desse modo, rotores de três pás têm maior utilização por apresentarem menor produção de ruído e um impacto visual mais positivo, devido a trabalharem com uma velocidade de rotação menor. Destaca-se também, que ter um número de pás maior, do que três inclusive, não significa ter maior eficiência do rotor, além de que, quanto maior a quantidade de pás, mais delgadas elas precisam ser. E ainda, comparando-se os rotores de uma e duas pás, os de uma pá são os menos utilizados por, além de apresentarem maior velocidade de rotação, ruído e desconforto visual, necessitarem de um contra peso para balancear com a pá (EWEA, 2009; GUIDELINES..., 2002). A seguir, a Figura 2.13 mostra turbinas com uma, duas e três pás.



Figura 2.13 – HAWT de 1, 2 e 3 pás (OLIVEIRA, 2012; GWEC, 2018).

Quanto ao desenvolvimento dos aerogeradores horizontais, o crescimento do diâmetro dos rotores com o passar do tempo, como mostrado na Figura 2.14, é uma forma simples e efetiva de representar a evolução tecnológica que esse tipo de geração de energia tem apresentado. Algumas áreas que, com seu desenvolvimento, contribuem para essa evolução são as ciências dos materiais e da computação, aerodinâmica, design analítico e métodos de análise, teste e monitoramento e tecnologias de potência eletrônica (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

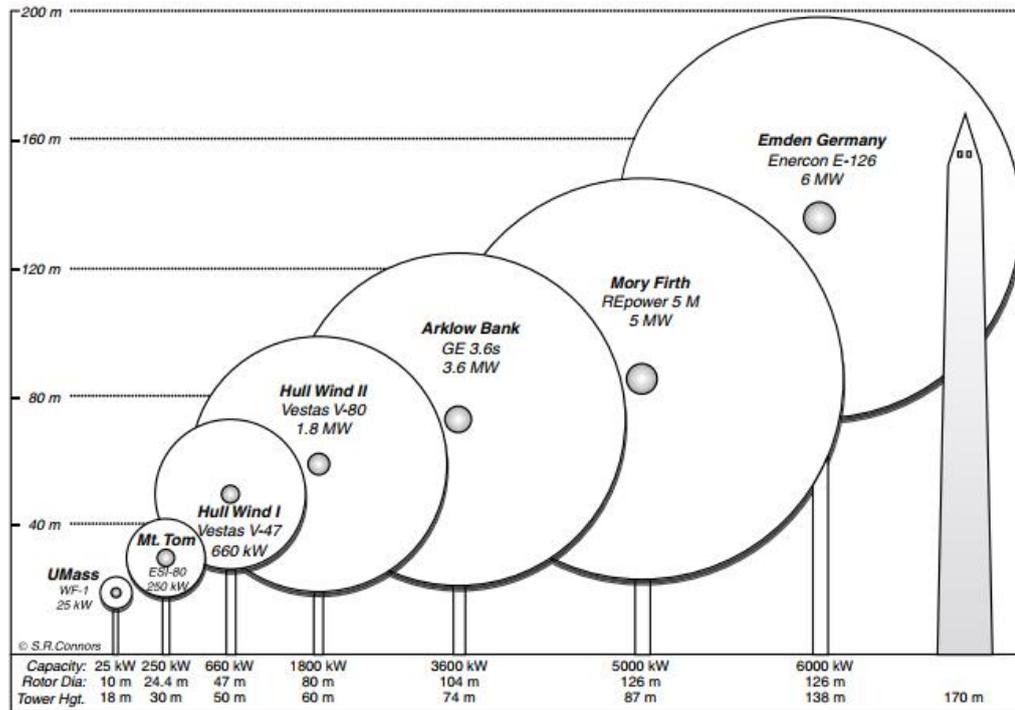


Figura 2.14 – Tamanhos de turbinas de eixo horizontal (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

Turbinas de eixo horizontal necessitam de uma fundação e uma torre, a qual suporta a nacela e o rotor, possibilitando que estes fiquem com a elevação necessária, longe de obstáculos do relevo e onde o vento é mais abundante. A utilização de diferentes tipos de torres é possível como torres tubulares de aço, de concreto ou torres treliçadas. A escolha ocorre por questões de desempenho e economia. Exceto para tamanhos menores, as torres de concreto acabam não sendo uma alternativa econômica, além de terem execução mais onerosa. As treliçadas também, normalmente ocorrem para alturas menores. Desse modo, atualmente a configuração utilizada, quase que exclusivamente, é de aerogeradores com fundação de concreto reforçado e torres tubulares cônicas de aço, feitas em segmentos de 20 a 30 metros e com diâmetro adequado a questões logísticas, que são transportadas e montadas no local de instalação. Com isso, torna-se praticável e viável a existência de torres de 60, 80 ou 100 metros de altura, como se tem visto (GUIDELINES..., 2002; SPERA, 2009). Tipos de torres são mostrados na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Aerogeradores com torre tubular de aço, tubular de concreto e treliçada (GUIDELINES..., 2002).

2.5 ANÁLISE ESTRUTURAL DE TORRES DE AEROGERADORES

No trabalho de Ferreira e Futai (2016) a análise numérica 3D com Abaqus de uma torre de gerador eólico é feita, levando-se em consideração a rigidez da base da fundação (semiespaço tridimensional), situação que, segundo os autores, deve ser levada em consideração devido ao aumento cada vez maior da altura das torres atuais. No seu trabalho, concluem que existe uma relação entre a deformabilidade do solo e a 1ª. frequência fundamental do aerogerador de forma que para solos mais deformáveis, esta frequência diminui assim como aumenta o recalque devido ao peso próprio. Situação inversa foi observada para o caso de solos menos deformáveis.

O modelamento de um aerogerador com turbina horizontal no domínio da frequência foi descrito por Sørensen (1994) implementado juntamente com um modelo análogo no domínio do tempo. A estrutura apresenta não linearidades entre variáveis estruturais nas pás e na torre, devido à rotação das pás, fazendo com que as transformações entre o sistema de coordenadas das pás e da torre dependam de posições instantâneas das pás. Métodos convencionais no domínio da frequência não permitem não linearidades, porém no trabalho, assumindo velocidade angular do rotor da turbina de vento constante, as variáveis estruturais são decompostas em somas de harmônicos na frequência angular do rotor, sendo as relações não lineares transformadas em lineares nas amplitudes dos harmônicos e transformadas e resolvidas no domínio da frequência. Os carregamentos foram determinados com a amplitude de harmônicos que possuem. Então, o autor usou o código *Design Basis 2* para verificar o modelo do domínio da frequência, comparando-o com carregamentos calculados com o modelo do domínio do tempo e com carregamentos medidos. Com o código utilizado, o autor percebe que com o modelo no domínio da frequência a obtenção de resultados é notoriamente rápida e fácil,

sendo calculado, segundo ele, 200 vezes mais rápido do que o código no domínio do tempo.

Em seu trabalho, Dellezzopolles Junior (2011) estuda o comportamento dinâmico de torres de aerogeradores utilizando a teoria de Euler-Bernoulli com acoplamento torre-aerogerador. A torre é modelada como uma viga engastada na base sujeita a carregamentos dinâmicos, com seção circular e momento de inércia constante, a qual possui uma massa conectada em sua extremidade superior que representa as pás da turbina, o rotor e a nacela. Baseado no método variacional de Hamilton, foi deduzida uma equação não-linear para modelar o comportamento da torre, carregamentos periódicos foram aplicados na extremidade dela e com o método de discretização de Galerkin a equação foi transformada em um sistema de equações diferenciais de segunda ordem no domínio do tempo. A equação não-linear formulada para representar o movimento da torre encontrou resultados similares aos encontrados com a formulação linear da torre, tanto para movimento livre, quanto para o caso de carregamentos aplicados na nacela, indicando, segundo o autor, que a formulação linear seja suficiente para descrever os fenômenos relacionados a estas torres. Além disso, o autor verificou que as respostas dinâmicas linear e não-linear apresentam maior diferença quando valores elevados de deslocamentos ocorrem, valores, porém, que não acontecem na realidade.

De acordo com Oh e Ishihara (2013), a modelagem precisa de campo de escoamento turbulento tridimensional é necessária para análise de aerogeradores. Os autores propuseram um modelo modificado de von Kármán para geração de vento *offshore* para auto correlações e auto espectros, bem como para correlações e espectros cruzados. Medições para validação foram realizadas em um mastro meteorológico localizado *offshore*. O modelo proposto de auto correlação e espectros apresenta resultados de acordo com as medições, enquanto o modelo original de von Kármán apresenta resultados menores de auto correlação e picos de frequência menores para componentes laterais e verticais com auto espectros. Modelos de correlação e espectros cruzados ficaram de acordo com os dados das medições. Segundo os autores, as razões de desvios padrões e tensões normalizadas de Reynolds no modelo modificado de von Kármán foram propostos para condições *offshore* e apresentam melhor concordância com as medições do que valores propostos no modelo de Kaimal na norma internacional IEC 61400-1 (2005), que trata de requerimentos para design de aerogeradores.

Oliveira (2012), realizou o estudo e a análise do comportamento dinâmico de uma torre de gerador eólico, buscando encontrar um modelo numérico para representá-la. Um ensaio de vibração ambiental foi realizado em uma torre estudada, sendo observada a importância da

disposição adequada dos sensores ao longo da estrutura e a consideração correta dos graus de liberdade correspondentes aos locais dos sensores. Um programa de elementos finitos foi utilizado para modelamento da estrutura com elementos de casca e barras. Além disso, percebeu-se a dependência dos resultados de acordo com as condições de apoio utilizadas. O método de seleção de picos (peak picking), usado na determinação de frequências naturais da estrutura, foi explicado e utilizado na modelagem numérica. Foi observado que, a partir do terceiro modo de vibração, torna-se difícil a seleção dos picos do sinal obtido para determinação das frequências da estrutura. O uso de funções de transferência para determinação de configurações modais da estrutura também foi explicado e foram representadas as configurações modais experimentais possíveis de serem encontradas com a automatização destas funções. Os modelos numéricos foram validados, comparando-se as configurações modais obtidas com as funções e com os modelos de elementos finitos, assim como comparando-se as frequências obtidas. Verificou-se que a melhor representação da estrutura real é obtida com o modelo de casca, apresentando valores muito próximos aos do ensaio dinâmico.

Ma, Martinez-Vazquez e Baniotopoulos (2018) desenvolveram uma revisão histórica sobre casos de colapso de torres de aerogeradores. Sua investigação indicou que normalmente cargas acidentais causadas por ciclones e tempestades são as causas mais comuns para falhas e que incidentes fatais ocorrem nas idades iniciais ou finais da vida de serviço dos sistemas. Segundo o estudo, o mecanismo de falha mais comum, com 55% dos casos, é o carregamento extremo de vento, na maioria das vezes coincidindo com falha humana. Com isso, os autores apontam a escolha correta do local de implementação de parques eólicos para evitar carregamentos extremos inesperados como um fator vital para evitar problemas. Além disso, definem o controle de qualidade, uso de mão de obra qualificada e de técnicas de construção e operação melhores como fatores secundários de prevenção. Destacam também que, devido aos sistemas operarem de forma cíclica por longo período de tempo (20 a 30 anos), efeitos de fadiga são potenciais causas de colapso e devem receber atenção. Por fim, citam que as normas atuais são confiáveis, cabendo ajustes devido aos diversos fatores que causam colapsos, que efeitos aeroelásticos deveriam ser aprofundados por cientistas e projetistas, e que construtores e projetistas poderiam melhorar materiais e procedimentos utilizados, visto que estes são causas de falhas discutidas no trabalho.

Morfiadakis, Glinou e Koulouvari (1996) estabeleceram um procedimento para aplicação da formulação de von Kármán para os espectros medidos das três componentes de velocidade e

para a determinação das escalas de comprimento de turbulência correspondentes. Os parâmetros de turbulência e força espectral são influenciados por efeitos topográficos e por efeitos de esteira (originados pelo posicionamento dos aerogeradores). Os autores verificaram que o espectro de von Kármán é adequado para turbulência medida em locais com condições de escoamento livre, mas que efeitos topográficos intensos, como separação de escoamentos ou efeitos de esteira não são bem representados com esta formulação. Além disso, concluíram que para condições de efeito de esteira com separação pequena entre turbinas, comprimentos de turbulência são maiores do que aqueles obtidos para escoamento livre; enquanto que, para efeitos de esteira com separação grande entre turbinas, os efeitos topográficos é que tem uma influência maior nos espectros e nos valores de comprimentos de turbulência.

Li et al. (2019) propuseram um procedimento para decomposição de Cholesky mais eficiente para simulação de campos de velocidade de vento aleatórios de larga escala. Desenvolveu-se uma ferramenta para uso no crescente número de pontes longas em construção em locais onde as características do vento são complexas e não homogêneas, uma vez que a simulação de campos de velocidade de vento aleatórios em tais estruturas com o método de representação espectral requer um significativo esforço computacional devido ao problema de consumo de tempo associado com a decomposição de Cholesky das matrizes de densidade espectral de potência. Para melhorar a eficiência da decomposição, foi proposta uma nova formulação da decomposição de Cholesky chamada *Band-Limited Cholesky decomposition* (Decomposição de Cholesky com Banda Limitada/reduzida), sendo as matrizes de correlação convertidas em matrizes banda, que requerem menor esforço e armazenamento computacional. Após isso, cada matriz de correlação decomposta é também uma matriz banda e, como os elementos com valor zero não tem nenhuma contribuição para os cálculos, o método é ainda melhorado limitando-se os cálculos aos elementos com valor diferente de zero. Comparado ao método tradicional de decomposição de Cholesky, o novo método de decomposição é cerca de 13 vezes mais rápido para a decomposição das matrizes de correlação envolvidas na simulação de cem processos de velocidade de vento, e todo o processo de simulação é cerca de 2,5 vezes mais rápido do que o método de representação espectral tradicional.

3. MODELAMENTO ESTRUTURAL

Nesta etapa do trabalho são apresentados aspectos referentes à modelagem estrutural para as simulações executadas. Para a determinação da resposta a ações dinâmicas da estrutura, seja ela amortecida ou não, com um grau de liberdade ou mais, pode ser utilizada a equação de equilíbrio dinâmico, Eq. (3.1) mostrada abaixo, a qual baseia-se nas principais características da estrutura: rigidez ($[\mathbf{K}]$), massa ($[\mathbf{M}]$) e amortecimento ($[\mathbf{C}]$).

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (3.1)$$

Essa equação forma um sistema de equações diferenciais de segunda ordem, onde $\{\mathbf{F}(t)\}$ é o vetor de carregamentos aplicados na estrutura nos graus de liberdade correspondentes, $[\mathbf{M}]$ é a matriz de massa da estrutura, $[\mathbf{C}]$ é a matriz de amortecimento e $[\mathbf{K}]$ é a matriz de rigidez. Para resolver tal sistema e obter as respostas podem ser utilizados métodos no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Para o modelamento da estrutura de torres de aerogeradores deste trabalho é utilizado o software *MATLAB* e a estrutura implementada com elementos de viga 3D, por se tratar de uma análise da estrutura global simplificada, onde busca-se observar o comportamento dela frente à aplicação de esforços de vento gerados aplicados, e pela possibilidade de serem modeladas as pás também com o mesmo tipo de elemento. Para o elemento finito de estrutura 3D de dois nós, são considerados seis graus de liberdade por nó, sendo o vetor de deslocamentos em função do tempo (t) no espaço $\{\mathbf{x}(t)\} = \{u, v, w, \theta_u, \theta_v, \theta_w\}^T$ representado por todas as componentes dos graus de liberdade, sendo três deslocamentos (u, v e w) e três rotações ($\theta_u, \theta_v, \theta_w$) em cada nó, em relação aos três eixos cartesianos globais (FERREIRA, 2009). $\{\dot{\mathbf{x}}(t)\}$ é a derivada primeira do vetor de deslocamentos ou vetor de velocidades em função do tempo (t) e $\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\}$ é a derivada segunda do vetor de deslocamentos ou vetor de acelerações em função do tempo (t). A Figura 3.1 mostra um elemento de viga 3D com seus graus de liberdade no sistema local de coordenadas.

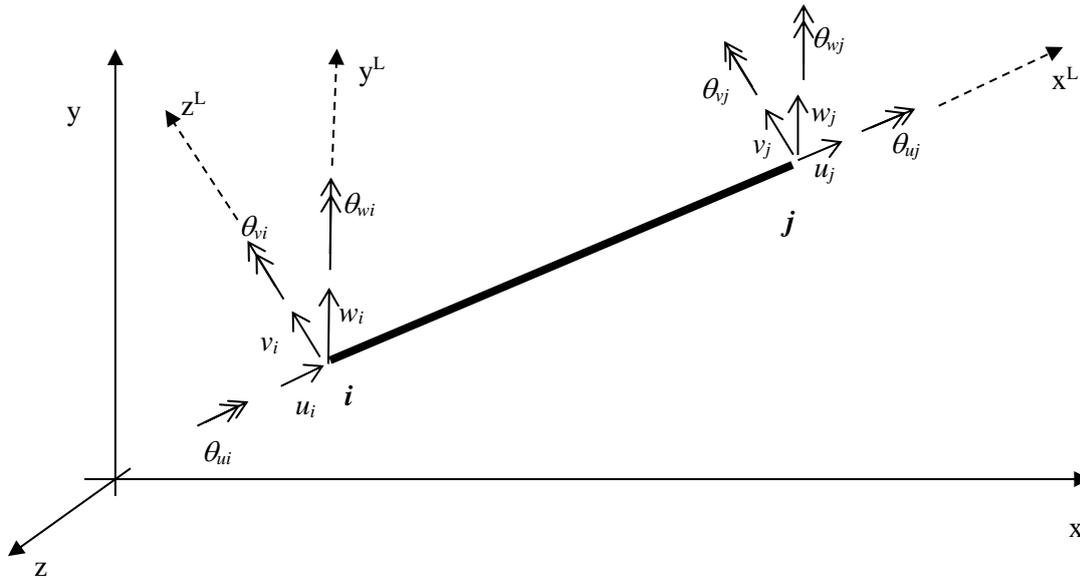


Figura 3.1 – Elemento de viga 3D no sistema local de coordenadas.

3.1 MATRIZ DE RIGIDEZ

Para um elemento de viga, a matriz de rigidez é formulada através da junção das matrizes de relação de rigidez axial (3.2), torcional (3.3) e flexural (3.4). A rigidez à flexão é considerada duas vezes para considerar as duas direções radiais do sistema local de coordenadas. F_{ui} , F_{uj} , F_{vi} e F_{vj} são as forças nos nós do elemento, $M_{\theta_{ui}}$, $M_{\theta_{uj}}$, $M_{\theta_{vi}}$ e $M_{\theta_{vj}}$ são os momentos, u_i , u_j , v_i e v_j são os deslocamentos lineares e θ_{ui} , θ_{uj} , θ_{vi} e θ_{vj} são os deslocamentos angulares nos nós do elemento (PAZ; LEIGH, 2004).

$$\begin{Bmatrix} F_{ui} \\ F_{uj} \end{Bmatrix} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{\theta_{ui}} \\ M_{\theta_{uj}} \end{Bmatrix} = \frac{GJ}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_{ui} \\ \theta_{uj} \end{Bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{vi} \\ M_{\theta_{vi}} \\ F_{vj} \\ M_{\theta_{vj}} \end{Bmatrix} = \frac{EI_z}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ \theta_{vi} \\ v_j \\ \theta_{vj} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Após acopladas na ordem correta dos deslocamentos e rotações, a matriz de rigidez para um elemento de viga 3D é obtida, ficando conforme a Figura 3.2 a seguir. Nela E (N/m²) corresponde ao módulo de elasticidade do elemento, A (m²) é a área da seção do elemento, L

(m) é o comprimento do elemento, I_y e I_z (m^4) são momentos de inércia em relação aos eixos y e z, J (m^4) é o momento de inércia polar ou constante torsional da seção transversal e G (N/m^2) é o módulo de elasticidade transversal.

$$[k^e]^L = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ & & & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ & & & & & \frac{4EI_z}{L} & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ & & & & & & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ & & & & & & & & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ & & & & & & & & & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ & & & & & & & & & & & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix}$$

Sim.

Figura 3.2 – Matriz de rigidez no sistema local de coordenadas (FERREIRA, 2009).

A matriz de rigidez em coordenadas globais é obtida com o uso de uma matriz de rotação $[R]$, conforme equações (3.5), (3.6) e (3.7), exibidas a seguir.

$$[R] = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde,

$$[r] = \begin{bmatrix} C_{Xx} & C_{Yx} & C_{Zx} \\ C_{Xy} & C_{Yy} & C_{Zy} \\ C_{Xz} & C_{Yz} & C_{Zz} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

e,

$$C_{Xx} = \cos \theta_{Xx} \quad (3.7)$$

Os ângulos θ_{Xx} , θ_{Yx} , e θ_{Zx} são medidos dos eixos globais X , Y e Z , em relação ao eixo local x , respectivamente. Assim, a matriz de rigidez global $[k^e]$ do elemento e é expressa na Eq. (3.8):

$$[\mathbf{k}^e] = [\mathbf{R}^e]^T [\mathbf{k}^e]^L [\mathbf{R}^e] \quad (3.8)$$

Uma vez obtidos todas as $[\mathbf{k}^e]$ dos elementos, procede-se à montagem por superposição dos elementos nos graus de liberdade correspondentes da matriz de rigidez global $[\mathbf{K}]$. Com o vetor de forças externas definido $\{\mathbf{F}\}$, e aplicando-se as condições de contorno do problema (graus de liberdade que estejam impedidos), procede-se à solução do sistema de equações indicado na Equação (3.9) para obter os deslocamentos nodais $\{\mathbf{U}\}$.

$$\{\mathbf{F}\} = [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} \quad (3.9)$$

Com os deslocamentos nodais, também é possível calcular as reações ou forças agindo nos apoios de acordo com a Equação (3.10), sendo $\{\mathbf{f}^e\}$ o vetor de reações ou forças a nível de elemento, $[\mathbf{k}^e]$ a matriz de rigidez do elemento, $[\mathbf{R}^e]$ a matriz de rotação e $\{\mathbf{U}^e\}$ o vetor de deslocamentos do elemento e .

$$\{\mathbf{f}^e\} = [\mathbf{k}^e][\mathbf{R}^e]\{\mathbf{U}^e\} \quad (3.10)$$

3.2 MATRIZ DE MASSA CONDENSADA (*LUMPED*)

De acordo com Clough e Penzien (2003), a maneira mais fácil de definir as propriedades de massa de qualquer estrutura é assumir que toda sua massa se concentra nos pontos onde os deslocamentos translacionais são definidos. O procedimento usual consiste em definir a estrutura como sendo dividida em segmentos, os quais são conectados por nós que são os pontos onde são assumidas as aplicações de massa. Ou seja, a massa de cada segmento da estrutura é concentrada em pontos de massa em cada lado do segmento e a distribuição da massa entre os pontos é determinada estaticamente. A massa total concentrada em cada um dos nós da estrutura completa é a soma das contribuições nodais de todos os segmentos conectados por aquele nó.

Para sistemas onde apenas graus de liberdade translacionais são definidos, a matriz de massa *lumped* tem uma forma diagonal, com tantos termos quantos forem os graus de liberdade. Por ser uma matriz diagonal, os termos fora da diagonal principal são iguais a zero. Além disso, a massa associada com qualquer grau de liberdade rotacional será zero devido à hipótese de que a massa é agrupada em pontos que não possuem inércia rotacional. Assim, a matriz de massa *lumped* é uma matriz diagonal que, em geral, incluirá elementos iguais a zero na diagonal principal para graus de liberdade rotacionais (CLOUGH; PENZIEN, 2003). A Figura 3.3,

ilustra esse tipo de matriz de massa $[\mathbf{m}]$, onde $m_1, m_2, m_3, \dots, m_N$, que ficam na diagonal principal, correspondem às massas acumuladas nos graus de liberdade.

$$[\mathbf{m}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_k & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix}$$

Figura 3.3 – Matriz de massa *lumped* (CLOUGH; PENZIEN, 2003).

A fim de evitar eventuais diferenças na resposta da estrutura, optou-se pela matriz de massa consistente neste trabalho por ser uma matriz que contém a contribuição para os graus de liberdade de inércia rotacionais.

3.3 MATRIZ DE MASSA CONSISTENTE

A matriz de massa consistente de um elemento de barra 3D no sistema local de coordenadas pode ser formada, assim como a matriz de rigidez, pela combinação das relações matriciais do elemento para os efeitos axiais (3.11), torcionais (3.12) e de flexão (3.13). F_{ui}, F_{uj}, F_{vi} e F_{vj} são as forças nos nós do elemento, $M_{\theta_{ui}}, M_{\theta_{uj}}, M_{\theta_{vi}}$ e $M_{\theta_{vj}}$ são os momentos, $\ddot{u}_i, \ddot{u}_j, \ddot{v}_i$ e \ddot{v}_j são as acelerações lineares e $\ddot{\theta}_{ui}, \ddot{\theta}_{uj}, \ddot{\theta}_{vi}$ e $\ddot{\theta}_{vj}$ são as acelerações angulares nos nós do elemento (PAZ; LEIGH, 2004).

$$\begin{Bmatrix} F_{ui} \\ F_{uj} \end{Bmatrix} = \frac{\bar{m}L}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_j \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{\theta_{ui}} \\ M_{\theta_{uj}} \end{Bmatrix} = \frac{\bar{m}I_0L}{6A} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_{ui} \\ \ddot{\theta}_{uj} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{Bmatrix} F_{vi} \\ M_{\theta_{vi}} \\ F_{vj} \\ M_{\theta_{vj}} \end{Bmatrix} = \frac{\bar{m}L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v}_i \\ \ddot{\theta}_{vi} \\ \ddot{v}_j \\ \ddot{\theta}_{vj} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

O I_0 das equações acima é o momento polar de inércia da seção transversal e \bar{m} (kg/m) é a

massa distribuída ou massa por unidade de comprimento do elemento que também pode ser obtida por $\bar{m} = \rho A$. Dessa forma, seguindo a mesma ordem usada para obtenção da matriz de rigidez, a matriz de massa consistente para o elemento de viga fica conforme a Figura 3.4, onde ρ (kg/m³) é a densidade do material, A (m²) é a área da seção do elemento, L (m) é o comprimento do elemento e I_y (m⁴) e I_z (m⁴) são os momentos de inércia em relação aos eixos y e z .

$$[m^e]^L = \rho AL \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & \frac{11L}{210} & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & -\frac{11L}{210} & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & \frac{13L}{420} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{I_y + I_z}{3A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_y + I_z}{6A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 & 0 & 0 & -\frac{13L}{420} & 0 & -\frac{L^2}{140} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 & \frac{13L}{420} & 0 & 0 & 0 & -\frac{L^2}{140} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & 0 & -\frac{11L}{210} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & \frac{11L}{210} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_y + I_z}{3A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L^2}{105} \end{bmatrix}$$

Figura 3.4 – Matriz de massa consistente (PAZ; LEIGH, 2004).

Assim, a matriz de massa global $[m^e]$ do elemento e é expressa na equação (3.14):

$$[m^e] = [R^e]^T [m^e]^L [R^e] \quad (3.14)$$

Uma vez obtidas todas as $[m^e]$ dos elementos, procede-se à montagem da matriz de massa global $[M]$ por superposição dos elementos nos graus de liberdade correspondentes.

3.4 ANÁLISE MODAL

Através da formulação modal é possível transformar um sistema de n equações diferenciais do movimento em um conjunto de n equações diferenciais independentes. Isso é feito expressando o vetor dos deslocamentos através da combinação linear de n vetores independentes, chamados

modos de vibração (MAGALHÃES, 2004).

A partir da equação de movimento de sistemas com n graus de liberdade não amortecidos, conforme equação (3.15), sabe-se que a solução é da forma mostrada na equação (3.16) e então o vetor aceleração fica de acordo com a equação (3.17).

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{x}\} + [\mathbf{K}]\{x\} = \{0\} \quad (3.15)$$

$$\{x\} = \{\varphi_n\} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) = \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{Bmatrix} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) \quad (3.16)$$

$$\{\dot{x}\} = -\omega_n^2 \{\varphi_n\} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) = -\omega_n^2 \begin{Bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{Bmatrix} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) \quad (3.17)$$

Fazendo-se a substituição dos vetores aceleração ($\{\ddot{x}\}$) e deslocamento ($\{x\}$) na equação de movimento (3.15), tem-se a equação (3.18) e, como $\text{sen}(\omega_n t + \phi_n) \neq 0$, chega-se à equação (3.19).

$$-\omega_n^2 [\mathbf{M}]\{\varphi_n\} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) + [\mathbf{K}]\{\varphi_n\} \text{sen}(\omega_n t + \phi_n) = \{0\} \quad (3.18)$$

$$-\omega_n^2 [\mathbf{M}]\{\varphi_n\} + [\mathbf{K}]\{\varphi_n\} = \{0\} \quad (3.19)$$

O sistema obtido só apresenta solução diferente da trivial, caso o determinante da matriz de coeficientes seja nulo, conforme mostrado na equação (3.20), que é um problema de autovalores e autovetores, chamada equação de frequência ou equação característica.

$$[-\omega_n^2 [\mathbf{M}] + [\mathbf{K}]]\{\varphi_n\} = \{0\} \quad (3.20)$$

Resolvendo-se o sistema de autovalores e autovetores, os autovalores (ω_n) obtidos da equação característica são as frequências naturais em que o sistema pode oscilar. E os autovetores ($\{\varphi_n\}$) obtidos, sendo um para cada frequência natural, são os modos de vibração, ou seja, correspondem à maneira que o sistema vibra para cada uma das n frequências.

Normalmente, agrupa-se todos os modos de vibração do sistema em uma matriz, chamada matriz modal ($[\Phi]$). Nela, organiza-se o primeiro modo de vibração sendo a primeira coluna, o

segundo modo sendo a segunda coluna da matriz, e assim para os demais n modos. Cabe destacar que os modos de vibração são ordenados conforme suas frequências, da menor para a maior, ou seja, o primeiro modo de vibração é aquele com a menor frequência natural. A matriz modal ($[\Phi]$) é mostrada na equação (3.21).

$$[\Phi] = [\{\varphi_1\} \quad \{\varphi_2\} \quad \dots \quad \{\varphi_n\}] \quad (3.21)$$

3.4.1 Ortogonalidade dos Modos de Vibração

Os modos de vibração possuem uma propriedade interessante e útil chamada ortogonalidade em relação às matrizes de massa ($[\mathbf{M}]$) e de rigidez ($[\mathbf{K}]$). Com essa propriedade, satisfazem-se as condições expressas nas equações (3.22) e (3.23), obtendo-se matrizes diagonais que contém a rigidez modal (k_k) e a massa modal (m_k) dos n modos de vibração na diagonal principal.

$$[\Phi]^T[\mathbf{K}][\Phi] = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & k_k & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$[\Phi]^T[\mathbf{M}][\Phi] = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & m_k & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Pode-se obter as frequências naturais de cada um dos modos de vibração, sendo ω_k em radianos por segundo (rad/s) e f_k em Hertz (Hz), conforme as equações (3.24) e (3.25). Além disso, assumindo-se a ortogonalidade dos modos de vibração em relação à matriz de amortecimento ($[\mathbf{C}]$) da estrutura, é possível determiná-la, como mostra a equação (3.26), onde c_k é o amortecimento modal e ξ_k é o coeficiente de amortecimento do k -ésimo modo de vibração.

$$\omega_k = \sqrt{\frac{k_k}{m_k}} \text{ em } \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) \quad (3.24)$$

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} \text{ em (Hz)} \quad (3.25)$$

$$[\Phi]^T[\mathbf{C}][\Phi] = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & c_k & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot \xi_k \cdot m_k \cdot \omega_k & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.5 MATRIZ DE AMORTECIMENTO

A matriz de amortecimento pode ser definida para equações de movimento desacopladas, admitindo-se a ortogonalidade dos modos de vibração em relação à matriz de massa. Ou seja, uma matriz de amortecimento diagonal é obtida com as equações (3.27) e (3.28), sendo c_n o amortecimento generalizado para o modo n .

$$\{\varphi_n\}^T [\mathbf{C}] \{\varphi_m\} = 0 \quad \text{se } m \neq n \quad (3.27)$$

$$c_n = \{\varphi_n\}^T [\mathbf{C}] \{\varphi_n\} \quad (3.28)$$

O amortecimento crítico para o modo n , (c_n^{crit}) e o coeficiente de amortecimento do modo n (ξ_n) são calculados conforme as equações (3.29) e (3.30), respectivamente.

$$c_n^{crit} = 2 m_n \omega_n \quad (3.29)$$

$$\xi_n = c_n / c_n^{crit} \quad (3.30)$$

Substituindo-se o c_n^{crit} na equação (3.30) e isolando-se c_n , tem-se a equação (3.31) que define o amortecimento para o modo n (c_n).

$$c_n = 2 \xi_n m_n \omega_n \quad (3.31)$$

Dessa forma, a equação de equilíbrio dinâmico de um modo de vibração n , que é mostrado na equação (3.32), pode ser escrita conforme a equação (3.33).

$$m_n \ddot{x}_n + c_n \dot{x}_n + k_n x_n = F_n(t) \quad (3.32)$$

$$m_n \ddot{x}_n + 2 \xi_n m_n \omega_n \dot{x}_n + k_n x_n = F_n(t) \quad (3.33)$$

Usando-se também o que é definido na equação (3.34), para substituir k_n na equação (3.33), e fazendo-se a divisão da equação (3.33) pela massa m_n é obtida a equação (3.35).

$$\frac{k_n}{m_n} = \omega_n^2 \quad \text{ou} \quad k_n = \omega_n^2 m_n \quad (3.34)$$

$$\ddot{x}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{x}_n + \omega_n^2 x_n = \frac{F_n(t)}{m_n} \quad (3.35)$$

Assim, a matriz de amortecimento fica sendo uma matriz diagonal, conforme Equação (3.36).

$$[\mathbf{C}] = [\mathbf{\Phi}]^{-T} \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 2\xi_n \omega_n \end{bmatrix} [\mathbf{\Phi}]^{-1} \quad (3.36)$$

4. ANÁLISE DINÂMICA

Nesta etapa do trabalho, são apresentadas as formulações dos métodos de análise dinâmica no domínio do tempo e da frequência utilizados. Primeiramente, são passadas informações gerais sobre a análise dinâmica e, após isso, são mostradas informações específicas em relação aos métodos de análise empregados para este estudo no domínio do tempo e da frequência.

Uma análise dinâmica visa determinar a resposta dinâmica que determinada estrutura apresenta quando submetida a ações dinâmicas. Quando se fala em dinâmica, entenda-se que considera variações ao longo de um período de tempo, diferentemente de uma análise estática onde a solicitação não varia com o tempo. Então, quanto a ações dinâmicas, deve-se entender que possuem magnitude ou grandeza, direção e ponto de aplicação que são variáveis ao longo do tempo e, desse modo, as respostas dinâmicas como tensões, deslocamentos, velocidades e acelerações irão também variar com o tempo (CLOUGH; PENZIEN, 2003).

A análise dinâmica pode ser aplicada para o estudo das chamadas vibrações livres ou forçadas, sendo chamadas vibrações livres aquelas que ocorrem no sistema após a remoção de uma força ou perturbação inicial e vibrações forçadas aquelas que ocorrem pela ação de forças contínuas agindo no sistema. Além disso, uma análise dinâmica pode ser determinística ou estocástica, dependendo de a vibração ser do tipo determinística ou aleatória. A análise de vibrações determinísticas é quando se conhece a lei ou comportamento de variação de uma ação ao longo do tempo; já a análise estocástica é para vibrações aleatórias ou não determinísticas, quando o comportamento de variação de uma ação ao longo do tempo não é completamente conhecido, mas pode ser definido por meios estatísticos, como no caso do vento (RAO, 2008).

Além disso, a análise de uma estrutura pode ser experimental, com um modelo físico ou fazendo-se medições na própria estrutura real, ou analítica, com um modelo matemático que represente o sistema físico real e apresente uma solução matemática adequada. Tais modelos matemáticos, que podem ser contínuos (com ações e respostas ao longo de toda a estrutura) ou discretos (com ações e respostas em pontos da estrutura), devem ser capazes de simular o comportamento dinâmico do sistema.

Devido à complexidade do domínio do problema, dos materiais que constituem a estrutura e das condições de contorno e iniciais, a solução analítica dos problemas de análise dinâmica de estruturas é possível em alguns casos somente de forma simplificada, resolvidos de maneira

aproximada. Para diminuir a complexidade do sistema, podem haver simplificações como considerar que o comportamento da estrutura seja linear ou que suas características não variam ao longo do tempo. Assim, diferentes modelos para o mesmo sistema muitas vezes são possíveis, sendo preciso adequar suas características para que o sistema represente a estrutura geral de forma adequada e forneça a solução com precisão de acordo com as necessidades de resposta a serem obtidas (MEIROVITCH, 2001). Para a solução, os métodos numéricos de solução aproximada, como o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF), são frequentemente utilizados.

4.1 ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DO TEMPO

Neste tipo de análise, busca-se a resposta estrutural em um determinado intervalo de tempo para uma estrutura sujeita a condições iniciais de deslocamentos, velocidades, acelerações e carregamentos dependentes do tempo. Em geral, faz-se a discretização de um intervalo de tempo contínuo em uma série de tempos discretos a serem analisados e é estabelecida uma aproximação para as variações temporais que relacione os deslocamentos, velocidades e acelerações em diferentes tempos. Assim, pode-se dividir a análise dinâmica para a resposta no tempo na aproximação das variações temporais, feita com algum método de integração no tempo como o método de Newmark, de Houbolt, da Diferença Central ou da Superposição Modal, e na solução aproximada das equações de campo para um dado tempo, feita utilizando-se o MDF (Método das Diferenças Finitas) ou o MEF (Método dos Elementos Finitos), por exemplo (TORII, 2012).

Para resolução do problema há os chamados Métodos de Integração Direta, como os já citados Métodos de Newmark, de Houbolt e da Diferença Central, que são algoritmos aplicados diretamente ao sistema de equações original. Estes métodos podem ser classificados em implícitos, como Newmark e Houbolt, e explícitos, como o Método da Diferença Central. Nos métodos implícitos, com a equação (3.1) as transformações temporais para um determinado ponto no tempo $t+\Delta t$ são obtidas considerando o equilíbrio no próprio ponto $t+\Delta t$, tornando o método incondicionalmente estável e requerendo, porém, maior esforço computacional por passo de tempo. Já nos métodos explícitos, com a equação (3.1) as aproximações temporais para um ponto $t+\Delta t$ são obtidas considerando o equilíbrio em um ponto de tempo t , possibilitando menor esforço computacional por passo de tempo (especialmente quando há o emprego de simplificações como o uso de matrizes de massa diagonalizadas), mas tornando-se

condicionalmente estável, havendo a possibilidade de apresentar divergências em caso de empregar-se um passo de tempo (Δt) muito grande (BATHE, 1996).

4.1.1 Método de Newmark

O método de Newmark utiliza dois parâmetros, α e δ , que podem ser determinados para obter a precisão e estabilidade desejadas. É o método mais eficaz dentre os métodos implícitos e foi originalmente proposto por Newmark como um esquema incondicionalmente estável, utilizando os parâmetros $\delta = 1/2$ e $\alpha = 1/4$, sendo chamado também de método da aceleração média constante, e conhecido ainda como regra trapezoidal (BATHE, 1996; RAO, 2008). Além disso, assumindo-se $\delta = 1/2$ e $\alpha = 1/6$ o método é também chamado de método da aceleração linear, passando, porém, a ser condicionalmente estável (CLOUGH; PENZIEN, 2003).

Com base na premissa de que a aceleração varia linearmente entre dois instantes de tempo, t e $t+\Delta t$, o método utiliza as equações (4.1) e (4.2) para determinar os vetores de velocidade e deslocamento no fim do intervalo $t+\Delta t$ para um sistema com vários graus de liberdade (RAO, 2008).

$$\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\mathbf{x}}\}_t + [(1 - \delta)\{\ddot{\mathbf{x}}\}_t + \delta\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}]\Delta t \quad (4.1)$$

$$\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t} = \{\mathbf{x}\}_t + \Delta t\{\dot{\mathbf{x}}\}_t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\{\ddot{\mathbf{x}}\}_t + \alpha\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}\right]\Delta t^2 \quad (4.2)$$

Para determinar o valor de $\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}$, a equação de equilíbrio é considerada no instante $t+\Delta t$, conforme mostra a equação (4.3).

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t} = \{\mathbf{F}\}_{t+\Delta t} \quad (4.3)$$

Conforme Rao (2008) e Bathe (1996), a equação (4.2) pode ser usada para expressar a aceleração ($\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}$) em termos de deslocamento ($\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t}$) e a expressão resultante pode então ser substituída na equação (4.1) para expressar a velocidade ($\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}$) em termos de deslocamento ($\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t}$). Por fim, substituindo-se as expressões na equação (4.3) é obtida a equação (4.4),

$$\begin{aligned}
\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t} &= \left[\frac{\mathbf{1}}{\alpha(\Delta t)^2} [\mathbf{M}] + \frac{\delta}{\alpha\Delta t} [\mathbf{C}] + [\mathbf{K}] \right]^{-1} \\
&\times \left\{ \{\mathbf{F}\}_{t+\Delta t} + [\mathbf{M}] \left(\frac{\mathbf{1}}{\alpha(\Delta t)^2} \{\mathbf{x}\}_t + \frac{\mathbf{1}}{\alpha\Delta t} \{\dot{\mathbf{x}}\}_t + \left(\frac{\mathbf{1}}{2\alpha} - \mathbf{1} \right) \{\ddot{\mathbf{x}}\}_t \right) \right. \\
&\left. + [\mathbf{C}] \left(\frac{\delta}{\alpha\Delta t} \{\mathbf{x}\}_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - \mathbf{1} \right) \{\dot{\mathbf{x}}\}_t + \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{\mathbf{x}}\}_t \right) \right\} \quad (4.4)
\end{aligned}$$

a qual é utilizada para se obter o resultado de deslocamento no tempo $t + \Delta t$ ($\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t}$), e após isso também é possível obter as respostas de aceleração e velocidade com as equações (4.1) e (4.2).

Ainda de acordo com Rao (2008) e Bathe (1996), pode-se resumir o método de Newmark da seguinte forma: com os valores conhecidos de deslocamento ($\{\mathbf{x}\}_{t=0}$) e velocidade ($\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t=0}$) iniciais, ou seja, quando $t = 0$, determina-se a aceleração inicial ($\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t=0}$) com a equação (4.5); em seguida, com os valores de passo de tempo (Δt) e os parâmetros α e δ definidos de forma adequada, utilizando a equação (4.4), calcula-se o vetor de deslocamento ($\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t}$), começando com o deslocamento inicial, com $t=0$; então, são calculados os vetores de aceleração ($\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}$) e velocidade ($\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t}$) com as equações (4.1) e (4.2) reordenadas conforme as equações (4.6) e (4.7) abaixo.

$$\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t=0} = [\mathbf{M}]^{-1} (\{\mathbf{F}\}_{t=0} - [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t=0} - [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\}_{t=0}) \quad (4.5)$$

$$\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} = \frac{\mathbf{1}}{\alpha(\Delta t)^2} (\{\mathbf{x}\}_{t+\Delta t} - \{\mathbf{x}\}_t) - \frac{\mathbf{1}}{\alpha\Delta t} \{\dot{\mathbf{x}}\}_t - \left(\frac{\mathbf{1}}{2\alpha} - \mathbf{1} \right) \{\ddot{\mathbf{x}}\}_t \quad (4.6)$$

$$\{\dot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\mathbf{x}}\}_t + (1 - \delta)\Delta t\{\ddot{\mathbf{x}}\}_t + \delta\Delta t\{\ddot{\mathbf{x}}\}_{t+\Delta t} \quad (4.7)$$

4.2 ANÁLISE DINÂMICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Dados os autovetores $\{\boldsymbol{\varphi}_k\}$ obtidos anteriormente, dividindo cada um deles pela raiz dos elementos correspondentes m_k da matriz diagonalizada de massa, obtém-se os autovetores ortonormalizados $\{\boldsymbol{\varphi}_k^*\}$, que formam a matriz de autovetores ortonormalizada $[\boldsymbol{\Phi}^*]$, conforme equação (4.8). Então, com a equação (4.9), tem-se a matriz identidade $[\mathbf{I}]$ e a matriz de autovalores $[\boldsymbol{\Lambda}]$.

$$\{\boldsymbol{\Phi}_k^*\} = \{\boldsymbol{\Phi}_k\}/\sqrt{m_k} \quad (4.8)$$

$$[\boldsymbol{\Phi}^*]^T[\mathbf{M}][\boldsymbol{\Phi}^*] = [\mathbf{I}] \text{ e também } [\boldsymbol{\Phi}^*]^T[\mathbf{K}][\boldsymbol{\Phi}^*] = [\boldsymbol{\Lambda}] = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \omega_k^2 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para este tipo de análise, assumindo separabilidade de tempo e espaço dos modos e da vibração, $\{x(t)\} = [\boldsymbol{\Phi}^*]\{\eta(t)\}$, onde $\{\eta(t)\}$ é o vetor de variáveis modais, o sistema de equações de movimento fica conforme equação (4.10), a qual é desacoplada, linha a linha. $\{\mathbf{F}_m(t)\}$ é o vetor de carregamento modal em função do tempo e $[\mathbf{Z}]$ é a matriz das razões de amortecimento, definida pela equação (4.11).

$$[\mathbf{I}]\{\ddot{\boldsymbol{\eta}}(t)\} + 2[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]^{1/2}\{\dot{\boldsymbol{\eta}}(t)\} + [\boldsymbol{\Lambda}]\{\boldsymbol{\eta}(t)\} = [\boldsymbol{\Phi}^*]^T\{\mathbf{F}(t)\} = \{\mathbf{F}_m(t)\} \quad (4.10)$$

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \xi_k & 0 \\ 0 & 0 & \ddots \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Executando a transformada de Fourier para a equação (4.10), obtém-se a equação (4.12) que pode ser simplificada conforme (4.13), sendo i o número imaginário ($\sqrt{-1}$). Desse modo, a função de transferência do sistema, no espaço modal, fica como mostrado na equação (4.14).

$$-\omega^2[\mathbf{I}]\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} + 2i\omega[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]^{1/2}\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} + [\boldsymbol{\Lambda}]\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = \{\mathbf{F}_m(\omega)\} \quad (4.12)$$

$$\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = [\mathbf{H}_m(\omega)]\{\mathbf{F}_m(\omega)\} \quad (4.13)$$

$$[\mathbf{H}_m(\omega)] = [-\omega^2[\mathbf{I}] + 2i\omega[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]^{1/2} + [\boldsymbol{\Lambda}]]^{-1} \quad (4.14)$$

Para um processo linear da forma $\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = [\mathbf{H}_m(\omega)]\{\mathbf{F}_m(\omega)\}$, onde $\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\}$ é a transformada de Fourier de $\{\boldsymbol{\eta}(t)\}$ e $\{\mathbf{F}_m(\omega)\}$ é a transformada de Fourier de $\{\mathbf{F}_m(t)\}$, a densidade espectral fica conforme a equação (4.15), onde “*” representa o conjugado complexo, \mathbf{S}_{Fm} é a densidade espectral das forças modais e $\mathbf{H}_m(\omega)$ a função de transferência do sistema (NEWLAND, 1984).

$$[\mathbf{S}_\eta(\omega)] = [\mathbf{H}_m(\omega)][\mathbf{S}_{Fm}(\omega)][\mathbf{H}_m^*(\omega)]^T \quad (4.15)$$

Voltando ao espaço das variáveis reais $\mathbf{x}(t)$, obtém-se a expressão para a densidade espectral

dos graus de liberdade, ou seja, para as densidades espectrais das variáveis do problema original, conforme equação (4.16).

$$[\mathbf{S}_x(\omega)] = \{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m(\omega)]\{\boldsymbol{\varphi}\}^T[\mathbf{S}_F(\omega)]\{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m^*(\omega)]^T\{\boldsymbol{\varphi}\}^T \quad (4.16)$$

A equação (4.16) relaciona a matriz função densidade espectral de potência dos deslocamentos $[\mathbf{S}_x(\omega)]$ com a matriz de função densidade espectral de potência das forças aplicadas $[\mathbf{S}_F(\omega)]$ através da matriz função complexa de transferência do sistema $[\mathbf{H}_m(\omega)]$. Pela definição de densidade espectral a partir da função e correlação, o valor RMS de determinada variável com média zero pode ser avaliado extraindo-se a raiz da integração do respectivo espectro no domínio da frequência, como mostra a equação (4.17). Nela, o valor da integral é duplicado, visto que $[S_x(\omega)]_{k,k}$ é definida entre $-\infty$ e ∞ , enquanto que a integral é realizada entre 0 e ∞ . A Figura 4.1 ilustra a integração feita para obtenção de $E[\{\mathbf{x}^2(t)\}_k]$.

$$E[\{\mathbf{x}^2(t)\}_k] = (1/T) \int_0^T x_k^2(t) dt = (x_{k,rms})^2 = 2 \int_0^\infty [S_x(\omega)]_{k,k} d\omega \quad (4.17)$$

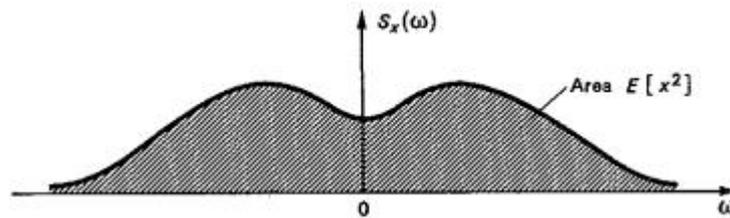


Figura 4.1 – A área abaixo da curva de densidade espectral é igual à $E[\{\mathbf{x}^2(t)\}_k]$ (NEWLAND, 1984).

Para grandezas derivadas, tem-se as equações (4.18) e (4.19) para a velocidade e (4.20) e (4.21) para a aceleração (NEWLAND, 1984).

$$[\mathbf{S}_{\dot{x}}(\omega)] = \omega^2[\mathbf{S}_x(\omega)] \quad (4.18)$$

$$E[\{\dot{\mathbf{x}}^2(t)\}_k] = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 [S_x(\omega)]_{k,k} d\omega = 2 \int_0^\infty \omega^2 [S_x(\omega)]_{k,k} d\omega \quad (4.19)$$

$$[\mathbf{S}_{\ddot{x}}(\omega)] = \omega^4[\mathbf{S}_x(\omega)] \quad (4.20)$$

$$\mathbf{E}[\{\dot{\mathbf{x}}^2(t)\}_k] = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^4 [\mathbf{S}_x(\omega)]_{k,k} d\omega = 2 \int_0^{\infty} \omega^4 [\mathbf{S}_x(\omega)]_{k,k} d\omega \quad (4.21)$$

Já para tensões internas de um determinado elemento finito, tem-se a equação (4.22) e com isso também (4.23), as quais valem ainda para reações de apoio, deformações, etc, sendo $\{\boldsymbol{\sigma}^e(t)\}$ o vetor de tensões internas do elemento e , $[\mathbf{D}^e]$ a matriz constitutiva do elemento, $[\mathbf{B}^e]$ a matriz que relaciona deslocamentos e deformações e $\{\mathbf{x}^e(t)\}$ o vetor de deslocamentos do elemento.

$$\{\boldsymbol{\sigma}^e(t)\} = [\mathbf{D}^e][\mathbf{B}^e]\{\mathbf{x}^e(t)\} \quad (4.22)$$

$$[\mathbf{S}_{\sigma}^e(\omega)] = [\mathbf{D}^e][\mathbf{B}^e][\mathbf{S}_x^e(\omega)][\mathbf{B}^e]^T[\mathbf{D}^e]^T \quad (4.23)$$

A equação (4.23) relaciona a matriz função densidade espectral de potência das tensões $[\mathbf{S}_{\sigma}^e(\omega)]$ em um ponto de integração com a matriz função densidade espectral de potência dos deslocamentos dos nós do elemento $[\mathbf{S}_x^e(\omega)]$, calculada por (4.16). Informações acerca dos históricos de reação de apoio, assim como esforços internos ao longo do tempo e suas respectivas densidades espectrais são de relevância tanto para o projeto das fundações como para a análise do tempo em fadiga dos componentes do aerogerador.

Para a densidade espectral das reações, em se tratando de um problema dinâmico, deve-se levar em conta as forças de inércia, dissipativas, elásticas e externas da estrutura, de forma que para os graus de liberdade que estejam restringidos (onde haverá reações de apoio):

$$\{\mathbf{R}(t)\} = [\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} \quad (4.24)$$

sendo $\{\mathbf{R}(t)\}$ o vetor de reações. Segundo o mesmo raciocínio anterior, utilizando-se da propriedade da ortonormalidade dos modos, chega-se à equação (4.25), ou simplificada à equação (4.26), para a matriz função densidade espectral de potência das reações $[\mathbf{S}_R(\omega)]$.

$$[\mathbf{S}_R(\omega)] = [\{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m(\omega)]\{\boldsymbol{\varphi}\}^T]^{-1}[\mathbf{S}_x(\omega)][\{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m^*(\omega)]^T\{\boldsymbol{\varphi}\}^T]^{-T} \quad (4.25)$$

$$[\mathbf{S}_R(\omega)] = [\mathbf{H}(\omega)]^{-1}[\mathbf{S}_x(\omega)][\mathbf{H}^*(\omega)]^{-T} \quad (4.26)$$

5. MODELAMENTO DA AÇÃO DO VENTO

Neste capítulo são fornecidos os conceitos gerais e básicos necessários para o entendimento da geração das ações devidas ao vento assim como os algoritmos utilizados para a geração deste vento, representado pela sua velocidade. É dada ênfase na simulação do vento correlacionado de forma espacial e sua validação para posterior utilização como ação na estrutura do aerogerador. Também são comentados os efeitos que o vento terá sobre as pás dos aerogeradores (de perfil aerodinâmico específico) e a forma como serão consideradas neste trabalho as forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto nestas estruturas que serão transmitidas à torre do aerogerador.

5.1 CONCEITOS INICIAIS SOBRE VENTOS

O vento se origina devido a diferenças na pressão atmosférica, causadas por variações na temperatura do ar. Conforme Blessmann (1995), as diferenças de pressão são responsáveis pela origem de forças que provocam o deslocamento de parcelas do ar atmosférico das zonas de maior para as de menor pressão, sendo o movimento do ar afetado ainda pelo efeito Coriolis originado pela rotação da Terra. A definição dada por Pinto (2014) está de acordo, pois, segundo ele, o vento é a movimentação das massas de ar na atmosfera, havendo cinco forças que atuam sobre as parcelas de ar, que são a força do gradiente de pressão, a força Coriolis, a força centrífuga, a força de atrito e a força da gravidade.

Pode-se classificar os ventos em dois grandes grupos que são os ventos sinóticos e não-sinóticos. Os ventos sinóticos costumam atingir grandes extensões horizontais e produzem um perfil vertical de velocidades horizontais que pode ser reproduzido por uma escala logarítmica ou exponencial, e os não-sinóticos possuem um perfil de velocidades com valores mais altos mais próximos ao solo e uma estrutura de correlação mais complexa (GHENO, 2014). Uma das principais diferenças entre ventos sinóticos e não-sinóticos portanto é o perfil vertical de velocidade horizontal do vento. No perfil vertical de ventos sinóticos, a magnitude da velocidade é crescente com a altura. Já para o perfil vertical de ventos não-sinóticos, a velocidade do vento basicamente cresce até que atinge o pico em uma determinada altura e após o pico começa a decair com o aumento da altura (VALLIS, 2019). Cabe destacar que em trabalhos recentes, como os de Vallis (2019) e Riera (2016), constata-se a importância da consideração de outros tipos de ventos, que não os sinóticos, para os cálculos de carregamentos

e que na maior parte do Brasil a maioria dos dados de ventos são do tipo não-sinóticos. Por fim, salienta-se que neste estudo é feita a simulação com ventos do tipo sinótico, que de acordo com Gheno (2014), Riera (2016) e Vallis (2019) são geralmente utilizados em normas e códigos nacionais e internacionais para o cálculo de carregamentos de vento em estruturas.

Segundo Blessmann (1995), para a consideração da ação do vento em estruturas, a velocidade do vento pode ser entendida como uma combinação da velocidade média do vento, determinada para intervalos de tempo entre 10 minutos e 1 hora, e de flutuações instantâneas por volta desta média, chamadas de rajadas, as quais são determinadas como médias sobre intervalos de tempo bem pequenos, na ordem de segundos. Com isso, o espectro de energia do vento possui dois picos distintos, causados por efeitos em macro e microescala, com uma longa lacuna entre eles.

Os efeitos macro meteorológicos são flutuações com períodos superiores a uma hora, influenciando, portanto, a velocidade média do vento e causados pelo fluxo de ar entre sistemas de pressão criados na atmosfera da terra. Do ponto de vista estrutural, esses ventos representam o carregamento que ocorrerá de forma persistente durante a vida útil de uma estrutura. Já os efeitos micro meteorológicos são flutuações com períodos inferiores a uma hora e com um pico que ocorre em um período de aproximadamente um minuto, cuja altura depende da velocidade do vento. Portanto, situam-se nesta região as rajadas turbulentas, causadas de modo geral pelo atrito com o solo e obstáculos na vizinhança das estruturas. A Figura 5.1 mostra o espectro de energia para o vento, conforme descrito.

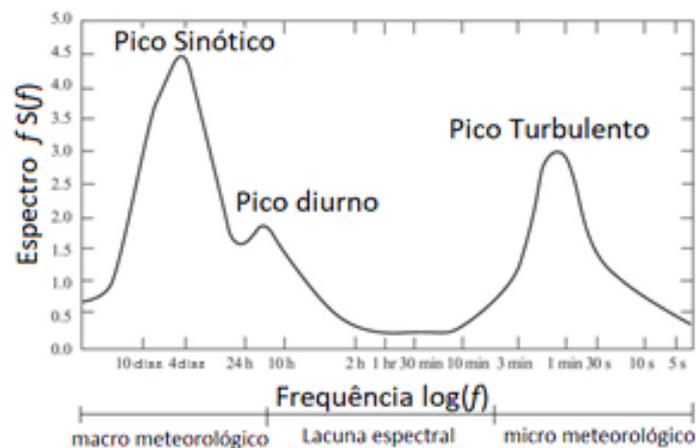


Figura 5.1 – Espectro de energia para o vento (adaptado de BLESSMANN, 1995).

Como visto na Figura anterior, há uma lacuna espectral que permite que haja uma separação na consideração do vento em duas parcelas, uma de longo prazo e outra de curto prazo. Devido às

características aleatórias ou estocásticas do vento, sua velocidade pode ser considerada uma variável aleatória contínua e, desse modo, há variação de velocidade ao longo do ano, semanais e diurnas, além de variações de picos turbulentos da ordem de minutos e na sua direção em relação às estações do ano. Assim, para análises da ação do vento sobre estruturas que durem alguns minutos, é preciso que alguns destes parâmetros estejam fixos como a época do ano e a direção de flutuação, restando apenas a parcela turbulenta e média a serem simuladas.

A norma brasileira não considera direcionalidade, pois a direção da ação do vento pode variar. Contudo, para a direção do vento, num determinado local, é possível obter a chamada Rosa dos Ventos, a qual indica, para aquela localidade, a frequência da direção do vento em relação aos pontos cardeais, ao longo do ano, e a respectiva distribuição de probabilidades para aquela direção, como indicado pela Figura 5.2. Assim, a rosa dos ventos pode ser válida para definições quanto ao funcionamento de uma torre eólica, apesar de que com a norma brasileira não tenha aplicação para ações de vento extremo.

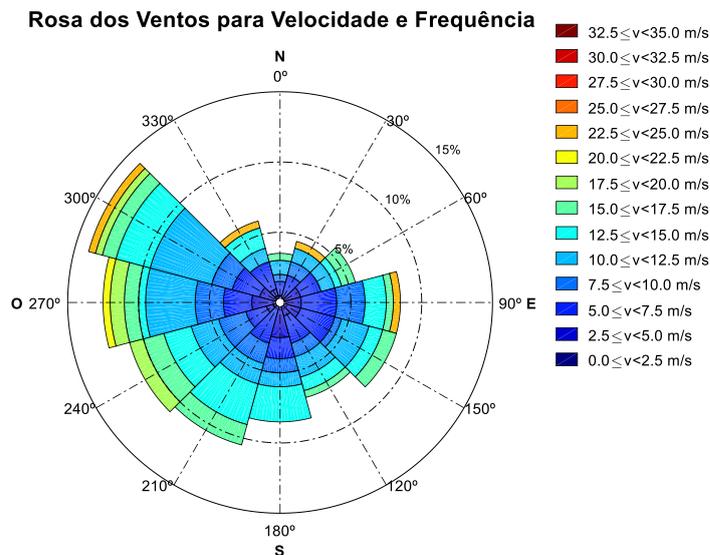


Figura 5.2 – Exemplo de Rosa dos Ventos com vento anual predominante a Noroeste (300°) e com velocidades médias em torno de 10 m/s (obtidos pela distribuição de Weibull para aquele setor da Rosa dos Ventos). (Adaptado de GIACOMOLLI, 2018).

Para o cálculo, a velocidade do vento ($u(y, z, t)$) pode ser descrita como um somatório da parcela de velocidade média ($\bar{U}(z)$), de longo prazo, e da parcela de velocidade flutuante ($\tilde{u}(y, z, t)$), de curto prazo, como na equação (5.1). A Figura 5.3 representa estas duas parcelas no espaço e no tempo.

$$u(y, z, t) = \bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t) \quad (5.1)$$

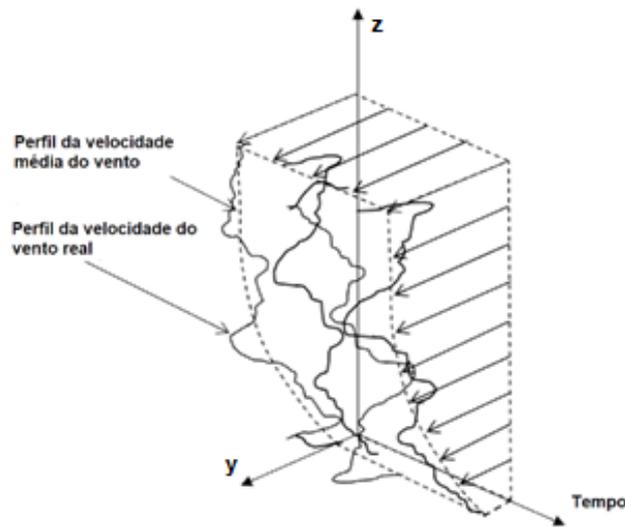


Figura 5.3 – Representação das Parcelas médias e flutuantes do vento no espaço e ao longo do tempo (Adaptado de ARSHAD e O’KELLY, 2015).

O perfil da parcela da velocidade média ($\bar{U}(z)$) é modelado sob a hipótese de camada limite atmosférica, em função da altura (z) e podendo ser representada de forma logarítmica ou exponencial. Um parâmetro bastante utilizado para avaliar a intensidade das flutuações da velocidade do vento é a chamada Intensidade de Turbulência (TI, *Turbulence Intensity*) que é definida como a razão entre o desvio padrão da flutuação da velocidade do vento dividida pela velocidade média do vento $TI = \frac{\sigma_{\tilde{u}}}{\bar{U}}$, havendo valores para cada uma das três direções cartesianas. A equação (5.2) em forma de potência, também conhecida como Lei Potencial, é usada para representação do perfil da velocidade média sendo feita uma relação com a velocidade (u_r) em uma altura de referência (z_r), fixada em um valor padrão, e onde o expoente (α) é dependente da rugosidade do terreno (SIMIU; SCANLAN, 1996).

$$\bar{U}(z) = u_r (z/z_r)^\alpha \quad (5.2)$$

Para a parcela média de velocidade do vento, esta pode ser obtida a partir de uma distribuição de probabilidades, geralmente Weibull, que é ajustada a partir de dados experimentais obtidos com um histograma das velocidades do vento ao longo do ano (PINTO, 2014). Cabe destacar que a NBR 6123 (1988) utiliza a distribuição de Fréchet e há ainda outros tipos de distribuição de probabilidades. A Figura 5.4 mostra um exemplo de histograma para velocidade do vento.

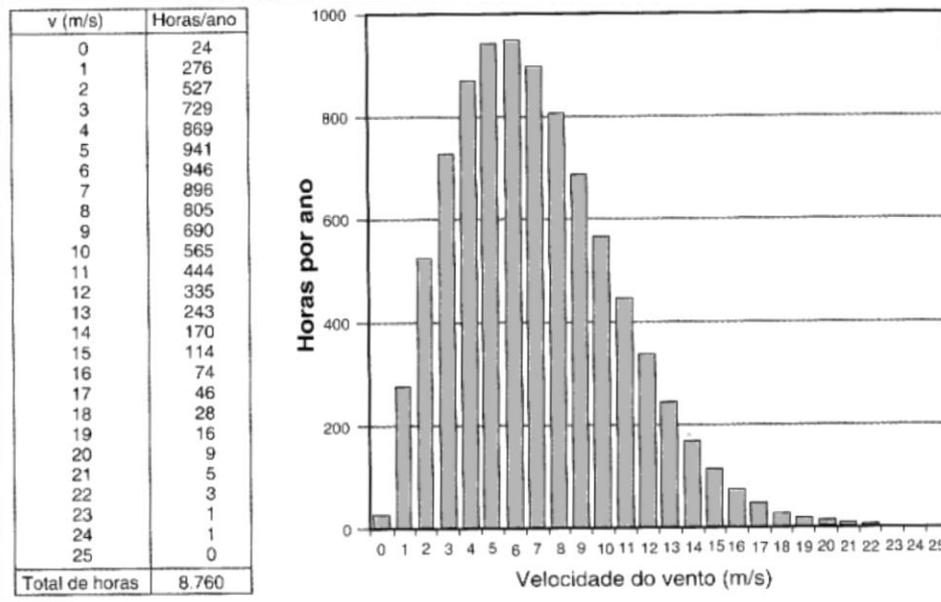


Figura 5.4 – Histograma da quantidade de tempo que o vento sopra para cada faixa de velocidade (PINTO, 2014).

Já para a parcela flutuante, sua característica fundamentalmente aleatória de formação das rajadas faz com que não seja possível o tratamento determinístico das velocidades do vento e que seja então necessária a determinação das velocidades através de método estatístico. Para isso, a densidade espectral é uma metodologia aplicável, sendo que na engenharia de estruturas, os espectros mais utilizados, obtidos a partir da velocidade do vento medida para diferentes alturas e tipos de terreno, são os espectros de Davenport, Harris, von Kármán e Kaimal (BLESSMANN, 1995). Vale mencionar que a NBR 6123 (1988) adota o espectro de Harris e que para testes em túnel de vento é adotado o espectro de Von Kármán. A Figura 5.5 mostra as curvas dos espectros mencionados.

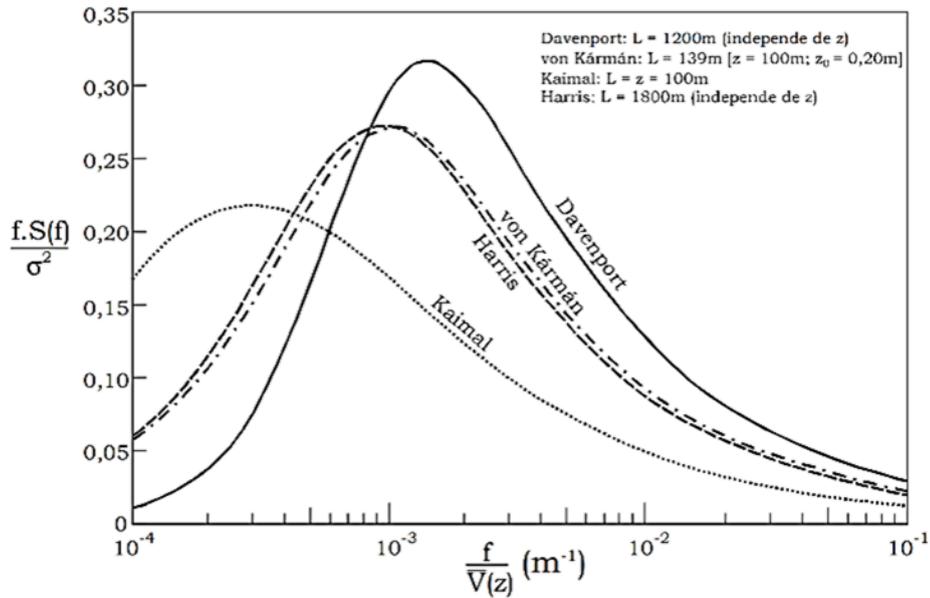


Figura 5.5 – Espectros de Davenport, Harris, von Kármán e Kaimal (BLESSMANN, 1995).

Para a parcela flutuante, de acordo com Morfiadakis, Glinou e Koulouvari (1996), comparando-se valores medidos para a aplicação em parques eólicos, o espectro que resultou em uma melhor concordância na escala e forma do espectro de potência para condições de fluxo livre foi o espectro de von Kármán. Com isso, esse espectro é utilizado neste trabalho, sob a hipótese de fluxo livre e atmosfera estável.

A seguir são exibidas as equações (5.3) e (5.4), que são expressões de von Kármán, para o espectro da componente longitudinal de turbulência (u), na micro meteorologia e para os espectros das componentes lateral de turbulência (v) e vertical (w) na micro meteorologia, respectivamente (BLESSMANN, 1995).

$$S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{4\left(\frac{L_u}{U_{z_0}}\right)}{\left[1 + 70.8\left(\frac{fL_u}{U_{z_0}}\right)^2\right]^{5/6}} \quad (5.3)$$

$$S_j(f) = \sigma_j^2 \frac{4\left[\frac{L_j}{U_{z_0}}\right]\left(1 + 188.4\left(\frac{2fL_j}{U_{z_0}}\right)^2\right)}{\left[1 + 70.8\left(\frac{2fL_j}{U_{z_0}}\right)^2\right]^{11/6}} \quad j = v, w \quad (5.4)$$

Nas equações mostradas, U_{z_0} é a velocidade longitudinal média na altura de referência z_0 , L_u é a escala do comprimento de turbulência longitudinal (u), L_j é a escala do comprimento de turbulência das componentes lateral ($j = v$) e vertical ($j = w$), f é a frequência em hertz (Hz) e a unidade da densidade espectral S_u é $(\text{m/s})^2/\text{Hz}$.

5.2 GERAÇÃO DE CAMPOS ESTOCÁSTICOS CORRELACIONADOS PARA O VENTO

Para a geração do campo de vento foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Wang et al. (2018), o qual foi criado para a o tratamento e análise de uma ponte de grande comprimento localizada na Noruega. O método para a geração do campo de vento é baseado em uma simulação de Monte Carlo, a qual teve seus fundamentos de utilização na engenharia estrutural firmados por Shinozuka (1972), Shinozuka e Jan (1972) e Shinozuka e Deodatis (1991), que basicamente indica para um processo aleatório ($x(t)$) regido por uma certa densidade espectral ($S_x(\omega_i)$) a formulação exibida na equação (5.5) representada pela superposição de diversos processos simples cossenoides não correlacionados, onde nls é o número de linhas espectrais para discretização deste espectro, t é o tempo e φ_i são fases aleatórias, estocásticas, para cada frequência ω_i sendo somada.

$$x(t) = \sum_{i=1}^{nls} \sqrt{2S_x(\omega_i)d\omega} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (5.5)$$

Na literatura, o campo espectral de histórico da velocidade do vento basicamente tem sido gerado de duas formas: através de uma representação de ponto único ou através de uma representação de pontos múltiplos de aplicação. A representação de ponto único assume a existência de um campo completamente homogêneo, ou seja, com todos os pontos da estrutura sendo submetidos às mesmas flutuações do vento ao mesmo tempo. Essa representação é válida ao se tratar de estruturas de pequeno porte, que possam ser consideradas pontuais, pois a variação da flutuação do vento em diferentes locais da estrutura seria pequena, pela proximidade dos pontos. Para grandes estruturas, porém, a hipótese de homogeneidade não é realista, visto que o vento que incide em um local da estrutura pode ter uma grande variação ao se comparar com outro local da estrutura, devido à grande distância entre os pontos. Quanto maior a distância entre os pontos ou locais, maior pode ser essa variação, sendo necessário relacionar as flutuações de velocidade de um local para outro através de uma função. Desse modo, a representação de campo de vento multiponto se faz necessária e pode ser usada para determinar a ação da parcela flutuante do vento em locais diferentes na estrutura.

Conforme Davenport (1961), a correlação espacial de velocidades pode ser descrita em função da distância entre dois pontos d e da frequência da rajada f , como mostrado na equação (5.6), que tem y_1, y_2, z_1 e z_2 como as coordenadas de dois pontos da face da estrutura atingida pelo

vento e C_z e C_y como coeficientes de decaimento exponencial determinados experimentalmente. Para a equação abaixo, o valor de $\bar{U}(z)$ corresponde ao valor médio entre os dois pontos, ou seja, $\bar{U}(z) = 0,5 * (\bar{U}(z_1) + \bar{U}(z_2))$.

$$Coh(d, f) = \exp[-f \sqrt{C_z^2(z_1 - z_2) + C_y^2(y_1 - y_2)} / \bar{U}(z)] \quad (5.6)$$

Neste trabalho, os valores adotados para os coeficientes são $C_z = 7$ e $C_y = 10$, os quais produzem distribuições de carregamento a favor da segurança, propostos pelo mesmo autor nas situações descritas pelo mesmo.

Através da hipótese que a correlação do vento seja do tipo triangular (decaimento da correlação linearmente com a distância entre os pontos, diferentemente do decaimento exponencial), Riera e Ambrosini (1992) propuseram um procedimento eficiente de geração de campos espaciais de velocidade de vento onde células de pontos no espaço são geradas com distanciamento entre si de exatamente um comprimento de correlação, de forma que as velocidades de vento geradas nestes pontos sejam completamente independentes. Para simular a velocidade de vento em pontos do espaço interior a estas células, faz-se uma simples interpolação linear para com os valores das células vizinhas. Entretanto, como já observado por Cheynet et al. (2016) e Gurley e Kareem (1993), isto não garante históricos de velocidade de vento com a correlação adequada à especificada, e torna a geração para intensidades de turbulências variáveis com a altura ou com outros parâmetros mais complicada.

5.2.1 Simulação do Vento Correlacionado Espacialmente

Nesta etapa do trabalho, foram aplicados dados de entrada que podem ser utilizados como atuantes na estrutura a fim de verificar o correto funcionamento do código utilizado para a simulação do vento correlacionado espacialmente. Para tanto, além do modelo de densidade espectral utilizado é necessário correlacionar estas densidades espectrais ao longo do espaço (locais onde o vento atinge a estrutura da torre). Tal procedimento está detalhado no trabalho de Li et al. (2019) e esclarece alguns aspectos sobre a geração do campo de velocidades correlacionado espacialmente.

Dado um processo Gaussiano estacionário de média zero com n componentes de velocidade em função do tempo $v(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T$ a sua densidade espectral de potência pode ser expressa pela matriz:

$$\mathbf{S}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \dots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \dots & S_{2n}(\omega) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \dots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

onde

$$S_{jk}(\omega) = \sqrt{S_{jj}(\omega)S_{kk}(\omega)\Gamma_{jk}(\omega)} \quad (5.8)$$

e cada $S_{jk}(\omega)$ representa a densidade espectral cruzada dos processos $v_j(t)$ e $v_k(t)$, $\Gamma_{jk}(\omega)$ representa a função de coerência (em geral, para o vento, uma função que correlaciona os processos no espaço e a forma como ele decai com a distância espacial entre os processos) e $S_{jj}(\omega)$ e $S_{kk}(\omega)$ são as auto densidade espectrais dos processos $v_j(t)$ e $v_k(t)$, respectivamente. Segundo Li et al. (2019), a matriz de densidades espectrais cruzadas da velocidade do vento $\mathbf{S}(\omega)$ pode ser decomposta como $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)^T \mathbf{H}(\omega)$, obtido por fatoração, onde:

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \dots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

No caso de funções de coerência reais, todos os elementos da matriz $\mathbf{H}(\omega)$ devem ser também reais de forma que $H_{jk}(\omega)^* = H_{jk}(\omega)$. Seguindo a forma usual de geração e processos estocásticos correlacionados proposto por Deodatis (1996).

$$v_j(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^j |H_{jm}(\omega_{ml})| \cos(\omega_{ml}t + \varphi_{ml}) \quad (5.10)$$

onde $j = 1, 2, \dots, n$; $\omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \left(\frac{m}{n}\right)\Delta\omega$; $m = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, N$; $\Delta\omega = (\omega_u/N)$, sendo $\Delta\omega$ o passo ou intervalo de frequência e ω_u a *upper cutoff frequency* (frequência mais elevada de corte) e $\varphi_{1l}, \varphi_{2l}, \dots, \varphi_{nl}$ são n seqüências de fases aleatórias uniformemente distribuídas no intervalo $[0, 2\pi]$. Da mesma forma, Gao et al. (2012), indica a seguinte relação para a densidade espectral cruzada:

$$\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{D}(\omega)\mathbf{\Gamma}(\omega)\mathbf{D}^T(\omega) \quad (5.11)$$

sendo $\mathbf{D}(\omega) = \text{diag}[\sqrt{S_{11}(\omega)}, \sqrt{S_{22}(\omega)}, \dots, \sqrt{S_{nn}(\omega)}]$. De forma que como $\mathbf{\Gamma}(\omega)$ é positivo definida ela pode ser fatorada como $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{D}(\omega)\mathbf{L}(\omega)\mathbf{L}^T(\omega)\mathbf{D}^T(\omega)$, onde \mathbf{L} é uma matriz diagonal inferior com elementos $\beta_{jm}(\omega)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$). Assim, os elementos da matriz $\mathbf{H}(\omega)$ ficam definidos como:

$$H_{jm}(\omega) = \sqrt{S_{jj}(\omega)}|\beta_{jm}(\omega)| \quad (5.12)$$

ficando a equação (5.10) reescrita na forma:

$$v_j(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^j \sqrt{S_{jj}(\omega)}|\beta_{jm}(\omega)| \cos(\omega_{ml}t + \varphi_{ml}) \quad (5.13)$$

Desse modo, a repetitiva decomposição de Cholesky para obter estes coeficientes irá requerer muito esforço computacional se feita desta forma. Uma característica da função de coerência $\mathbf{\Gamma}(\omega)$ (como por exemplo a de Davenport) é que ela rapidamente decai para pontos com distâncias consideráveis e também com o aumento da frequência, gerando matrizes que são do tipo banda. Assim, as possibilidades que se colocam para acelerar o processo da geração do campo correlacionado propostos por Li et al. (2019) são: (i) aproximação da função de coerência, (ii) Decomposição de Cholesky limitada por banda da função de coerência e (iii) retirada de elementos nulos após a decomposição, diretamente na matriz fatorada.

Segundo Li et al. (2019) a primeira opção é a de eliminar elementos da matriz $\mathbf{\Gamma}(\omega)$ que sejam menores que certa tolerância, o que tornará a matriz com menor largura de banda. O segundo caso implica em utilizar rotinas otimizadas que permitam a operação com matrizes bandas esparsas utilizando a opção de aritméticas com matrizes deste tipo (especificamente do tipo bandas) disponível na maioria das linguagens de programação (Matlab, neste trabalho). O terceiro caso implica em diminuir ainda mais a largura da banda, especificamente não na matriz $\mathbf{\Gamma}(\omega)$, mas na matriz fatorada $\mathbf{L}(\omega)$, usando o mesmo raciocínio anterior para os elementos desta matriz que tenham valores muito pequenos. Obviamente qualquer destas opções levará a erros na geração que deverão ser avaliados e medidos quanto à sua importância no campo de velocidades gerado. Uma quarta opção não citada por Li et al. (2019) é a decomposição da matriz $\mathbf{\Gamma}(\omega)$ por autovalores e autovetores, por $\phi\sqrt{\Lambda}$, onde ϕ são os autovetores de $\mathbf{\Gamma}(\omega)$ e Λ os respectivos autovalores, de forma que apenas alguns autovalores (os mais importantes) devam ser utilizados, diminuindo a dimensão do problema de geração. Tal procedimento

também foi implementado como em Cheynet (2019) e será investigado com alguns exemplos para geração de campos correlacionados. Neste trabalho uma mistura de cada uma destas opções está implementada para acelerar o processo da geração do vento correlacionado.

5.2.2 Simulação do Vento Correlacionado na dimensão da altura

Primeiramente, o campo de vento é simulado ao longo de uma linha vertical, com 20 pontos criados de 10 a 90 metros de altura, com a lei de potência sendo utilizada para o perfil vertical do vento e um tempo total de simulação de 1800 segundos. Para cada um dos pontos é feito o cálculo da rajada nas direções longitudinal, transversal e vertical, sendo utilizado 1800 linhas espectrais para discretização dos espectros, com a velocidade média do vento considerada de 25 m/s a uma altura de referência de 10 m e com o expoente da lei potencial para definição do perfil de velocidade média utilizado $\alpha = 0,15$. Salienta-se que α tem valor definido por norma de acordo com as condições e características do local do vento a ser simulado, não podendo ser adotado um valor de forma arbitrária. Neste caso, os valores de $\alpha = 0,15$ e valores para turbulência, foram adotados por serem os mesmos utilizados pelo autor Cheynet (2019), para verificar o funcionamento adequado da simulação do vento. Os comprimentos de turbulência adotados para as direções x, y e z são, respectivamente, 170 m, 100 m e 35 m e o desvio padrão de turbulência para as três direções são 2,6m, 2,2 m e 1,56 m. Estes valores são típicos para estruturas de grandes dimensões, entretanto variam um pouco para as indicações dadas por Wang et al. (2018) que coloca que as escalas de comprimento de turbulência para as direções lateral e vertical devam ser da ordem de 1/4 e 1/12 da escala de comprimento de turbulência longitudinal, respectivamente. Com isso, pode-se obter as variações da velocidade média longitudinal (velocidades na direção horizontal x) em diferentes alturas ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 5.6 abaixo.

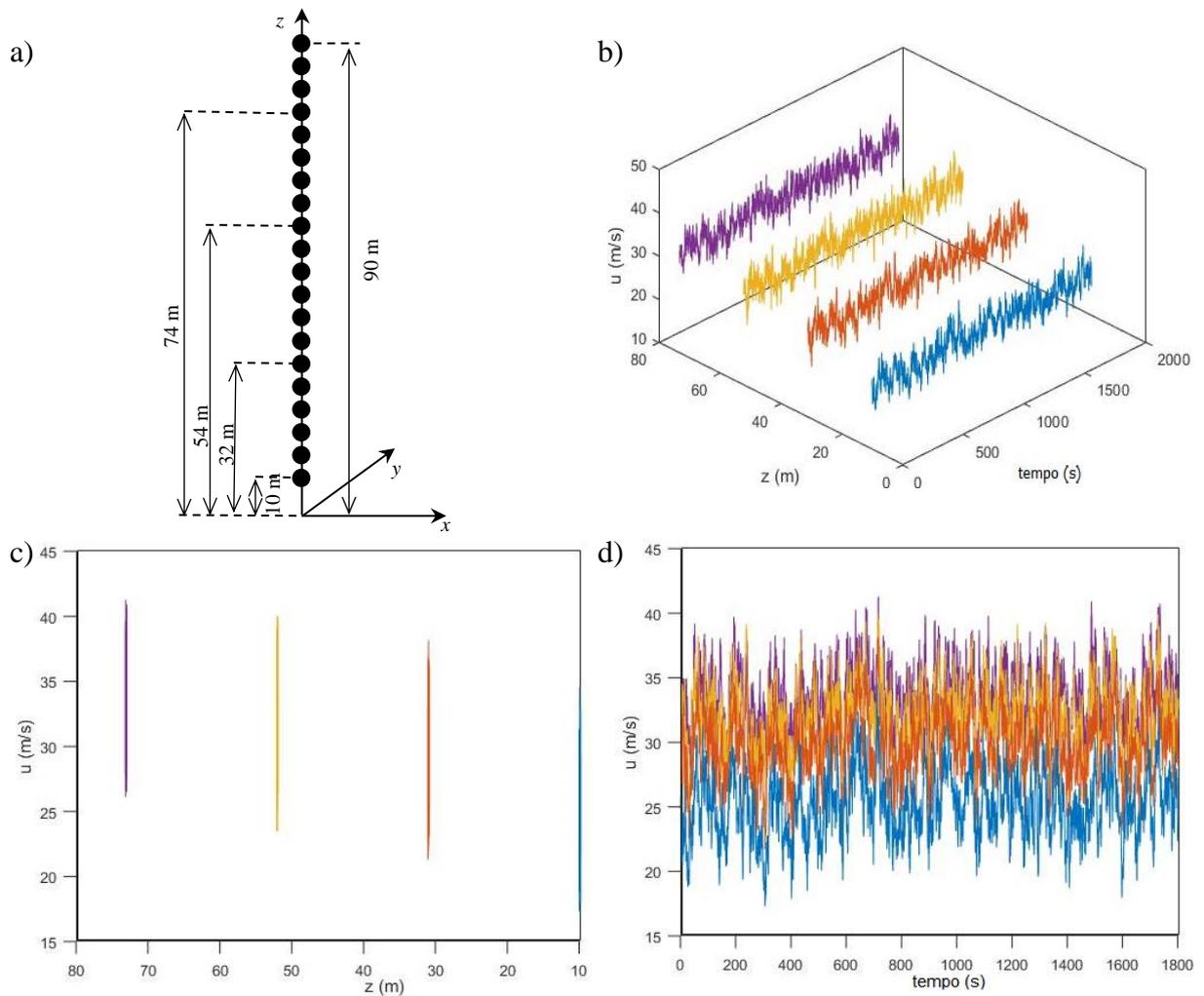


Figura 5.6 – (a) Linha vertical e pontos usados para simular as flutuações da velocidade do vento; (b) Séries de flutuação da velocidade ao longo do tempo e para diferentes alturas; (c) Diferentes alturas e flutuações máximas e mínimas da velocidade do vento; (d) Variações da velocidade do vento ao longo do tempo (percebe-se a correlação com a altura medida).

A Figura 5.6(a) indica a linha vertical com os pontos utilizados para a geração da velocidade do vento. A Figura 5.6(b) mostra a variação da velocidade média (eixo vertical y), para diferentes alturas expressas em metros (eixo z), ao longo do tempo (eixo x), em um total de 1800 segundos. Na Figura 5.6(b) percebe-se que, quanto maior a altura, mais altas as velocidades médias, sendo possível visualizar na Figura 5.6(c) a faixa de variação da velocidade (máximas e mínimas) para cada uma das alturas mostradas. Por fim, na Figura 5.6(d), pode-se verificar novamente que quanto maior a altura mais altas são as velocidades atingidas e verifica-se a variação da velocidade ao longo do tempo, podendo-se extrair a velocidade em cada momento para as diferentes alturas. Também se percebe neste gráfico a forte correlação existente para as velocidades em cada instante (valores altos de velocidade ocorrem simultaneamente em cada altura medida).

É possível obter o perfil vertical de velocidades médias do vento, como mostrado na Figura 5.7, a seguir. Percebe-se, no caso simulado, que a velocidade média do vento é de 25 m/s a 10 metros de altura e cresce devido à turbulência, conforme esperado, juntamente com o aumento da elevação, chegando a quase 35 m/s de velocidade média, a 90 metros de altura.

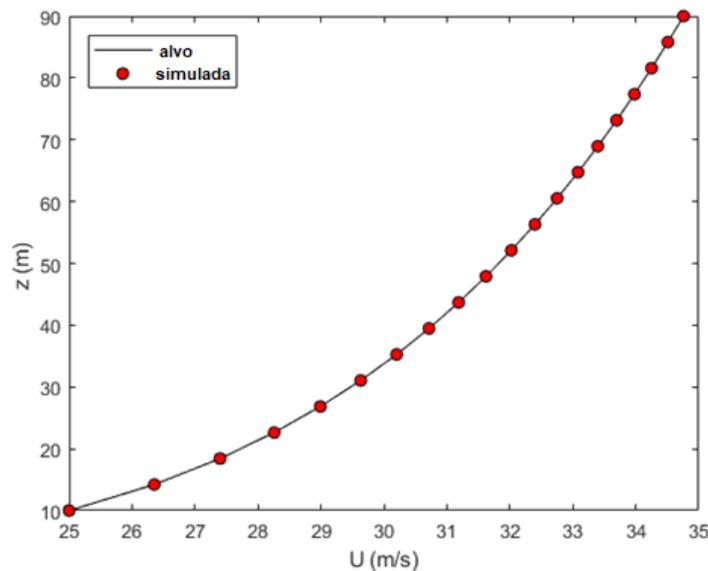


Figura 5.7 – Perfil vertical de velocidade média do vento ao longo da altura.

O código também permite apresentar a intensidade de turbulência, a qual tem por característica ser menor, conforme aumenta a velocidade média do vento, ou seja, para pontos situados a alturas maiores. Neste aspecto, o programa é mais realístico do que caso se considerasse a intensidade de turbulência (TI) constante como é usual em algumas simulações encontradas na literatura. A seguir, a Figura 5.8 mostra o gráfico com as intensidades de turbulência variando conforme a velocidade do vento, sendo I_u , I_v e I_w as direções principal (longitudinal), transversal (lateral) e vertical de incidência do vento, respectivamente.

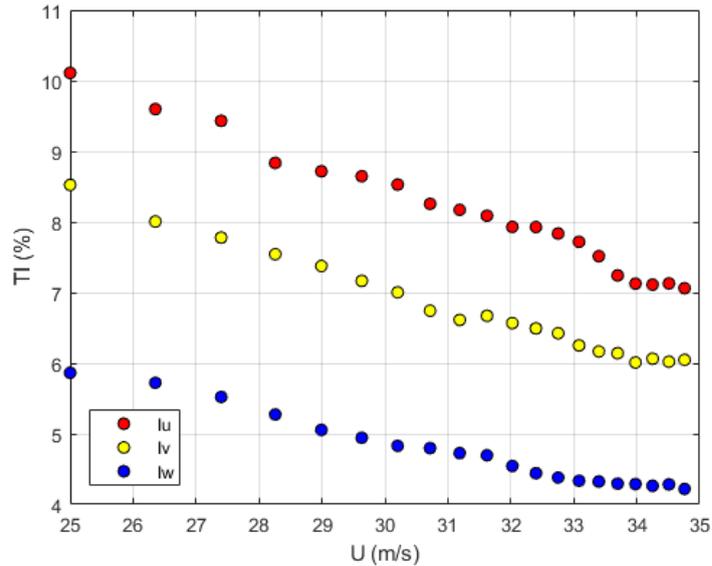


Figura 5.8 – Intensidade de turbulência (TI) conforme velocidade do vento para as direções longitudinal (I_u), lateral (I_v) e vertical (I_w).

Podem também ser visualizados com o programa, para efeitos de verificação e comparação, os espectros calculados (a partir dos sinais de velocidade gerados no tempo) para cada direção e o correspondente espectro de von Kármán utilizado para geração, mostrando que os sinais no tempo da velocidade e seus respectivos espectros tem boa concordância com o espectro utilizado. O código ainda permite a utilização de outros tipos de espectros de velocidade do vento como o espectro de Kaimal. A Figura 5.9 mostra os espectros obtidos com o programa para as componentes longitudinal, lateral e vertical de velocidade do vento em comparação com o espectro de von Kármán para as direções x , y e z (longitudinal, lateral e vertical).

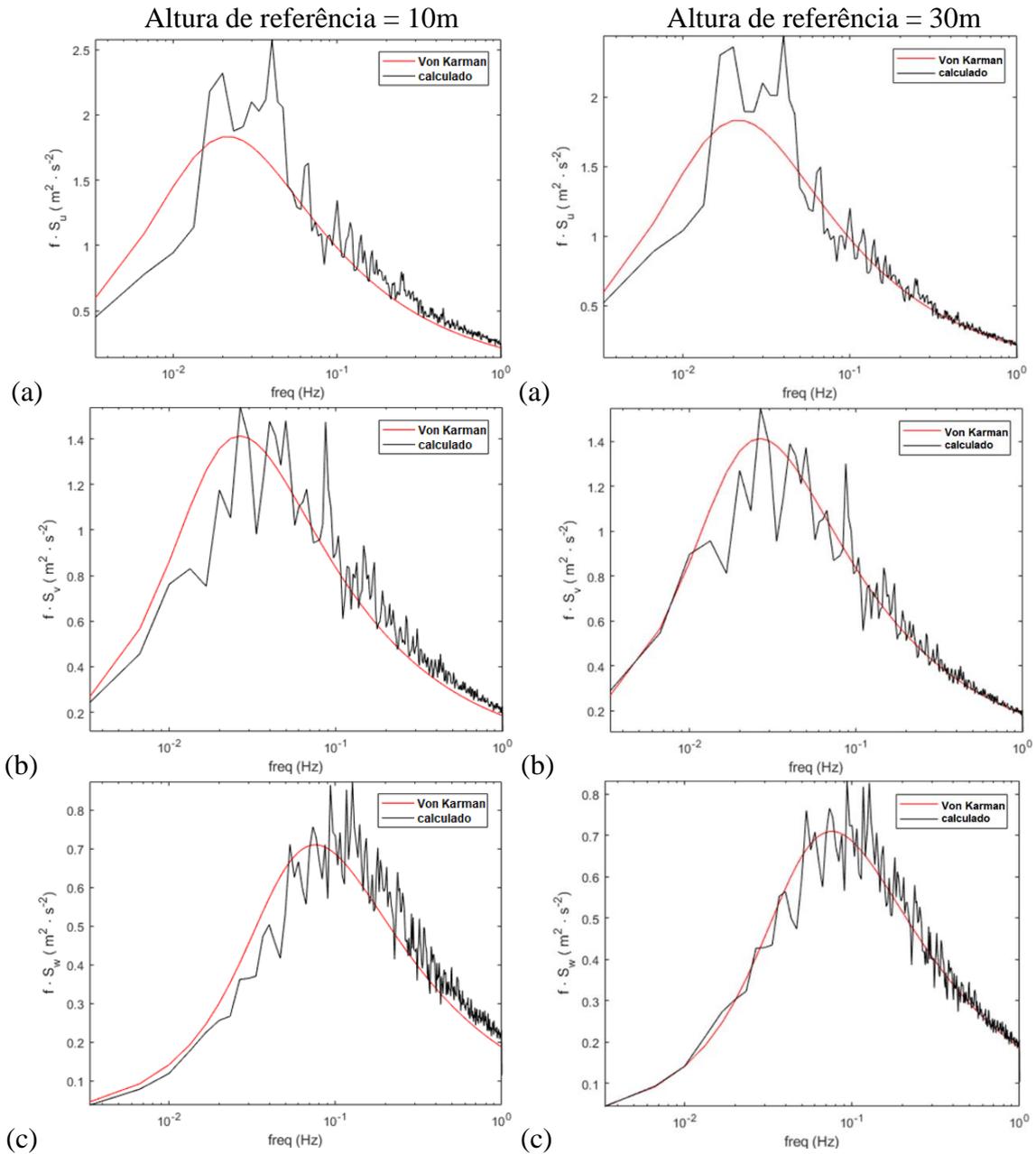


Figura 5.9 – Espectros de velocidade do vento para direções (a) longitudinal, (b) lateral e (c) vertical obtidos dos sinais gerados de velocidade no tempo e a respectiva densidade espectral de von Kárman para as alturas de referência de 10m (esquerda) e 30m (direita).

Como visto, os espectros calculados no tempo apresentam boa concordância com o espectro real, sendo que as pequenas diferenças que ocorrem são justificáveis devido aos espectros terem sido obtidos com número finito de linhas espectrais e devido ao tempo de simulação adotado de 1800 segundos. Quanto melhor o refinamento, maior o número de linhas espectrais e maior o tempo utilizado na simulação, maior seria a aproximação do espectro gerado com o espectro real.

5.2.3 Simulação do Vento Correlacionado em uma superfície

Para verificar o funcionamento do programa utilizado, foi também feita simulação do vento agindo em um plano. Neste caso, o campo de vento é simulado agindo em uma área vertical, como numa fachada de prédio, de 6 x 6 pontos, totalizando 36 pontos no total. Assim, a área é composta pelos pontos distribuídos ao longo de 0 a 20 metros na horizontal e de 10 a 90 metros na vertical, conforme mostrado na Figura 5.10, sendo novamente utilizada a lei de potência para o perfil vertical do vento.

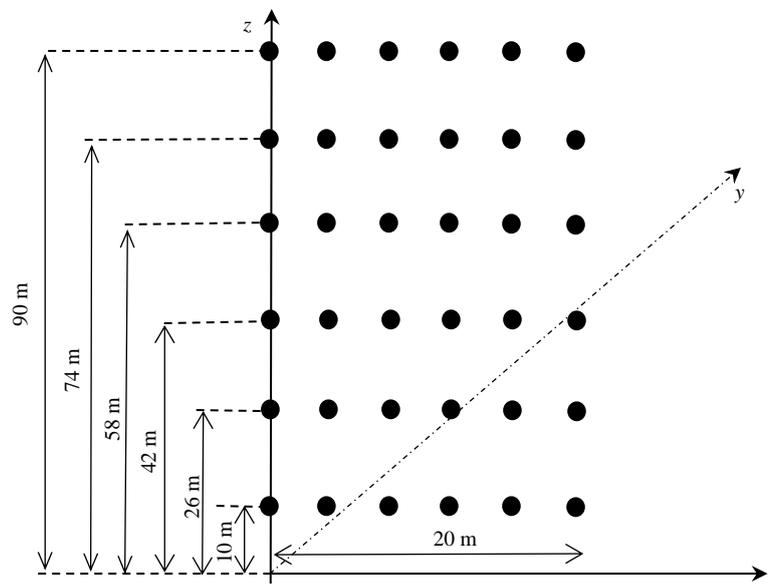


Figura 5.10 – Plano e pontos utilizados para simular as flutuações da velocidade do vento correlacionado.

Novamente, para cada um dos pontos é feito o cálculo da rajada nas três direções sendo utilizado 1800 linhas espectrais para discretização dos espectros, com a velocidade média do vento considerada de 25 m/s a uma altura de referência de 10 m e com o expoente da lei potencial para definição do perfil de velocidade média utilizado $\alpha = 0,15$. Os comprimentos de turbulência também são os mesmos adotados na simulação anterior. Dessa forma, são mostrados na Fig. 5.11 a seguir, a posição dos nós e as variações da velocidade média longitudinal (velocidades na direção horizontal x) para cada um dos pontos da área de ação do vento ao longo do tempo total de simulação de 1800 segundos.

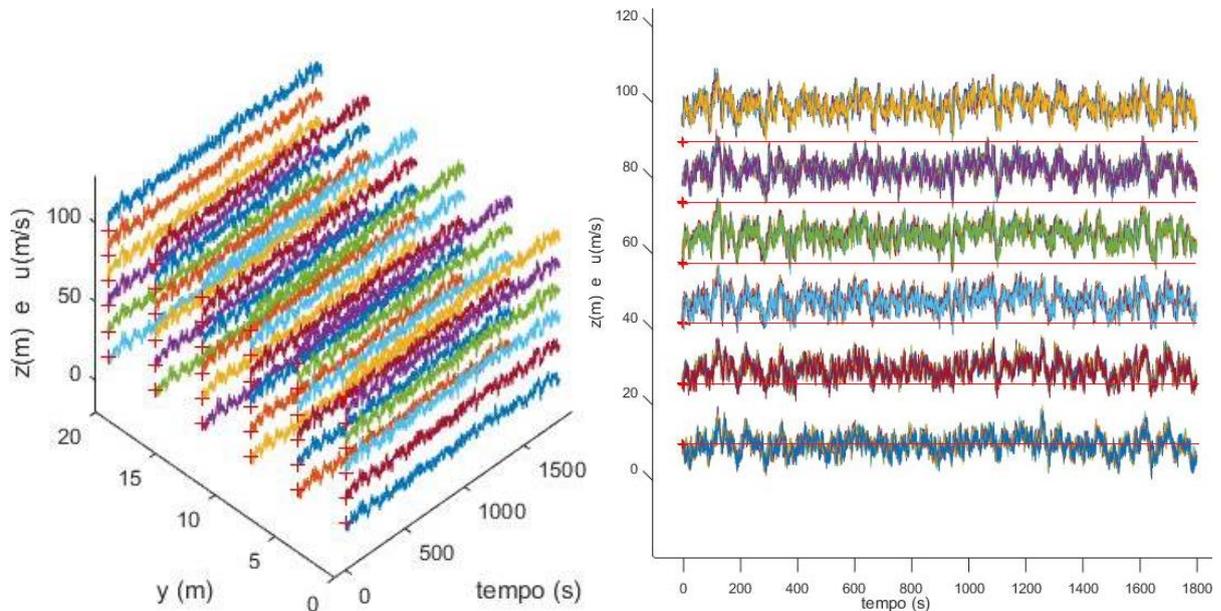


Figura 5.11 – Flutuação da velocidade do vento ao longo do tempo para os diferentes nós.

Nas imagens, nota-se a correlação existente entre os pontos, visto que tanto para pontos distanciados horizontal quanto verticalmente, a variação apresenta diferenças entre os pontos, porém, ocorre de forma semelhante, correlacionada entre eles. Ou seja, no momento em que a velocidade atuante aumenta ou diminui em um ponto, também aumenta ou diminui de forma similar para os pontos próximos a ele. Quanto maior a proximidade, maior é a correlação entre os pontos, conforme mostrado a seguir, na Fig. 5.12. Percebe-se também que, quanto maior a altura, maior é a velocidade média, conforme esperado. Para melhor entendimento quanto a isso, na segunda imagem da Figura 5.11, a partir dos pontos foi traçada uma linha horizontal, a qual corresponde à velocidade média de 25 m/s. Dessa forma, fica mais fácil comparar a variação da velocidade em cada altura. Com isso, percebe-se que nos pontos mais baixos, a variação ocorre em torno da velocidade de 25 m/s e, conforme aumenta a altura, maior fica a velocidade média, como pode-se notar nos pontos mais altos da imagem onde a variação está consideravelmente acima da linha horizontal correspondente à 25 m/s. Isso também é mostrado na Fig. 5.13, a qual traz o perfil vertical de velocidades médias do vento.

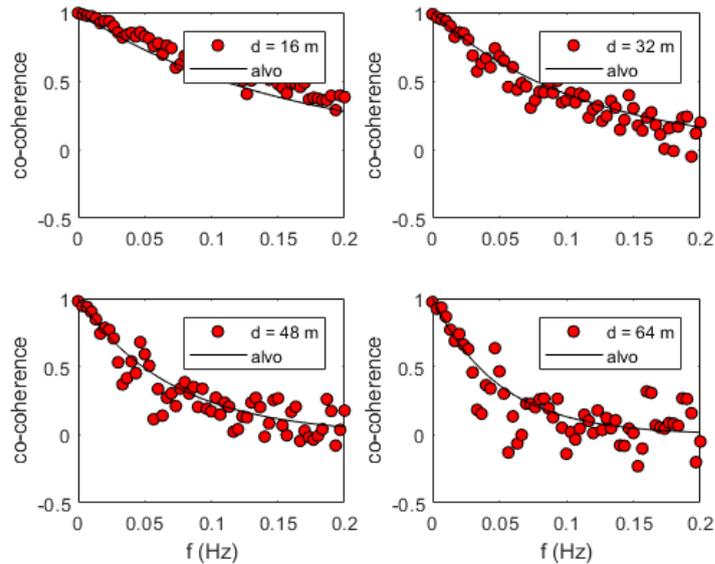


Figura 5.12 – Correlação para diferentes distâncias entre nós do plano onde o vento é simulado.

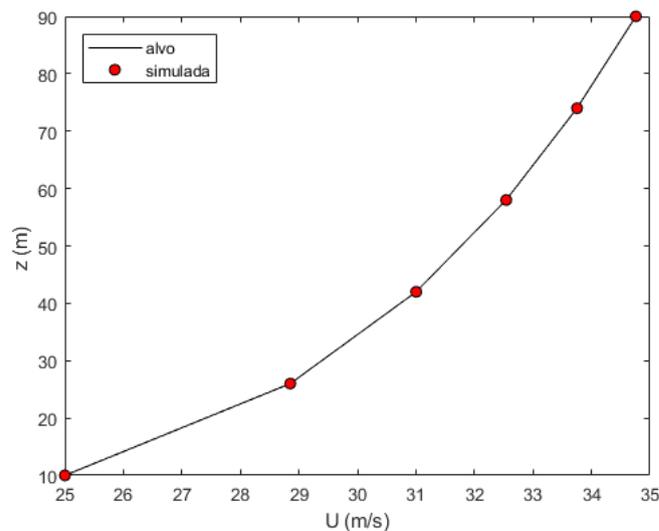


Figura 5.13 – Perfil vertical de velocidade média do vento.

Com o código é possível ainda obter a correlação, utilizando-se dois pontos de referência, um a 10 metros de altura e outro a 90 metros. Isso é mostrado na Fig. 5.14, onde observa-se que para pontos localizados na mesma altura a correlação é maior (valores não inferiores a 0,7, no gráfico superior esquerdo) e, conforme aumenta a distância entre os pontos, menor é a correlação, apesar de ainda haver esta correlação (valores próximos a zero no gráfico superior direito e nos dois inferiores).

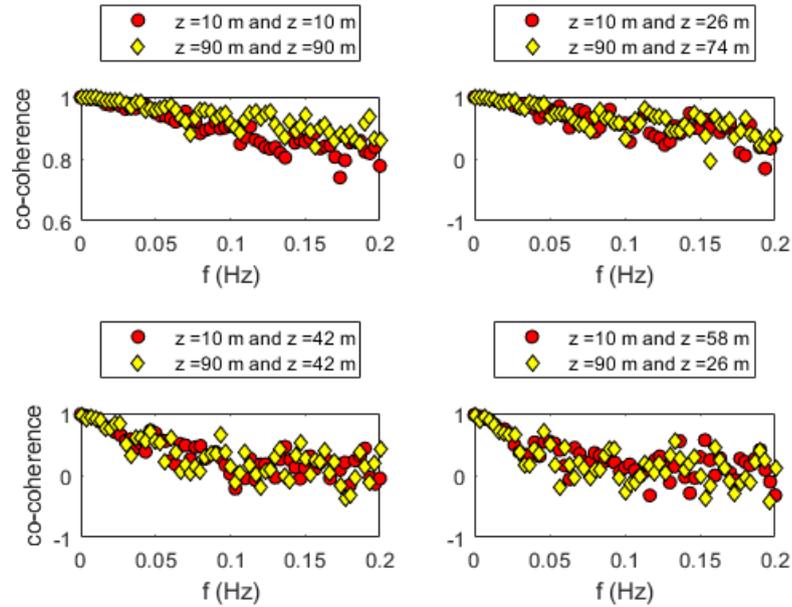


Figura 5.14 – Correlação para pontos a 10 m e 90 m de altura em relação a outros pontos.

Nota-se que a correlação depende da proximidade entre os pontos e que ela é maior para pontos mais elevados, como visto no primeiro dos gráficos onde os nós localizados a 90 metros de altura apresentam maior correlação do que os nós localizados a 10 metros de altura. Isso também tem relação com a intensidade de turbulência do vento que diminui à medida que a altura aumenta. Também fica claro que, para nós localizados na mesma altura, independentemente se a 10 ou 90 metros, a correlação é maior do que quando os nós são de alturas diferentes, e consequentemente mais distantes.

Conforme mostrado nos exemplos, o programa determina as ações do vento seguindo a teoria apresentada de forma satisfatória, obtendo-se resultados coerentes com o esperado e realistas, de acordo com os parâmetros de entrada utilizados. Tais parâmetros, para a realização das simulações, podem ser obtidos para casos de localizações reais, típicas de onde se deseja realmente executar um estudo ou construção, sendo os parâmetros de turbulência definidos com base na velocidade do vento e na altura de referência.

5.3 AÇÃO DO VENTO NAS ESTRUTURAS

Para o cálculo da força de arrasto que age ao longo da torre, o carregamento distribuído é simplificado como cargas concentradas, obtendo-se uma força escalonada ao longo dos nós da estrutura. Considerando como exemplo um elemento n qualquer, com nó inicial j e nó final k , e outro $n + 1$ adjacente com nó inicial k e nó final l , a força de arrasto no nó k da estrutura pode

ser calculada conforme a equação (5.14), onde o coeficiente de arrasto $C_D(\alpha)$ é função do ângulo de ataque α e do número de Reynolds (Re) para a velocidade média $\bar{U}(z)$ na altura z onde se está aplicando a ação do vento e a área A_n é calculada considerando as áreas das duas metades adjacentes ao nó k de aplicação da força, conforme ilustrado na Figura 5.15.

$$F_n = A_n C_D(Re) \rho [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]^2 \quad (5.14)$$

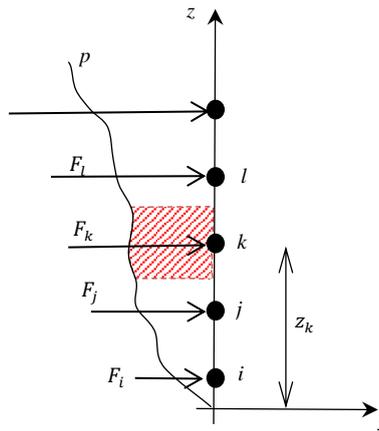


Figura 5.15 – Aplicação de forças do vento relacionado ao perfil de pressão e à área de influência do ponto em questão.

Para calcular o coeficiente de arrasto, segue-se as recomendações da NBR 6123 da ABNT (1988), para perfis circulares (no caso dos exemplos a serem analisados), conforme valores indicados na Tabela 5.1 abaixo. O número de Reynolds para cada elemento é obtido com a equação (5.15), considerando o diâmetro externo do elemento (D) e a velocidade característica do vento (V_k) atuando no ponto médio do elemento.

$$Re = 70000 V_k D \quad (5.15)$$

Tabela 5.1 - Valores dos coeficiente de arrasto.

Número de Reynolds	Coeficiente de arrasto
$Re < 4,2 \times 10^5$	1,2
$4,2 \times 10^5 \leq Re < 8,4 \times 10^5$	0,6
$8,4 \times 10^5 \leq Re < 2,3 \times 10^6$	0,7
$2,3 \times 10^6 \leq Re$	0,8

Já para a força do vento atuando sobre as pás do aerogerador, o cálculo é realizado em termos da força de sustentação e da força de arrasto conforme os princípios aerodinâmicos, sendo feito

com base nos estudos de Jeong et al. (2013). No sistema local da pá, pode-se identificar dois ângulos que são o ângulo de *pitch* (ψ), que a corda da pá do aerogerador faz com o eixo local y_L do elemento, e o ângulo γ , que a velocidade relativa do vento (V_{rel}) faz também com o eixo local do elemento x_L , conforme apresentado na Figura 5.16.

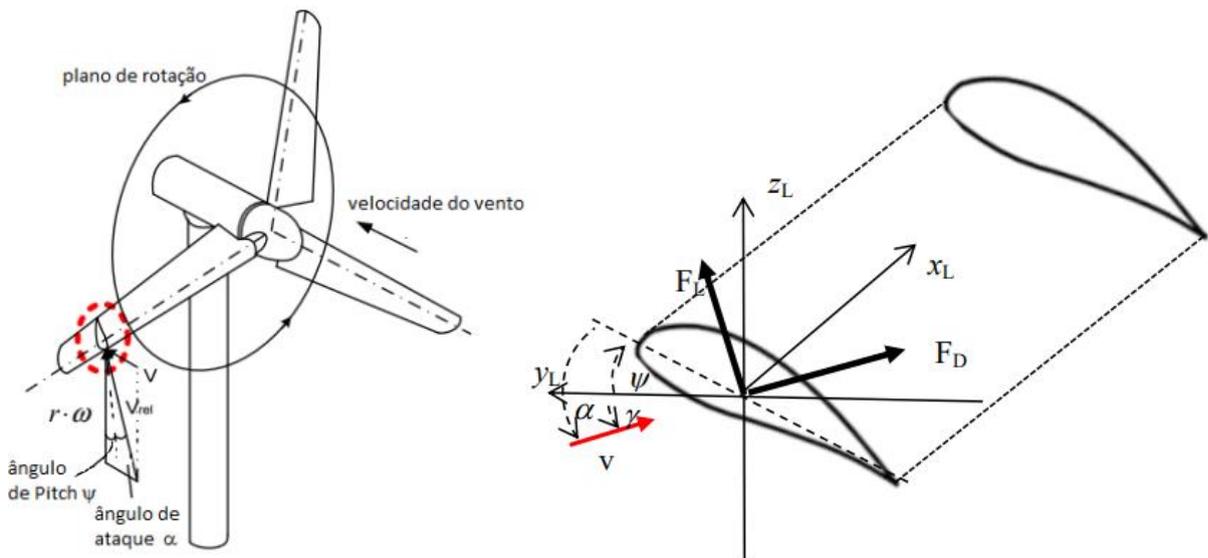


Figura 5.16 – Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador e esforços aerodinâmicos no sistema local do elemento de pá do aerogerador (JEONG et al., 2013).

A velocidade relativa (V_{rel}) é a composição vetorial da velocidade angular da pá ω (à distância da raiz da pá (r) em que se faz a avaliação), sendo calculada com a Equação (5.16), onde V é a velocidade do vento incidindo na pá e o ângulo de ataque de V_{rel} em relação ao perfil da pá é definido como $\alpha = \psi + \gamma$, conforme ilustrado também na Figura anterior.

$$V_{rel} = [(\omega r)^2 + V^2]^{1/2} \quad (5.16)$$

Para o cálculo da força de arrasto (F_D) e de sustentação (F_L), são utilizadas as expressões (5.17) e (5.18) e, para isso, os valores dos coeficientes são obtidos por interpolação de curvas experimentais para um aerofólio NACA23012, ilustrado na Figura 5.17 típico para aerogeradores da dimensão da que será avaliada. Neste trabalho será assumido uma pá com um único tipo de perfil aerodinâmicos ao longo de seu comprimento, entretanto para pás modernas, este perfil varia ao longo do comprimento de forma a maximizar o desempenho da pá, com a diminuição do comprimento da corda e aumento do ângulo de *pitch* à medida que se distancia da raiz da pá. Assume-se que esta aproximação não traga maiores diferenças já que as análises serão feitas numa condição de vento severo em que as pás do aerogerador estão paradas e

embandeiradas e oferecem o menor arrasto e sustentação. O modelo é baseado na pá WINDPACT 1.5MW e possui uma corda média de 1,8m (0,98m na ponta da pá a 2,6m próximo à raiz).

$$F_D = A_p C_D(\alpha) \rho [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]^2 \quad (5.17)$$

$$F_L = A_p C_L(\alpha) \rho [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]^2 \quad (5.18)$$

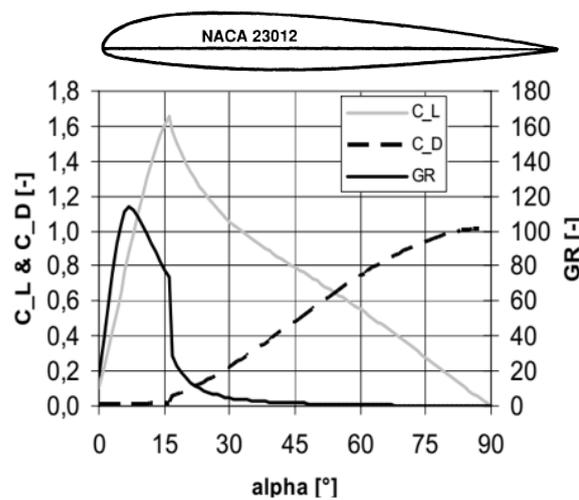


Figura 5.17 – Coeficientes aerodinâmicos de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) como função do ângulo de ataque (α) para o aerofólio NACA23012 (GUNDTOFT, 2009).

Por fim, para a obtenção das forças no sistema local do elemento de pá, calculam-se as componentes das forças aerodinâmicas neste sistema de coordenadas, como mostrado nas equações (5.19), (5.20) e (5.21), as quais são posteriormente rotacionadas para o sistema global de coordenadas do aerogerador.

$$F_{x_L} = 0 \quad (5.19)$$

$$F_{y_L} = -F_D \cos(\gamma) + F_L \sin(\gamma) \quad (5.20)$$

$$F_{z_L} = F_D \sin(\gamma) + F_L \cos(\gamma) \quad (5.21)$$

Já no domínio da frequência, transforma-se o espectro de velocidade do vento $S_v(f)$ em espectro de força $S_F(f)$, podendo o espectro de força ser representado de forma adequada a

partir das informações das forças e do espectro de velocidades, como na equação (5.22), na qual C é o coeficiente resultante de arrasto e/ou sustentação do corpo a ser calculado e A_n é a área de aplicação da força do vento no n -ésimo elemento (SIMIU; SCANLAN, 1996; GURLEY; KAREEM, 1993).

$$S_F(y, z, f) = (\rho C \bar{U}(z) A_n)^2 S_v(y, z, f) \quad (5.22)$$

Com isso, tem-se os componentes necessários à análise dinâmica de torres de aerogeradores no domínio do tempo e da frequência para este estudo. Cabe destacar que a admitância aerodinâmica, $\chi_a(f)$, não aparece nas equações para cálculo da força apresentadas tendo sido considerada como unitária, a favor da segurança. A admitância aerodinâmica, função que varia entre 0 e 1, dependente da frequência, é utilizada para levar em conta que flutuações rápidas na velocidade do vento não implicam em flutuações proporcionais na força (LOREDO-SOUZA et al., 2019). Ou seja, a utilização dela faz com que a parte flutuante da carga seja filtrada, não sendo as flutuações na velocidade do vento totalmente convertidas em flutuações na força. Considerando-a unitária, tem-se uma simplificação conservadora, visto que não ocorre esta filtragem e então toda a flutuação da velocidade do vento é refletida em flutuação da força.

Destaca-se ainda que há também fontes de excitação transversal à direção principal de deslocamento do vento, sendo a mais comum aquela associada ao desprendimento de vórtices. Diversas estruturas podem apresentar deslocamentos na direção transversal ao fluxo do vento devido a isso, sendo mais significativos os efeitos no caso de estruturas com baixa capacidade de amortecimento.

O desprendimento de vórtices ocorre quando o fluxo do vento, ao passar por uma estrutura, é dividido e se separa da estrutura, ao invés de contornar toda ela. O resultado é o surgimento de um espaço entre a face de barlavento e o fluxo do vento dividido provocando uma pressão negativa, que gera redemoinhos (vórtices), conforme ilustra a Figura 5.18. Esses redemoinhos não surgem simultaneamente nos dois lados opostos da estrutura, ficando ela submetida a uma pressão no sentido transversal à direção principal do fluxo de vento. Com esta pressão a estrutura se desloca, ocorrendo o surgimento de vórtices na face oposta. A distribuição assimétrica da pressão ao redor da estrutura resulta em uma força transversal que se alterna, conforme os vórtices são originados e desprendidos. Com isso, a pressão transversal agindo na estrutura se torna periódica, não ocorrendo de forma sincronizada nos dois lados e ao longo de toda ela, mas sim, cada vez atuando em um lado e de forma e intensidade diferente, dependendo

do vento, e sua turbulência, que incide em cada ponto da estrutura (MENDIS et al., 2007).

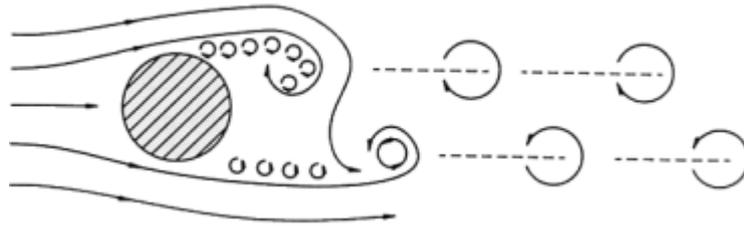


Figura 5.18 – Esquema do desprendimento cadenciado de vórtices numa estrutura de seção circular.

Segundo a NBR 6123 da ABNT (1988), os vórtices podem produzir movimentos elevados, transversais à direção do vento, se uma das frequências naturais da estrutura ou de um elemento dela for igual à frequência de desprendimento de um par de vórtices. A velocidade crítica do vento (V_{cr}), para a qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices coincide com uma das frequências naturais da estrutura, é obtida com a expressão $V_{cr} = fL_c/S_t$, onde f é a frequência natural da estrutura, L_c é a dimensão característica e S_t é o número de Strouhal, o qual depende do formato da estrutura e do número de Reynolds. Efeitos dinâmicos na estrutura são possíveis se a velocidade crítica encontrada for igual ou inferior à velocidade média do vento prevista para o local da edificação. Porém, como a velocidade do vento varia ao longo da altura (em função do perfil de velocidade do vento), o mesmo ocorrerá com a frequência de desprendimento de vórtices, causando uma sensível diminuição dos efeitos sobre a estrutura, uma vez que não há sincronismo na força excitadora.

Desse modo, sendo a torre do gerador eólico uma estrutura alta, a velocidade do vento ao longo dela, assim como a frequência de desprendimento de vórtices, irão variar com a altura, causando um assincronismo na excitação por vórtices e, conseqüentemente, minimizando seus efeitos na estrutura. Além disso, conforme mencionado, os efeitos de vibrações causadas por vórtices são minimizados para estruturas com certo amortecimento estrutural justificando a não inclusão deste fenômeno e simplificação do processo de análise.

6. VERIFICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SIMULAÇÃO ESTRUTURAL NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Para validação dos algoritmos, baseado no exemplo 11.20 apresentado por Hurty e Rubinstein (1967), a análise de um sistema estrutural simples é feita no domínio do tempo e no domínio da frequência com o objetivo de determinar o nível de precisão alcançada por cada um dos métodos. O sistema simples de 3 graus de liberdade submetido, à uma excitação de aceleração na sua base, é avaliado quanto às respostas de deslocamento. O sistema é o indicado na Figura 6.1 e apresenta apenas graus de liberdade de translação horizontal, sem graus de liberdade de rotação. O exemplo serve como *Benchmark* para os métodos, visto que não se encontrou na literatura algo similar que pudesse ser utilizado como padrão para verificação.

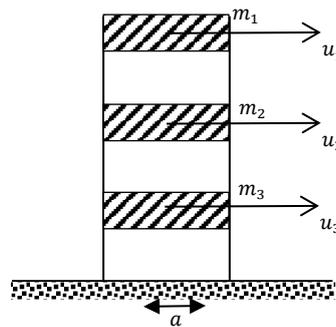


Figura 6.1 – Sistema de 3 graus de liberdade sujeito à excitação de aceleração do tipo ruído branco na sua base.

As matrizes de massa e rigidez são dadas pelas Equações (6.1) e (6.2) respectivamente.

$$[M] = \begin{bmatrix} 8.40 \times 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 5.60 \times 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 8.40 \times 10^5 \end{bmatrix} kg \quad (6.1)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 6.124 \times 10^8 & -6.124 \times 10^8 & 0 \\ -6.124 \times 10^8 & 1.458 \times 10^9 & -8.456 \times 10^8 \\ 0 & -8.456 \times 10^8 & 1.837 \times 10^9 \end{bmatrix} N/m \quad (6.2)$$

Para o amortecimento do sistema, as razões de amortecimento para cada modo de vibração escolhidos são definidas como $\zeta_1 = 0,00122$, $\zeta_2 = 0,00196$ e $\zeta_3 = 0,005$. As frequências naturais não amortecidas do sistema foram avaliadas e resultaram em $\omega_1 = 15,1$ rad/s $\omega_2 = 38,5$ rad/s e $\omega_3 = 61,7$ rad/s. A aceleração na base é do tipo ruído branco com intensidade

constante de $\psi_0=0,00557 \text{ (m/s}^2\text{)/(rad/s)}$ definida numa faixa de frequências até 50 vezes a maior frequência natural do sistema.

O sinal da aceleração da base no domínio da frequência é passado para o domínio do tempo com a utilização do método proposto por Shinozuka e Jan (1972), conforme mostrado na equação (6.3), sendo utilizada a excitação definida do domínio da frequência, nesse caso $S_{\ddot{x}}(\omega_i) = \psi_0$, como dado de entrada para transformar o sinal para o domínio do tempo.

$$\ddot{x}(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S_{\ddot{x}}(\omega_i)d\omega} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (6.3)$$

Com a equação, obtém-se o sinal da aceleração imposta pela excitação em função do tempo $\ddot{x}(t)$ em m/s^2 , sendo N o número de intervalos da banda de frequências ω_i sendo somadas, $d\omega$ o incremento ou intervalo de frequências em rad/s e φ_i o ângulo de fase aleatório, em radianos, com distribuição uniforme entre 0 e 2π . Após isso, são usados os métodos no domínio do tempo e da frequência para obtenção dos deslocamentos ao longo do tempo de simulação.

Inicialmente, as soluções foram obtidas pelo método de Newmark no domínio do tempo, com tempo total de simulação de 60 segundos. No domínio da frequência, as soluções foram obtidas com integração pela Regra Trapezoidal e com integração de Gauss-Kronrod (SHAMPINE, 2008). É importante salientar que os resultados obtidos com o método de integração de Gauss-Kronrod não irão depender dos parâmetros de entrada para simulação, visto que este método possui um auto ajuste em seu passo de integração, identificando a necessidade de um passo maior ou menor, de acordo com a singularidades da curva a ser integrada a cada passo. Desse modo, em regiões onde o passo pode ser maior, a simulação acaba sendo mais rápida e onde necessário, com passo menor, o método também apresenta boa precisão para picos de ressonância de frequências naturais da estrutura, onde se requer um passo de integração bem pequeno.

Nos primeiros testes, utilizando-se frequência mínima de 0 Hz e máxima de 500 Hz no domínio da frequência e intervalos ou passos de tempo de 0,001s e 0,002s, a Tabela 6.1 foi criada para sintetizar os dados de entrada e de saída de deslocamentos.

Tabela 6.1 - Dados de 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência, com a Regra Trapezoidal e com Gauss-Kronrod.

Domínio	Tempo	Tempo	Frequência	Frequência
Método	Newmark	Newmark	Regra Trapezoidal	Gauss-Kronrod
Intervalo ou passo de integração	0,001 s	0,002 s	0,1 Hz	0,1 Hz
Nº de pontos no tempo ou de linhas espectrais	Nº de pontos no tempo = 60000	Nº de pontos no tempo = 30000	Nº de linhas espectrais = 5000	Nº de linhas espectrais = 5000
Tempo de processamento (s)	1583,2	7,85051	5,8985	6,30422
Desl. RMS u_1 (m)	0,037408	0,039222	0,028783	0,036710
Desl. RMS u_2 (m)	0,025649	0,026911	0,019970	0,025464
Desl. RMS u_3 (m)	0,013318	0,014053	0,011054	0,014430

Conforme mostrado na tabela anterior, quanto menor o passo de integração no tempo e maior o número de pontos no tempo, mais o resultado se aproxima dos resultados obtidos no domínio da frequência com o método de Gauss-Kronrod. Além disso, comparando-se os resultados obtidos com a regra trapezoidal no domínio da frequência, quanto maior o número de linhas espectrais, maior é a aproximação quanto ao resultado obtido com Gauss-Kronrod, como será mostrado na sequência.

Mais testes foram realizados, utilizando-se frequência mínima de 0 Hz e máxima de 100 Hz (10 vezes a maior frequência natural do sistema) no domínio da frequência, e com passo de tempo de 0,01 segundo no domínio do tempo. Como a aceleração inicial de excitação do sistema é aleatória do tipo ruído branco e criada com base nos dados de frequência, isso também interfere nos resultados obtidos no domínio do tempo. Novamente, foi criada a Tabela 6.2 com dados de entrada e de saída de deslocamentos.

Tabela 6.2 - Dados de 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal.

Domínio	Tempo	Frequência	Tempo	Frequência
Método	Newmark	Regra Trapezoidal	Newmark	Regra Trapezoidal
Intervalo ou passo de frequência para excitação	0,1 Hz		0,01 Hz	
Nº de pontos no tempo ou de linhas espectrais	Nº de pontos no tempo = 6000	Nº de linhas espectrais = 1000	Nº de pontos no tempo = 6000	Nº de linhas espectrais = 10000
Tempo de processamento (s)	0,386540	0,0433873	2,55194	0,266720
Desl. RMS u_1 (m)	0,054466	0,033466	0,044013	0,035570
Desl. RMS u_2 (m)	0,037334	0,023161	0,030263	0,024693
Desl. RMS u_3 (m)	0,019362	0,012704	0,016373	0,014070

Como visto na tabela, com a geração da aceleração com maior número de linhas espectrais, mais próximos os resultados tendem a ficar daqueles obtidos com o método de Gauss-Kronrod, mostrados na Tabela 6.1. Além da maior proximidade em comparação ao resultado mencionado, nota-se também que o tempo para obtenção dos resultados aumenta com o maior número de linhas espectrais adotado. Por fim, mais testes foram realizados, utilizando-se desta vez frequência mínima de 0 Hz e máxima de 200 Hz e com passo de tempo de 0,005 segundos no domínio do tempo. Os dados de entrada e de saída de deslocamento são exibidos na sequência na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Dados de mais 2 testes no domínio do tempo com Newmark (60 segundos), e 2 no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal.

Domínio	Tempo	Frequência	Tempo	Frequência
Método	Newmark	Regra Trapezoidal	Newmark	Regra Trapezoidal
Intervalo ou passo de frequência para excitação	0,1 Hz		0,01 Hz	
Nº de pontos no tempo ou de linhas espectrais	Nº de pontos no tempo = 12000	Nº de linhas espectrais = 2000	Nº de pontos no tempo = 12000	Nº de linhas espectrais = 20000
Tempo de processamento (s)	1,02602	0,062497	698,176	2,72322
Desl. RMS u_1 (m)	0,048477	0,030369	0,042195	0,035176
Desl. RMS u_2 (m)	0,033270	0,021050	0,028928	0,024427
Desl. RMS u_3 (m)	0,017481	0,011611	0,015085	0,013947

Para encerrar a comparação dos resultados, foi feita a Tabela 6.4 resumindo os resultados

obtidos no domínio do tempo com Newmark e os resultados obtidos no domínio da frequência com o método de Gauss-Kronrod. Do mesmo modo, também foi criada a Tabela 6.5 para resumir e comparar os resultados obtidos no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal e com Gauss-Kronrod. Nelas, os dados são dispostos de modo a evidenciar que quanto melhor o refinamento das análises, menor é a diferença entre os resultados obtidos entre os métodos. Isso também demonstra que, para métodos que necessitam de parâmetros de refinamento para a integração, o nível deste refinamento é de extrema importância, podendo fazer toda a diferença na precisão das respostas obtidas.

Tabela 6.4 -Resumo das simulações no domínio do tempo com Newmark (60 segundos) e comparativo em relação aos resultados no domínio da frequência com Gauss-Kronrod.

Parâmetros da aceleração de excitação	<i>nls</i> da excitação	Passo de tempo Δt (s)	Nº de pontos no tempo	u_1 (m)	% diferença com Gauss	u_2 (m)	% diferença com Gauss	u_3 (m)	% diferença com Gauss
$\Delta f = 0,1\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 100\text{ Hz}$	1000	0,01	6000	0,05447	48,37	0,03733	46,61	0,01936	34,18
$\Delta f = 0,1\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 200\text{ Hz}$	2000	0,005	12000	0,04848	32,05	0,03327	30,66	0,01748	21,14
$\Delta f = 0,01\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 100\text{ Hz}$	10000	0,01	6000	0,04401	19,89	0,03026	18,85	0,01637	13,47
$\Delta f = 0,01\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 200\text{ Hz}$	20000	0,01	12000	0,04220	14,94	0,02893	13,60	0,01509	4,54
$\Delta f = 0,1\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 500\text{ Hz}$	5000	0,002	30000	0,03922	6,84	0,02691	5,68	0,01405	2,61
$\Delta f = 0,1\text{Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 500\text{ Hz}$	5000	0,001	60000	0,03741	1,90	0,02565	0,73	0,01332	7,71
Resultados com Gauss-Kronrod dom. da freq.:				0,03671	-	0,02546	-	0,01443	-

Tabela 6.5 -Resumo das simulações no domínio da frequência com a Regra Trapezoidal e comparativo em relação aos resultados com Gauss-Kronrod.

Parâmetros da aceleração de excitação	<i>nls</i> da excitação	Passo de freq. Δf (Hz)	u_1 (m)	% diferença com Gauss	u_2 (m)	% diferença com Gauss	u_3 (m)	% diferença com Gauss
$\Delta f = 0,1\text{ Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 500\text{ Hz}$	5000	0,1	0,02878	-21,59	0,01997	-21,58	0,01105	-23,40
$\Delta f = 0,1\text{ Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 200\text{ Hz}$	2000	0,1	0,03037	-17,27	0,02105	-17,33	0,01161	-19,54
$\Delta f = 0,1\text{ Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 100\text{ Hz}$	1000	0,1	0,03347	-8,84	0,02316	-9,04	0,01270	-11,96
$\Delta f = 0,01\text{ Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 200\text{ Hz}$	20000	0,01	0,03518	-4,18	0,02443	-4,07	0,01395	-3,35
$\Delta f = 0,01\text{ Hz}$; $f_{\min} = 0$ e $f_{\max} = 100\text{ Hz}$	10000	0,01	0,03557	-3,11	0,02469	-3,03	0,01407	-2,49
Resultados com Gauss-Kronrod:			0,03671	-	0,02546	-	0,01443	-

Na sequência, são mostradas tabelas com respostas de deslocamento médio encontrados com diferentes quantidades de simulações no domínio do tempo a fim de evidenciar que utilizando-se uma amostra ou a média de várias amostras o resultado será próximo. O objetivo deste teste é avaliar se a utilização de apenas uma simulação no domínio do tempo para o caso de um problema mais complexo (torre de aerogerador completa no capítulo seguinte 7) poderá ser comparável aos resultados obtidos pela integração no domínio da frequência. Nestes casos mais complexos, será inviável calcular médias de diversas simulações independentes no tempo.

A primeira das tabelas, Tabela 6.6, está comparando o resultado apresentado na primeira coluna da Tabela 6.3, com frequência para geração da excitação de 0hz a 200hz, passo de frequência 0,1Hz, e 2000 linhas espectrais, tempo de simulação 60s, passo de tempo de 0,005s e 12000 pontos no tempo. Na Tabela 6.6, tem-se os resultados de deslocamento RMS obtidos com 1 simulação e com a média de 10, 30, 50, 70, 100, 150 e 200 simulações.

Tabela 6.6 – Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 60 segundos, passo de tempo 0,005s e 12000 pontos no tempo.

Simulações	1	10	30	50	70	100	150	200
u₁	0,048477	0,047144	0,046680	0,047189	0,047318	0,047152	0,046750	0,046865
u₂	0,03327	0,032357	0,032040	0,032389	0,032477	0,032363	0,032088	0,032167
u₃	0,017481	0,017006	0,016855	0,017031	0,017076	0,017018	0,016877	0,016916
Tempo(s)	1,02602	5,31477	16,2055	22,8558	31,2297	44,1609	66,5268	88,1027

Obviamente, um maior tempo de simulação deve trazer uma melhor consistência de dados e pode incluir picos que irão influenciar na resposta final da estrutura. No entanto, muitas vezes simulações com muito tempo se tornam inviáveis devido ao grande esforço computacional que podem exigir. Desse modo, na segunda tabela, Tabela 6.7, o tempo de simulação foi aumentado de 60s para 300s, a fim de verificar se a diferença seria pequena com esse aumento no tempo de simulação.

Tabela 6.7 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 300 segundos, passo de tempo 0,005s e 60000 pontos no tempo.

Simulações	1	10	50	100	200
u₁	0,047641	0,048175	0,048250	0,048236	0,048196
u₂	0,032717	0,033083	0,033134	0,033124	0,033097
u₃	0,017283	0,017473	0,017500	0,017495	0,017480
Tempo (s)	1,89417	16,9285	85,8230	175,108	352,319

Percebe-se que há diferença, porém as médias dos valores de deslocamentos encontrados com mais simulações se mantêm similares às médias de deslocamentos encontrados com menos simulações e também aos resultados obtidos com simulações de menos tempo. Além disso, percebe-se também na última linha das tabelas 6.6 e 6.7 que para simulações com 300 segundos o tempo gasto para a obtenção dos resultados teve um aumento considerável.

Para a próxima tabela, foram usados os mesmos parâmetros de entrada utilizados para a coluna 2 da Tabela 6.1. Ou seja, a Tabela 6.8 está comparando resultados obtidos com frequências de 0 Hz a 500 Hz, passo de frequência 0,1 Hz e 5000 linhas espectrais para geração da excitação e simulação de 60 segundos, passo de tempo de 0,002s e 30000 pontos no tempo.

Tabela 6.8 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades de simulações de 60 segundos, passo de tempo 0,002s e 30000 pontos no tempo.

Simulações	1	10	100	150	200
u₁	0,039222	0,043594	0,042821	0,042963	0,042549
u₂	0,026911	0,029904	0,029376	0,029473	0,029190
u₃	0,014053	0,015591	0,015329	0,015379	0,015235
Tempo (s)	7,85051	23,9572	236,202	375,655	688,577

Neste último caso, percebe-se que a diferença do resultado com apenas uma simulação foi maior em relação aos resultados da média de várias simulações e, comparando-se os resultados da média de várias simulações entre eles, foram obtidos resultados próximos. Nota-se também que com o melhor refinamento dos parâmetros de entrada, os resultados ficaram mais próximos daqueles obtidos no domínio da frequência pelo método de Gauss-Kronrod, como já destacado anteriormente. Isso fica ainda mais evidente nas tabelas a seguir que apresentam resultados médios obtidos para diferentes quantidades de simulações e de diferentes durações, as quais têm praticamente os mesmos parâmetros de entrada utilizados para a tabela anterior, com frequências de 0 Hz a 200 Hz e passo de frequência de 0,1 Hz para geração da força de excitação, sendo que o passo de tempo é de 0,002s para a Tabela 6.9 e foi alterado para 0,001s para a Tabela 6.10.

Tabela 6.9 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades e tempos de simulação, com passo de tempo 0,002s.

Simulações	10	10	10	10	15	15	15	20
Tempo simul. (s)	100	120	150	200	100	120	150	150
u₁	0,037681	0,037154	0,036997	0,036091	0,037323	0,036842	0,036729	0,036628
u₂	0,025840	0,025480	0,025373	0,024753	0,025595	0,025267	0,025190	0,025121
u₃	0,013440	0,013256	0,013202	0,012886	0,013317	0,013149	0,013110	0,013075
Tempo (s)	17,5711	22,8772	28,5697	37,5470	27,3874	32,5314	40,4025	54,8036

Tabela 6.10 - Comparação dos resultados médios dos valores RMS obtidos no domínio do tempo com diferentes quantidades e tempos de simulação, com passo de tempo 0,001s.

Simulações	10	10	10	10	15	15	15	20
Tempo simul. (s)	100	120	150	200	100	120	150	150
u₁	0,037202	0,036764	0,036590	0,035694	0,036844	0,036450	0,036322	0,036221
u₂	0,025511	0,025212	0,025093	0,024480	0,025266	0,024997	0,024910	0,024841
u₃	0,013262	0,013109	0,013049	0,012736	0,013139	0,013002	0,012957	0,012922
Tempo (s)	38,9170	49,1556	60,3390	1430,39	60,1116	73,5829	102,998	378,366

Também foi verificado o quanto há de diferença nos resultados com apenas uma simulação no domínio do tempo, porém com tempo de simulação maior. Os resultados são exibidos na Tabela 6.11 e, conforme pode-se verificar, foram encontrados resultados similares também comparando-se com a primeira coluna da Tabela 6.3. Foram utilizados para geração da força de excitação $f_{\min} = 0$ Hz, $f_{\max} = 200$ Hz, passo de frequência $\Delta f = 0,1$ Hz, 2000 linhas espectrais e o passo de tempo de integração $\Delta t = 0,005$ s.

Tabela 6.11 - Comparação dos resultados obtidos no domínio do tempo com simulações de diferentes tempos de simulação e passo de tempo 0,005s.

Tempo simul. (s)	60	300	500	700
u₁	0,048477	0,047641	0,048909	0,049621
u₂	0,03327	0,032717	0,033587	0,034075
u₃	0,017481	0,017283	0,017741	0,017995
Tempo gasto (s)	1,02602	3,96956	4,90293	6,33877

Novamente, melhorando o refinamento com a diminuição do passo de tempo para 0,001s os resultados tendem a se aproximar mais daqueles obtidos com o método de Gauss Kronrod, apresentados na Tabela 6.1, como pode ser observado na Tabela 6.12 abaixo.

Tabela 6.12 - Comparação dos resultados obtidos no domínio do tempo com simulações de diferentes tempos de simulação e passo de tempo 0,001s.

Tempo simul. (s)	60	100	150	200	250	300
u₁	0,044572	0,039082	0,038033	0,036776	0,036223	0,035786
u₂	0,030553	0,026797	0,026080	0,025220	0,024842	0,024543
u₃	0,015831	0,013914	0,013549	0,013111	0,012919	0,012767
Tempo gasto (s)	4,00413	4,46382	7,08950	26,7125	361,600	1163,88

Percebe-se que os resultados dependem do refinamento para serem viáveis, tanto em termos de processamento quanto em termos de confiabilidade. Conforme observado, os resultados no domínio do tempo com um número maior de simulações ou com maior tempo de simulação são similares aos feitos com apenas 1 simulação de 60 segundos, que foram utilizados nas comparações com o domínio da frequência, desde que com uma discretização ou refinamento adequado. Sendo assim, há casos em que se justifica o uso de um número limitado de simulações e com menor tempo de simulação no domínio do tempo, considerando que para simulações com tempo maior ou para um maior número de simulações há um gasto muito maior de tempo de processamento para se ter em retorno uma diferença dos valores RMS nos resultados pequena.

7. SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO SOBRE UM AEROGERADOR

Nesta etapa do trabalho primeiramente serão apresentadas informações sobre a torre da turbina eólica em estudo e depois informações sobre as características dos ventos simulados que irão ser aplicados à estrutura em diferentes casos para análise.

7.1 INFORMAÇÕES SOBRE O AEROGERADOR

A estrutura escolhida para a realização das simulações é um aerogerador de eixo horizontal de três pás, tendo cada uma delas 30 metros de comprimento. A altura total da torre do aerogerador é de 60 metros, constituída por 4 segmentos de 15 metros cada, conforme padrões da indústria, que facilitam o transporte para o local de instalação e o formado da torre é de tronco cônico vazado. O diâmetro da torre varia linearmente da base ao topo, sendo o diâmetro da base de 3,84 metros e o diâmetro do topo de 2,07 metros. Partindo-se da base ao topo, o primeiro segmento da torre possui espessura de 0,016 m, o segundo de 0,0125 m, o terceiro de 0,0125 m e o último de 0,0095 m, sendo cada segmento modelado com 5 elementos, totalizando 20 elementos para a torre. O módulo de elasticidade é de 210 GPa, a tensão de escoamento é de 350 MPa.

Já a nacela é simplificada como uma caixa retangular vazada de 1,5 metros de largura por 1,5 metros de altura e 10 metros de comprimento, sendo a espessura das paredes de 0,08 metros. A massa da nacela foi considerada de 4,5 toneladas, sendo ela discretizada com 9 elementos e 10 nós e a massa total distribuída nos nós com massas pontuais. Aberturas ou elementos internos da nacela não foram considerados na simulação.

Em relação às pás, a massa e o momento de inércia foram calculados com simplificações propostas por A. G. G. Rodríguez, A. G. Rodríguez e Payán (2007), Malcolm e Laiard (2007), e Ashuri et al. (2010), que basicamente residem em colocar, a partir de medições experimentais, a massa específica, as propriedades geométricas, e as propriedades inerciais da pá de aerogeradores (em cada direção) em função das propriedades geométricas e inerciais da sua raiz. Assim para os diversos modelos de pás, curvas individualizadas são propostas de forma que associam estas propriedades com os valores da seção transversal da raiz daquela pá. As propriedades do material utilizado são referentes a um aço comercial, com peso específico de

7800 kg/m³ e módulo de elasticidade de 210 GPa e as áreas e inércias das seções são as mesmas indicadas no trabalho de Furlanetto (2018). Em seu trabalho, uma torre tubular cônica de um aerogerador de 4 segmentos de seções é otimizada levando em conta as restrições da norma Brasileira de Aço (NBR 8800), diversos casos de carga e combinações de carregamentos e tomando como variáveis de projeto a espessura e diâmetro da torre.

A massa total da estrutura completa é 57,15 toneladas. Para a análise estrutural, o modelo matemático discretizado do aerogerador completo possui no total 60 nós e 59 elementos de pórtico espacial, sendo 20 elementos para a torre, 9 para a nacela e 10 para cada uma das três pás, conforme ilustrado na Figura 7.1. Como condições de contorno foi adotado engastamento perfeito sendo restringidos todos os 6 graus de liberdade da base da torre. A seguir, a Tabela 7.1 traz o resumo das propriedades da estrutura.

Tabela 7.1 – Resumo das propriedades do aerogerador.

Massa total da estrutura completa: 57,15 ton		Cond. Contorno base: Engastamento perf.	
PROPRIEDADES DA TORRE			
Altura total da torre (H_{hub})	60 m	Diâmetro do rotor (D)	60 m
Comprimento dos 4 segmentos	15 m	Espessura segmento 1 (Base)	0,016 m
Diâmetro Base (var. linear até topo)	3,84 m	Espessura segmento 2	0,0125 m
Diâmetro Topo	2,07 m	Espessura segmento 3	0,0125 m
Módulo de Elasticidade	210 GPa	Espessura segmento 4 (Topo)	0,0095 m
Tensão de Escoamento	350 MPa		
PROPRIEDADES DA NACELE			
Largura	1,5 m	Espessura das paredes	0,08 m
Altura	1,5 m	Massa total	4,5 ton
Comprimento	10 m		
PROPRIEDADES DAS PÁS			
Comprimento das pás (R)	30 m	Módulo de Elasticidade	210 GPa
Peso específico	7800	Aerofólio NACA23012	

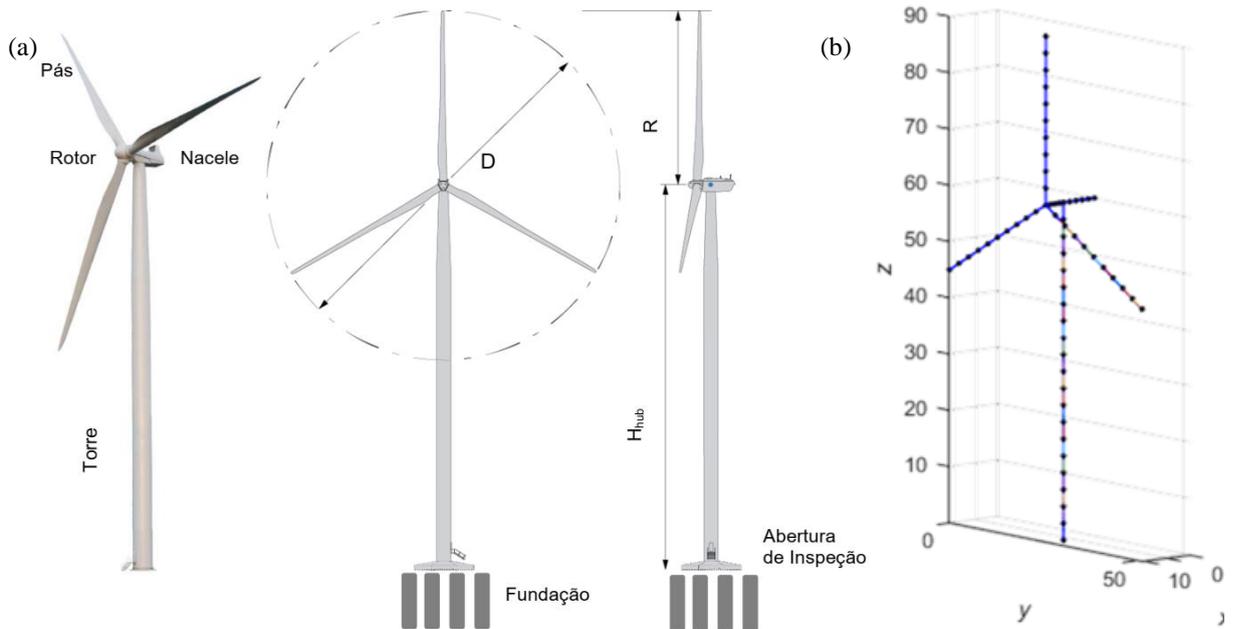


Figura 7.1 – (a) Aerogerador e (b) modelo discretizado. $H_{hub}=60$ m, $D=60$ m.

Outro ponto que cabe destacar sobre o dimensionamento das pás é em relação à velocidade de rotação delas. Neste trabalho a dinâmica das pás, que podem rotacionar, não é considerado nas simulações, uma vez que elas estão frenadas. As simulações são feitas numa condição de vento extremo em que o sistema de *shut down* esteja acionado, com as pás embandeiradas. Independentemente disto, num caso de acionamento ou desligamento do aerogerador poderá haver a coincidência de uma das frequências naturais com a de rotação do rotor, podendo haver ressonância e deslocamento excessivo da estrutura causados pela rotação das próprias pás.

Para evitar este problema, a frequência fundamental da estrutura, a primeira frequência natural, como restrição de projeto, não deve coincidir com a frequência rotacional da pá, conhecida como frequência 1P (19 RPM tipicamente), e a frequência de passagem das pás, conhecida como frequência 3P. Como mostra a Figura 7.2 a seguir, as turbinas podem ser dimensionadas como rígida-rígida, caso a frequência fundamental da estrutura seja maior que 3P, mole-rígida, caso a frequência fundamental fique entre 1P e 3P, e mole-mole, caso a frequência fundamental da estrutura seja menor que 1P. Como as turbinas são de velocidade variável, deve-se respeitar e evitar que a frequência fundamental coincida não apenas com as frequências 1P e 3P, mas com o intervalo de mais ou menos 10% em torno de 1P e de 3P. Para turbinas eólicas, observa-se que o dimensionamento mais econômico é do tipo mole-rígido e a frequência entre 1,1P e 2,7P é chamada de frequência de funcionamento (VAN ZYL;VAN ZIJL, 2015).

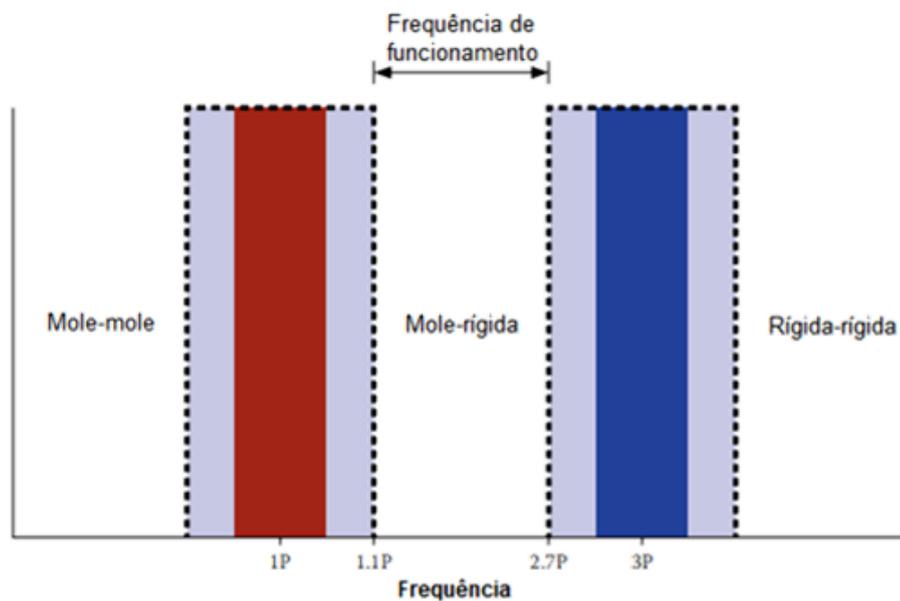


Figura 7.2 – Intervalos de frequências de excitação 1P e 3P (adaptado de VAN ZYL;VAN ZIJL, 2015).

A rotação de operação das pás da turbina dimensionada neste estudo é de 19 rotações por minuto (RPM), o que resulta em uma frequência de rotação $1P = 0,316667$ Hz e frequência de passagem $3P = 0,95$ Hz. Neste caso, a frequência natural da estrutura deverá ser menor que $1P - 10\% = 0,285$ Hz para ser do tipo mole-mole; ficar entre $1P + 10\% = 0,34833$ Hz e $3P - 10\% = 0,855$ Hz para ser do tipo mole-rígida; e ser maior que $3P + 10\% = 1,045$ Hz para ser do rígida-rígida.

Outra propriedade que deve ser relacionada ao comportamento dinâmico é o amortecimento estrutural, o qual é notoriamente difícil de ser avaliado ou medido de forma precisa, sendo determinado como porcentagem do amortecimento crítico. Alguns trabalhos identificam estas razões de amortecimento a partir de medições experimentais das turbinas em funcionamento (excitação ambiental) utilizando métodos diversos como SSI (*Stochastic Subspace Identification*), Polymax (*Poly reference Regressive*), *peak-picking*, etc. Entretanto, a forma como a medição é feita (em operação com a ação do vento ou desligadas) e as condições de suporte em que o aerogerador se encontra (flutuante ou sobre tubulões *off-shore*, sobre sapatas ou fundações profundas *on-shore*) podem influenciar grandemente estes valores devido aos tipos de amortecimento presentes (estrutural, aerodinâmico, etc.). Dados típicos para aerogeradores *on-shore* sobre sapatas e de dimensões equivalentes aos aqui avaliados para o primeiro modo de vibração do amortecimento estrutural estão disponíveis no trabalho de Burton et al. (2011), no caso de torres de aço de seções cônicas parafusadas.

A seguir, são apresentados na Tabela 7.2 abaixo as razões de amortecimento utilizadas para os 4 primeiros modos de vibração e para os outros modos de vibração, assume-se um amortecimento crítico. Não se utilizou amortecimento de Rayleigh para definição do amortecimento proporcional à massa e rigidez devido seu comportamento de gerar amortecimento excessivamente altos para frequências superiores às utilizadas para ajuste.

Tabela 7.2 - Razão de amortecimento estrutural. (BURTON et al., 2011).

Modo de vibração	Razão de amortecimento ξ (adm)
1	0,0080
2	0,0128
3	0,0320
4	0,1280

Segundo a NBR 6123 (1988) para o primeiro modo principal flexional da torre recomenda-se um valor de 0,8%, mesmo valor indicado pela Tabela 7.2. Para aerogeradores *offshore* os valores correspondentes das razões de amortecimento são em geral maiores e da ordem de 1% para o primeiro modo devido ao amortecimento gerado pela fundação mais mole e à lâmina de água presente ou flutuadores e ancoragem.

AWEA e ASCE (2011) recomendam um valor de 1% para razão de amortecimento para ambos primeiro e segundo modos de vibração, que é o mesmo indicado pela IEC 61400-1 (2005). Por outro lado, a JSCE (2010) do Japão recomenda valores de 0,8 % para as estruturas com caixas multiplicadoras e 0,5% para estruturas sem as caixas enquanto que a norma alemã DIB (2012) para turbinas eólicas recomenda 0,25% para os aerogeradores com estruturas em aço. Em interessante trabalho Oh e Ishihara (2018) avaliaram experimentalmente o amortecimento em turbinas *onshore* de 2,44 MW (75 m de altura e pás de 41 m de raio) utilizando um atuador para amortecimento ativo e chegaram a resultados de razão de amortecimento para os 4 primeiros modos de vibração (1º de flexão frente-trás, 2º de flexão frente-trás, 1º de flexão lado-lado, 2º de flexão lado-lado) de 0,2%, 2,4%, 1,2% e 3,2%. Frente a esta diversidade de valores, neste trabalho foram adotados os valores indicados anteriormente na Tabela 7.2.

7.2 INFORMAÇÕES SOBRE O VENTO PARA AS SIMULAÇÕES

Neste item serão mostradas informações em relação às características do vento gerado para atuar na estrutura para cada uma das simulações. No total serão 6 simulações e os parâmetros de entrada para cada uma delas estão condensados na Tabela 7.3 a seguir.

Tabela 7.3 – Parâmetros de entrada para simulações.

Parâmetro	Condição A	Condição B	Condição C	Condição D	Condição E	Condição F
Vel. média do vento (m/s)	25,0	25,0	25,0	35,0	15,0	25,0
Altura de ref. (m)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Expoente da camada limite α (-)	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,280
Comp. de turbulência x (m)	100,0	170,0	130,0	170,0	170,0	170,0
Comp. de turbulência y (m)	25,0	100,0	40,0	100,0	100,0	100,0
Comp. de turbulência z (m)	8,33	35,0	10,0	35,0	35,0	35,0
Desv. padrão de turb. x (m/s)	2,60	2,60	3,6	2,6	2,6	2,6
Desv. padrão de turb. y (m/s)	2,20	2,20	2,70	2,2	2,2	2,2
Desv. padrão de turb. z (m/s)	1,56	1,56	2,1	1,56	1,56	1,56
Tempo de simulação T (s)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Intervalo de Tempo Δt (s)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Número de linhas espectrais (s)	30000	30000	30000	30000	30000	30000

As propriedades de escoamento podem ser encontradas em atlas eólicos ou estimadas através de medições meteorológicas. Porém, por tratar-se de dados para simular condições de vento extremas, os valores adotados neste trabalho não são baseados em nenhuma localização específica. Contudo, as simulações buscam representar situações possíveis de ocorrer em parques eólicos brasileiros, demonstrar o funcionamento do programa e servir como base para avaliação e comparação dos resultados.

Para as simulações foi definida a Condição A como base e, a partir dela, foram criados os demais cenários, tendo cada um deles pelo menos um parâmetro diferente em relação à Condição A. Desse modo, pretende-se verificar o quanto as diferenças em cada um dos parâmetros influenciam no comportamento da estrutura, assim como avaliar a precisão dos métodos no domínio do tempo e da frequência.

Sobre cada um dos parâmetros, primeiramente, a velocidade média do vento foi definida a partir da velocidade de corte de operação (*cut-out speed*) do aerogerador, a qual é a velocidade em que as pás do aerogerador devem parar de operar por razões de segurança. Com isso, para a Condição A e mais 3 das simulações, 25m/s é a velocidade média, há uma simulação com velocidade mais elevada, 35m/s, e uma com velocidade menor, 15m/s, para se fazer comparações. A altura de referência foi mantida a mesma, de 10 metros, para todos os cenários.

O expoente da camada limite α foi baseado nas informações de Simiu e Scalan (1996), onde α tem valor em torno de 0,16 para área de terreno aberto, 0,28 para área de terreno suburbano e 0,40 para área de terreno de centro de grandes cidades. Já para os comprimentos de turbulência, foram adotados para a condição A valores de 100m para a componente longitudinal ($L_u^x(z)$), 1/4 desse valor para a componente transversal ($L_v^x(z)$) e 1/12 para a componente vertical ($L_w^x(z)$), conforme indicado por Wang et al. (2018), que expressa diferentes escalas de comprimento de turbulência conforme as equações abaixo, sendo L_1 a escala de comprimento de referência, igual a 100m, z_1 a altura de referência, igual a 10m e z_{min} é uma altura mínima arbitrária dependente da categoria do terreno, para este caso também igual a 10m.

$$L_u^x(z) = \begin{cases} L_1(z/z_1)^{0,3} & ; z > z_{min} \\ L_1(z_{min}/z_1)^{0,3} & ; z \geq z_{min} \end{cases} \quad (7.1)$$

$$L_v^x(z) = \frac{1}{4} L_u^x(z) \quad (7.2)$$

$$L_w^x(z) = \frac{1}{12} L_u^x(z) \quad (7.3)$$

Para os outros cenários foram adotados valores de escala de comprimento de turbulência diferentes e buscando seguir a proporção indicada por Wang et al. (2018) entre as componentes, porém não de forma exata, novamente a fim de se fazer as análises dos resultados de forma independente. Cada condição foi criada com um intuito conforme descrito a seguir:

Condição A – servir como condição básica com velocidade média do vento de parada de operação da turbina (25 m/s), expoente da camada limite baixo (0,16 representando terreno aberto) e escala de comprimento de turbulência com valores de referência (100 m, 25 m e 8,33 m, nas direções x, y e z, respectivamente);

Condição B – comparar condição com comprimentos de turbulência maiores (170 m, 100 m e 35 m, nas direções x, y e z, respectivamente);

Condição C – comparar condição com comprimentos de turbulência médios (130 m, 40 m e 10 m, nas direções x, y e z, respectivamente) e com desvios padrões de turbulência mais elevados (3,6 m/s, 2,7 m/s e 2,1 m/s, nas direções x, y e z, respectivamente), sendo que tais parâmetros influenciam na chamada intensidade de turbulência;

Condição D – comparar condição para um caso mais extremo, mantendo comprimentos de turbulência altos (170 m, 100 m e 35 m, nas direções x, y e z, respectivamente) e com velocidade média do vento mais elevada (35 m/s);

Condição E – comparar condição para um caso menos extremo, mantendo comprimentos de turbulência altos (170 m, 100 m e 35 m, nas direções x, y e z, respectivamente), mas com menor velocidade média do vento (15 m/s);

Condição F – comparar condição para um terreno suburbano, com mais obstáculos, adotando expoente da camada limite mais elevado (0,28) e mantendo comprimentos de turbulência altos (170 m, 100 m e 35 m, nas direções x, y e z, respectivamente).

8. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações executadas. Foram utilizados dois métodos para resolução de cada um dos casos: o método de Newmark no domínio do tempo e o método de integração no domínio da frequência. Primeiramente, são exibidas na Figura 8.1 as frequências naturais obtidas com o código para os 8 primeiros modos de vibração da estrutura.

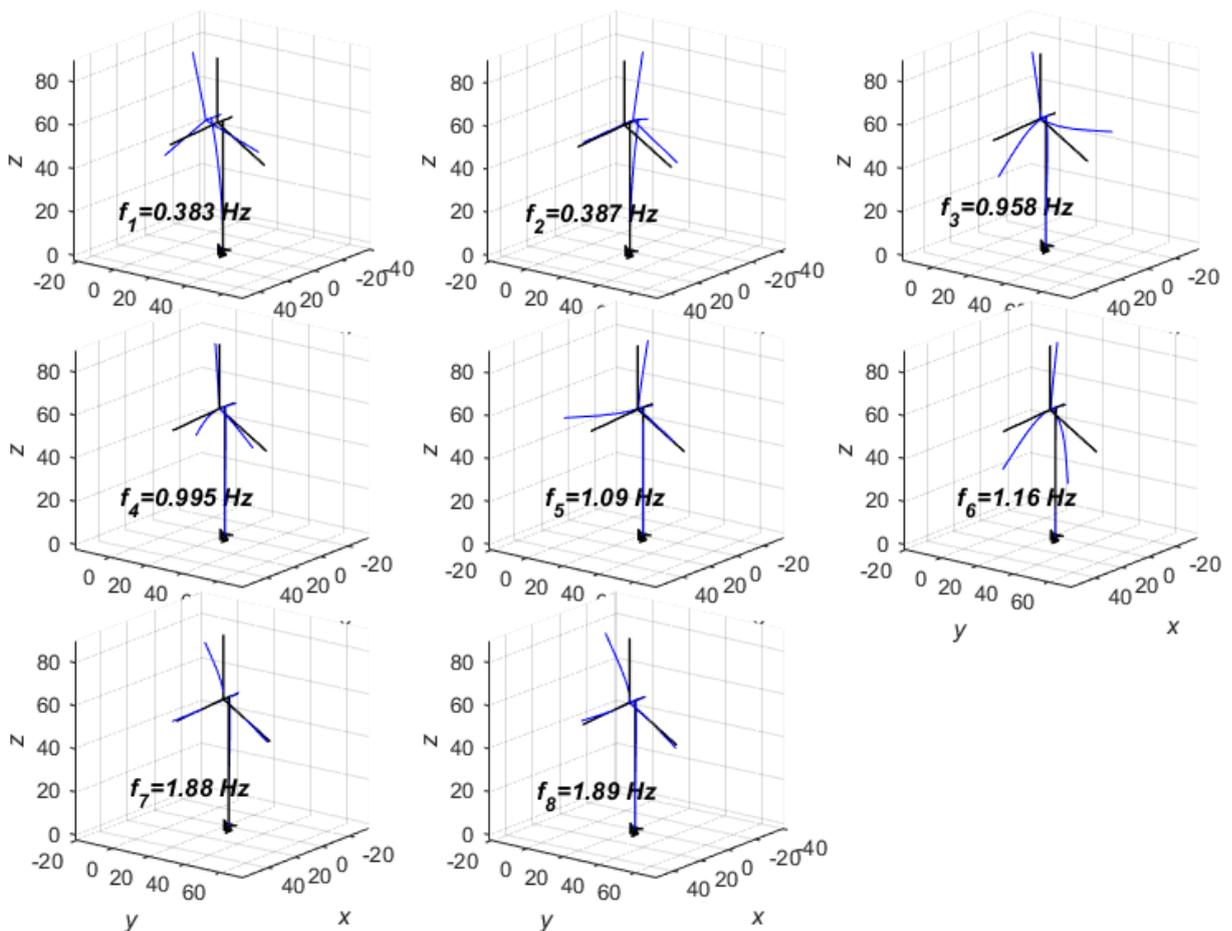


Figura 8.1 –Frequências naturais dos 8 primeiros modos de vibração.

As frequências naturais da estrutura encontradas estão na mesma faixa de valores de trabalhos da literatura como Burton et al. (2011) (torre com diâmetro do rotor de 80 m e frequência de 0,58 Hz para torre e 0,89 Hz para pás), Osgood et al. (2011) (turbina com altura de 36,6 m, com frequência de 0,86 Hz para movimento na direção principal da torre e 0,88 Hz para movimento lateral), Zendeabad, Chokani e Abhari (2017) (torre de 95m de altura e diâmetro do rotor de 90m, com frequência de 0,27 Hz para torre e 0,25 Hz para rotor), Loureiro (2014) (torre de 90m

de altura e rotor de 79m de diâmetro, com frequência natural da torre de 0,283 Hz) e Oliveira (2012) (torre de 76,15m com frequência natural de 0,36 Hz com análise numérica e 0,34 Hz com ensaios experimentais e outra torre com 44,075 m de altura e frequência natural de 0,60 Hz para modelo de barras engastado e para modelo de casca com e sem anéis de rigidez e de 0,56Hz para modelo de casca com sapata). Os valores indicados em cada trabalho estão sujeitos a erros originados de diferentes fontes (instrumentos experimentais, geometria e dimensões dos aerogeradores, seções transversais da torre e condições ambientais em que foram feitas medições ou mesmo os métodos utilizados para obter frequências e razões de amortecimento) e há diferenças nas estruturas em estudo em cada um deles também. Porém, por estarem em uma mesma faixa de valores, pode-se considerar que os resultados obtidos estão coerentes. Na sequência, a Tabela 8.1 traz os resultados obtidos para as direções longitudinal, transversal e vertical dos deslocamentos RMS, acelerações RMS e o tempo gasto para a execução da simulação de cada caso no domínio do tempo e da frequência.

Tabela 8.1 – Deslocamentos RMS, acelerações RMS e o tempo gasto para a execução da simulação de cada caso no domínio do tempo e da frequência. $T=3000s$; $\Delta t=0,05s$; $nls=30000$.

Condição	Domínio	Deslocam. longitud. topo (m)	Deslocam. transvers. topo (m)	Deslocam. vertical topo (m)	Aceleração longitud. topo (m/s ²)	Aceleração transvers. topo (m/s ²)	Aceleração vertical topo (m/s ²)	Tempo de Processamento (s)
Condição A	Tempo	3.5680×10^{-2}	1.9573×10^{-2}	2.8417×10^{-3}	7.5927×10^{-2}	4.3556×10^{-2}	2.0644×10^{-4}	5.00641×10^3
	Frequência	4.8513×10^{-2}	2.6565×10^{-2}	4.0188×10^{-3}	7.5927×10^{-2}	4.3556×10^{-2}	2.0644×10^{-4}	6.34783×10^2
Condição B	Tempo	3.5101×10^{-2}	1.9014×10^{-2}	2.8417×10^{-3}	6.5305×10^{-2}	3.3763×10^{-2}	1.7193×10^{-4}	5.35267×10^3
	Frequência	4.8090×10^{-2}	2.6157×10^{-2}	4.0188×10^{-3}	6.5305×10^{-2}	3.3763×10^{-2}	1.7193×10^{-4}	7.68896×10^2
Condição C	Tempo	3.5275×10^{-2}	2.2710×10^{-2}	2.8446×10^{-3}	1.0450×10^{-1}	5.9862×10^{-2}	2.8265×10^{-4}	5.73189×10^3
	Frequência	4.6039×10^{-2}	3.0247×10^{-2}	4.0228×10^{-3}	1.0450×10^{-1}	5.9862×10^{-2}	2.8265×10^{-4}	9.07114×10^2
Condição D	Tempo	1.8363×10^{-2}	3.3889×10^{-2}	2.8661×10^{-3}	9.9228×10^{-2}	5.4345×10^{-2}	2.8672×10^{-4}	5.04466×10^3
	Frequência	1.8364×10^{-2}	4.6899×10^{-2}	4.0532×10^{-3}	9.9228×10^{-2}	5.4345×10^{-2}	2.8672×10^{-4}	8.20267×10^2
Condição E	Tempo	5.5027×10^{-2}	9.0630×10^{-3}	2.8255×10^{-3}	3.0938×10^{-2}	1.9222×10^{-2}	7.8461×10^{-5}	6.22521×10^3
	Frequência	7.7572×10^{-2}	1.2305×10^{-2}	3.9958×10^{-3}	3.0938×10^{-2}	1.9222×10^{-2}	7.8461×10^{-5}	6.80875×10^2
Condição F	Tempo	2.1357×10^{-2}	3.2052×10^{-2}	2.8582×10^{-3}	8.5005×10^{-2}	5.4573×10^{-2}	2.3916×10^{-4}	5.33039×10^3
	Frequência	2.5698×10^{-2}	4.4238×10^{-2}	4.0421×10^{-3}	8.5005×10^{-2}	5.4573×10^{-2}	2.3916×10^{-4}	7.91695×10^2

Pela tabela, percebe-se que os resultados de acelerações obtidos para cada um dos casos são iguais, comparando-se os dois métodos de resolução. Já para os deslocamentos, diferenças nas respostas obtidas para cada caso são observadas ao comparar as respostas nos domínios do tempo e da frequência. Na sequência, a Tabela 8.2 traz os resultados RMS de reações encontradas na base da estrutura e na próxima etapa os resultados obtidos serão analisados.

Tabela 8.2 – Valores RMS de reações encontradas na base da estrutura nos domínios do tempo e da frequência. $T=3000s$; $\Delta t=0,05s$; $nls=30000$.

Condição	Domínio	Rx (N)	Ry (N)	Rz (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Tempo de Processamento (s)
Condição A	Tempo	6.4917×10^4	7.3677×10^3	1.4116×10^6	5.5228×10^5	9.2644×10^5	2.4433×10^4	5.00641×10^3
	Frequência	9.0875×10^4	9.4509×10^3	1.9963×10^6	7.3597×10^5	1.1940×10^6	3.4025×10^4	6.34783×10^2
Condição B	Tempo	6.4837×10^4	6.8696×10^3	1.4116×10^6	5.2913×10^5	9.0095×10^5	2.4259×10^4	5.35267×10^3
	Frequência	9.0817×10^4	9.0684×10^3	1.9963×10^6	7.1880×10^5	1.1743×10^6	3.3903×10^4	7.68896×10^2
Condição C	Tempo	7.0156×10^4	9.0508×10^3	1.4126×10^6	6.5409×10^5	1.1863×10^6	2.8118×10^4	5.73189×10^3
	Frequência	9.7517×10^4	1.1257×10^4	1.9977×10^6	8.5098×10^5	1.5000×10^6	3.8843×10^4	9.07114×10^2
Condição D	Tempo	1.2544×10^5	1.2821×10^4	1.4206×10^6	9.6240×10^5	2.6887×10^6	4.6953×10^4	5.04466×10^3
	Frequência	1.7648×10^5	1.7268×10^4	2.0090×10^6	1.3203×10^6	3.7327×10^6	6.5926×10^4	8.20267×10^2
Condição E	Tempo	2.4281×10^4	2.9720×10^3	1.4056×10^6	2.4028×10^5	5.3930×10^5	9.1510×10^3	6.22521×10^3
	Frequência	3.3572×10^4	3.6687×10^3	1.9878×10^6	3.1792×10^5	7.1605×10^5	1.2571×10^4	6.80875×10^2
Condição F	Tempo	8.6996×10^4	1.2086×10^4	1.4177×10^6	9.0857×10^5	1.7797×10^6	4.3688×10^4	5.33039×10^3
	Frequência	1.2211×10^5	1.6171×10^4	2.0049×10^6	1.2415×10^6	2.4381×10^6	6.1281×10^4	7.91695×10^2

O programa também gera outros resultados para cada condição simulada com figuras, conforme exibido na sequência com imagens que foram obtidas para a simulação com a condição A. Porém, para todas as condições são gerados dados como estes. A primeira das imagens, Figura 8.2, mostra os sinais de velocidade do vento sendo gerados ao longo do tempo em cada ponto da estrutura. É possível observar a correlação existente entre os pontos, visto que as variações ocorrem de forma similar em pontos próximos entre si.

A próxima imagem, Figura 8.3, traz os perfis de velocidade do vento em função da altura para as direções longitudinal (x) e transversal (y). Observa-se que a geração dos dados segue os parâmetros de entrada estabelecidos, com a velocidade média, representada pela linha vermelha, de 25m/s na direção longitudinal (x) na altura de referência de 10 metros. Ainda é possível notar as oscilações entre os diversos perfis gerados e que na direção longitudinal (x) a velocidade média aumenta em função da altura.

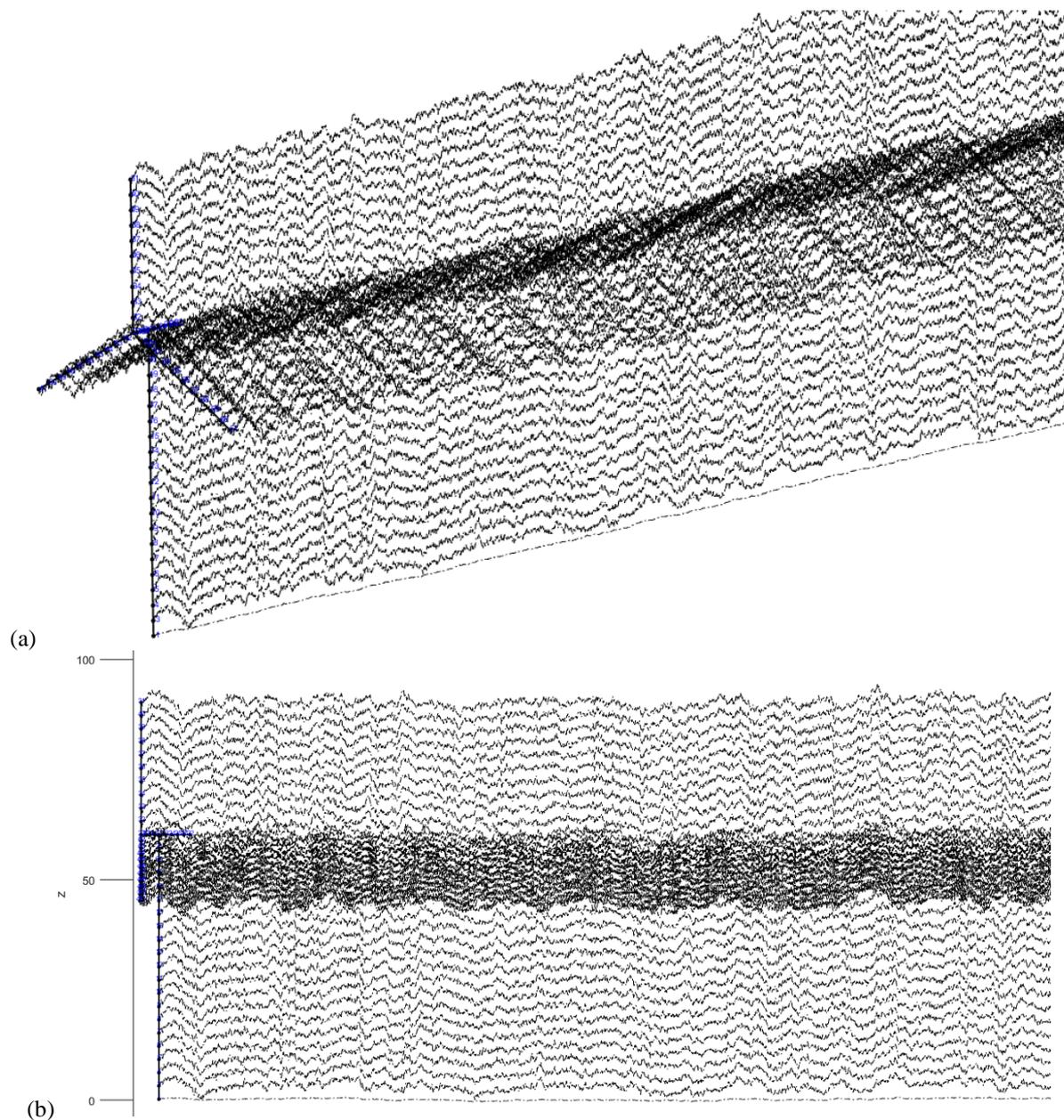


Figura 8.2 –Valores de históricos no tempo de velocidade do vento em cada ponto da estrutura, condição A. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista lateral.

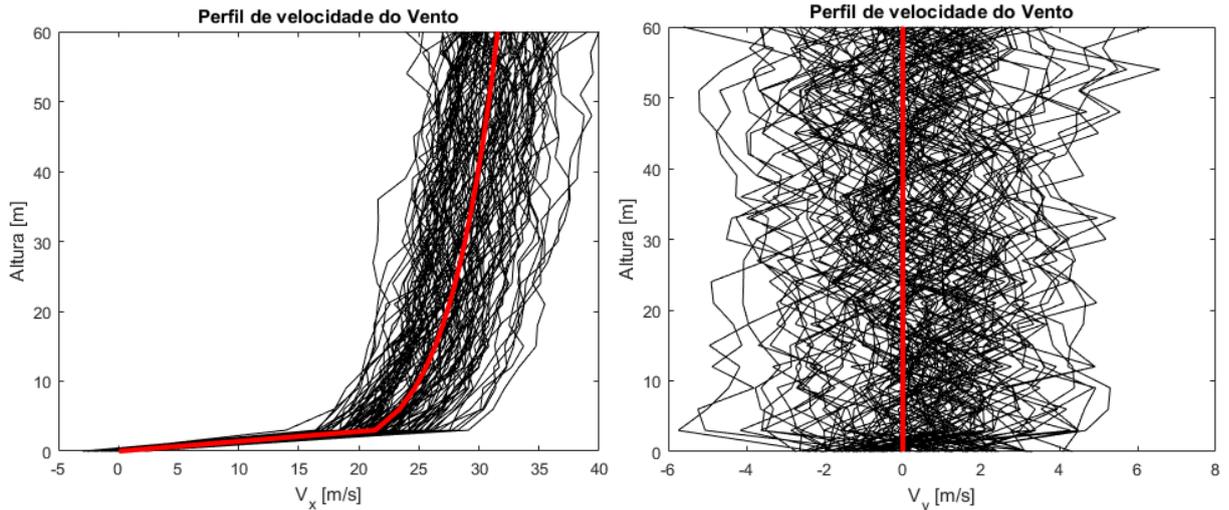


Figura 8.3 – Perfis de velocidade longitudinal (V_x) e transversal (V_y) do vento na condição A: Velocidade média (linha cheia vermelha), diversas simulações (linhas pretas).

Na sequência também, a Figura 8.4 traz lado a lado os perfis de velocidade do vento na direção longitudinal (x) da condição A e da condição C para comparação, sendo que a condição C foi gerada com comprimentos de turbulência e desvios padrões de turbulência maiores, resultando em maior intensidade de turbulência. Com isso, percebe-se que, na condição C, há uma maior variação entre os perfis de velocidade gerados, com casos em que a velocidade chega a quase 45 m/s, enquanto que na condição A não passa de 40 m/s.

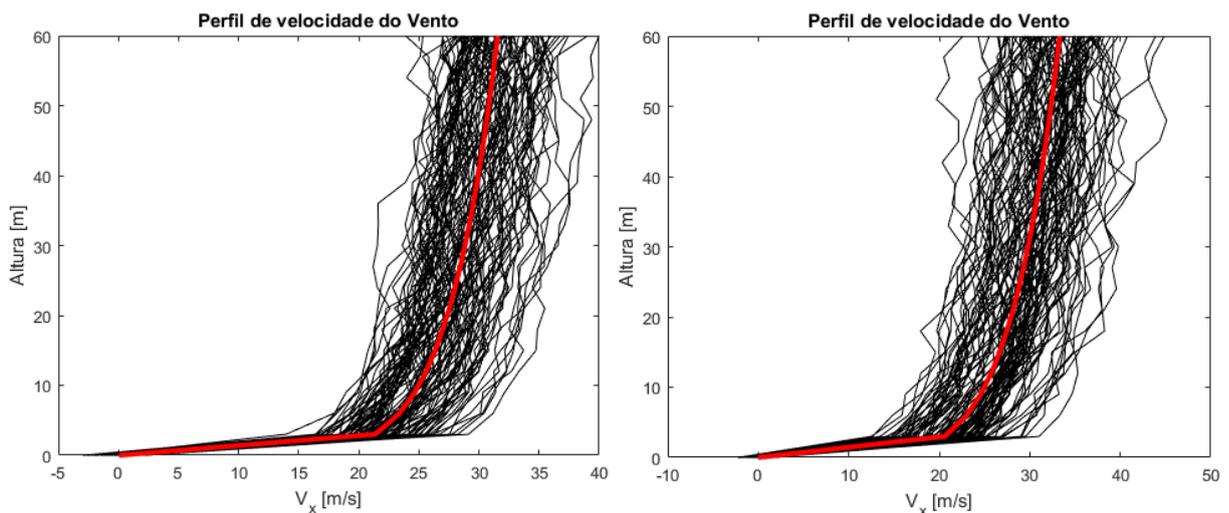


Figura 8.4 – Perfis de velocidade do vento na direção longitudinal (V_x) das condições A e C: Velocidade média (linha cheia vermelha), diversas simulações (linhas pretas).

A seguir, nas Figuras 8.5 e 8.6 respectivamente, são exibidas imagens das forças aplicadas e dos deslocamentos ao longo do tempo no topo da torre, a 60 metros de altura.

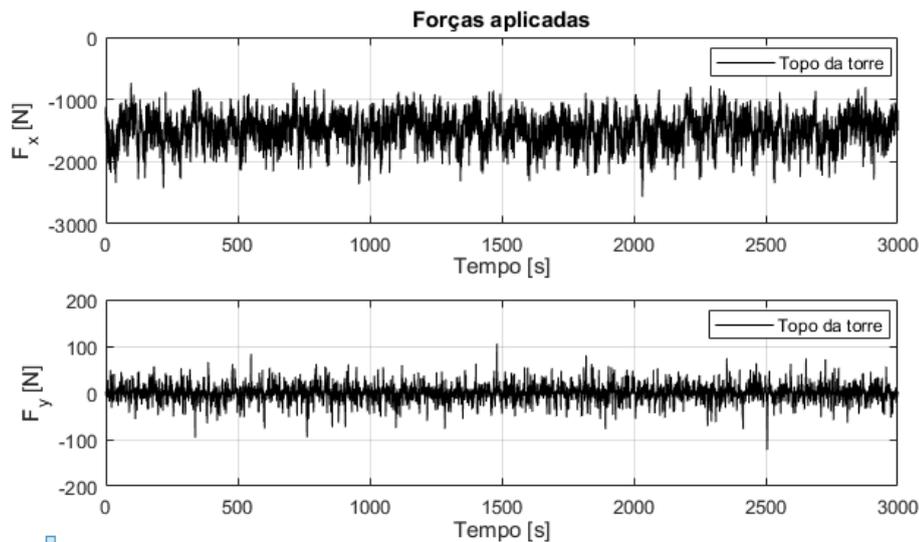


Figura 8.5 –Forças aplicadas no topo da torre do aerogerador, a 60 metros de altura, nas direções longitudinal (x) e transversal (y) ao longo do tempo, condição A.

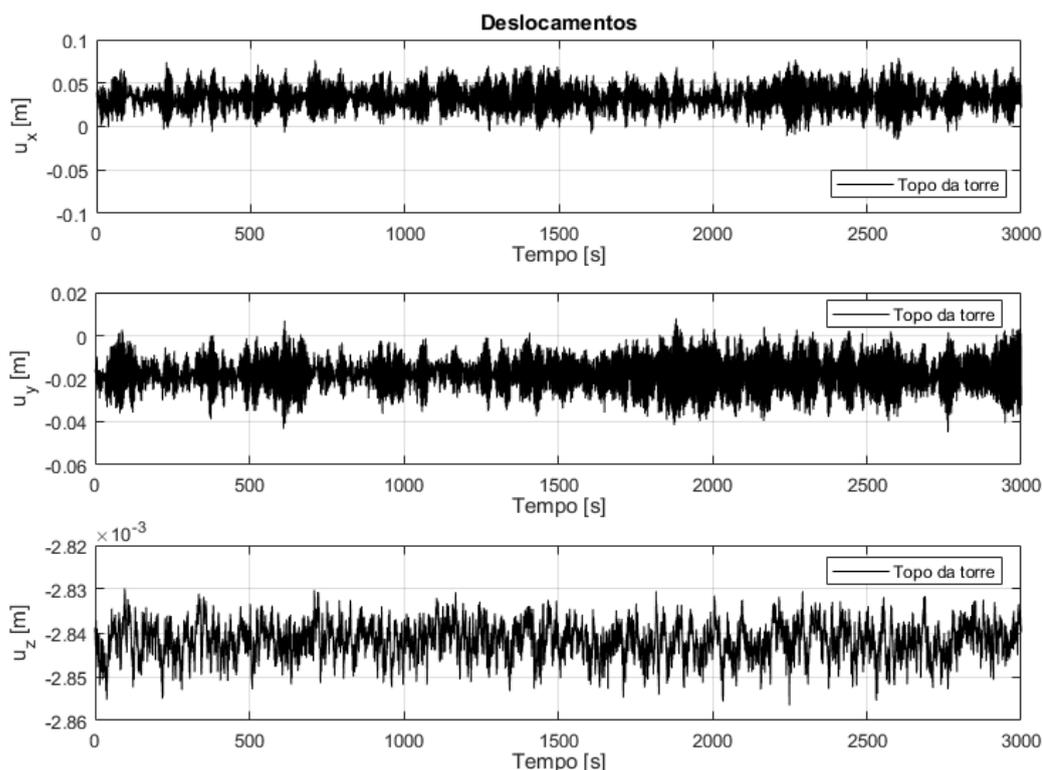


Figura 8.6 –Deslocamentos no topo da torre do aerogerador, a 60 metros de altura, nas direções longitudinal (x), transversal (y) e vertical (z) ao longo do tempo, condição A.

Nota-se que o deslocamento transversal (u_y) no topo da torre, ao invés de ter variação em torno de zero, tende à direção negativa do eixo. A explicação para que isso ocorra é que as pás possuem perfil aerodinâmico que as faria rotacionar, porém, por elas estarem travadas, ao invés

de rotacionarem acabam transmitindo o esforço à estrutura que se movimenta na direção negativa do eixo y . Verifica-se também que os deslocamentos no eixo vertical (u_z) têm valores muito baixos, como esperado. Abaixo, a Figura 8.7 apresenta as reações na base da torre ao longo do tempo.

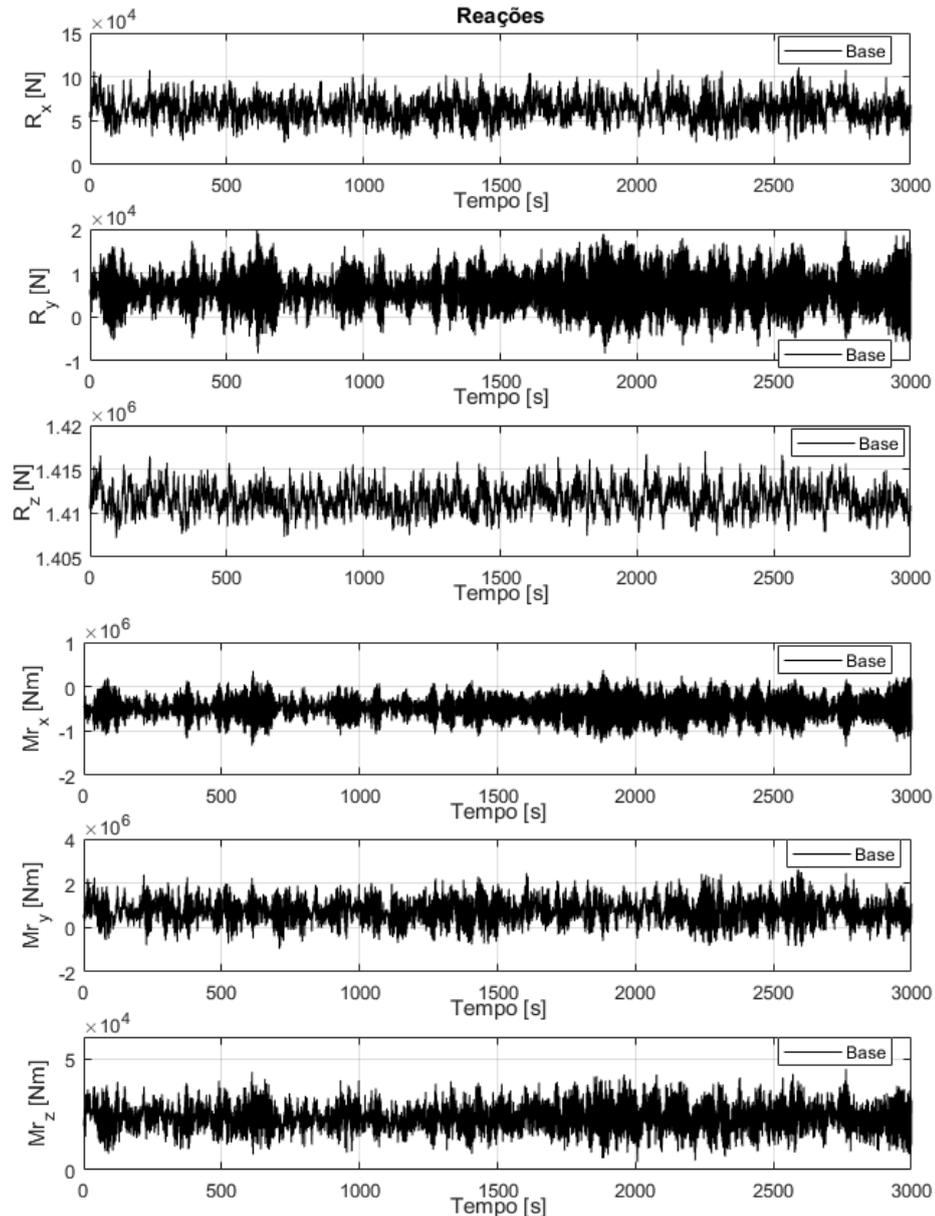


Figura 8.7 –Reações na base da torre do aerogerador ao longo do tempo, condição A.

Percebe-se que os valores médios das reações e deslocamentos referentes à condição A apresentados nas figuras estão de acordo com os dados apresentados na Tabela 8.1 e na Tabela 8.2. Na etapa a seguir, é feita análise e discussão dos resultados obtidos.

9. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com as frequências naturais da estrutura apresentadas, observa-se que sua frequência fundamental, a primeira frequência natural, é de 0,383Hz. Este valor fica entre 0,34833Hz e 0,855Hz, que delimitam o intervalo de frequências entre 1,1P e 2,7P para uma torre com velocidade de rotação das pás de 19 RPM ser caracterizada como do tipo mole-rígida. Com isso, a torre com as características apresentadas é do tipo mole-rígida e sua frequência natural está fora dos intervalos de frequências que poderiam causar excitação e deslocamentos na estrutura pelo movimento das próprias pás.

Além disso, de acordo com a frequência fundamental da estrutura, a rotação das pás poderia variar entre 9rpm e 20rpm que ainda estaria dentro do intervalo de frequência de funcionamento adequado, conforme mostrado abaixo na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Cálculo de rotações das pás para intervalo de frequência de funcionamento.

Rotação das pás	Frequência 1P	Frequência 3P	1,1P	2,7P
9 rpm	$9/60 = 0,15 \text{ Hz}$	$0,15 \times 3 = 0,45 \text{ Hz}$	$1,1 \times 0,15 = 0,165 \text{ Hz}$	$2,7 \times 0,15 = 0,405 \text{ Hz}$
20 rpm	$20/60 = 0,333 \text{ Hz}$	$0,333 \times 3 = 1 \text{ Hz}$	$1,1 \times 0,333 = 0,3667 \text{ Hz}$	$2,7 \times 0,333 = 0,9 \text{ Hz}$
Frequência Fundamental = 0,383Hz				
Para 9 rpm:	$1,1P = 0,165 < 0,383 < 2,7P = 0,405$			Mole-rígida
Para 20rpm:	$1,1P = 0,3667 < 0,383 < 2,7P = 0,9$			Mole-rígida

Conforme já informado no item anterior do trabalho, comparando-se as acelerações obtidas em cada caso simulado, os resultados com o método no domínio do tempo e com o método no domínio da frequência resultam iguais. Ao comparar-se os resultados obtidos nas diferentes condições simuladas no domínio do tempo, percebe-se que:

- A condição simulada com acelerações longitudinal e transversal mais elevadas é a Condição C, para a qual foram adotados os desvios padrões de turbulência mais elevados, comprimentos de turbulência médios e velocidade média do vento de 25m/s.
- A condição com aceleração vertical mais elevada é a Condição D, simulada com a maior velocidade média do vento, de 35m/s, e comprimentos de turbulência mais elevados.
- Já a condição com as menores acelerações obtidas foi a Condição E, simulada com a menor velocidade média do vento, de 15m/s, mesmo que com comprimentos de turbulência elevados

da mesma forma que a condição D.

Em relação aos deslocamentos, foram obtidos resultados ligeiramente diferentes com os métodos utilizados no domínio do tempo e frequência para cada condição simulada. Este fato pode ser justificado pela única simulação no tempo executada e comparada com os resultados no domínio da frequência. Como demonstrado anteriormente no exemplo do sistema de 3 GDL, estas diferenças serão minimizadas caso fosse possível realizar mais simulações independentes no tempo e se tomassem as médias dos valores obtidos para comparação. Em todas os casos simulados, os deslocamentos obtidos com o método no domínio do tempo foram ligeiramente menores do que os obtidos com o método no domínio da frequência. A seguir, algumas constatações em relação aos deslocamentos calculados no topo da torre.

- A condição com o maior deslocamento longitudinal calculado foi a condição E (a qual foi simulada com velocidade média do vento de 15m/s), com deslocamento de 0,055m no domínio do tempo e de 0,077m no domínio da frequência (deslocamento RMS no tempo 28,57% menor).
- Quanto ao deslocamento transversal, a condição D (simulada com velocidade média do vento de 35m/s) é a que apresentou os maiores valores, de 0,034m no domínio do tempo e de 0,047m no domínio da frequência (deslocamento RMS no tempo 27,66% menor).
- Para o deslocamento vertical, a condição D foi também o caso com resultado mais elevado de 0,0029m no domínio do tempo e de 0,0041m no domínio da frequência (deslocamento RMS no tempo 29,27% menor).
- Em relação aos menores resultados de deslocamentos, tem-se para o deslocamento longitudinal a condição D, para o deslocamento transversal a condição E, e para o deslocamento vertical, também a condição E.

Conforme as constatações, dos parâmetros analisados, aquele mais determinante, ou seja, com maior impacto nos resultados de deslocamentos e acelerações, como seria de se esperar, é a velocidade média do vento.

O expoente da camada limite, dependente do tipo de terreno (aberto, suburbano ou de área central) não apresentou influência tão grande nos resultados quanto a velocidade média do vento. Comparando-se as condições B e F, que têm os mesmos parâmetros com exceção do expoente da camada limite, a condição F que tem maior expoente da camada limite (para terreno suburbano) apresentou resultados de deslocamento transversal, deslocamento vertical e de

acelerações maiores do que a condição B (com expoente para terreno aberto, como as demais condições). Já para o deslocamento longitudinal a condição B, com expoente da camada limite menor apresentou resultados maiores.

Analisando-se as condições A, B e C, a respeito dos comprimentos de turbulência e desvios padrões de turbulência, nota-se que, quanto maior os comprimentos de turbulência e menor os desvios padrões, menores foram os deslocamentos e acelerações obtidos.

Tanto para os deslocamentos verticais, quanto para as reações verticais, nota-se uma grande constância nos resultados obtidos entre todas as condições simuladas. Isso porque, para a componente vertical, o peso da torre é o fator que tem maior contribuição para os resultados. Sendo o peso da torre o mesmo em todas as condições, por se tratar da mesma torre, os resultados na componente vertical são todos muito próximos entre si, divergindo apenas por efeitos transientes e aerodinâmicos do vento vertical atuando nas pás do aerogerador, além, é claro, de eventuais diferenças em partes simétricas devido à espacialidade e correlação do vento gerado.

Quanto às reações, assim como para os deslocamentos, foram obtidos resultados diferentes com os métodos utilizados no domínio do tempo e da frequência para cada condição simulada. As reações obtidas em cada condição com o método no domínio do tempo foram menores do que as obtidas com o método no domínio da frequência. Da mesma forma explicada anteriormente, estas diferenças diminuiriam, caso fossem feitas as médias de diversas simulações independentes com o método no domínio do tempo. Na sequência, algumas informações sobre as reações calculadas na base da torre.

A condição que apresentou os maiores valores para as reações na base da torre foi a condição D, a qual foi simulada com velocidade média do vento de 35m/s e expoente da camada limite de 0,16. Já a que apresentou as menores reações na base foi a condição E, simulada com a menor velocidade média do vento de 15m/s, expoente da camada limite também de 0,16 e comprimentos de turbulência iguais aos da condição D.

Comparando as condições B e F, simuladas apenas com o expoente da camada limite diferente, percebe-se que para todas as reações apresentadas a condição F, com maior expoente, resultou valores mais elevados de reações. Diferentemente dos resultados de deslocamentos das condições B e F, em que o deslocamento longitudinal no topo foi maior para a condição B e os demais deslocamentos e acelerações foram maiores para a condição F. Para as reações tem-se

uma diferença considerável nos resultados entre as duas condições simuladas devido ao expoente da camada limite ser diferente. Por exemplo, a reação R_x da condição B é cerca de 26% menor que a da condição F, M_x da condição B é cerca de 42% menor e M_y é em torno de 50% menor do que os resultados da condição F.

Comparando as condições A e B, verifica-se que B, com comprimentos de turbulência maiores, apresenta menores valores para as reações. Imagina-se que isto possa ser justificado pela maior aleatoriedade do vento que pode gerar um efeito cancelamento das forças aplicadas na torre. E ainda, a condição C, com comprimentos de turbulência maiores do que a condição A e menores do que a condição B, porém com desvios padrões de turbulência mais elevados, teve reações maiores na base do que as condições A e B. Ou seja, quanto menores os comprimentos de turbulência e maiores os desvios padrões de turbulência, maiores são as reações na base.

Foram feitas mais duas simulações, além daquela de 3000 segundos (50 minutos) com parâmetros iguais aos da condição A, porém com tempo de simulação diferente, uma de 300 segundos (5 minutos de vento) e outra de 10000 segundos (2,77 horas de vento) e todas utilizando o mesmo intervalo de integração ($\Delta t=0,05s$) das simulações anteriores. O objetivo foi o de verificar se as simulações poderiam ser feitas com menor tempo de simulação, resultando em um processamento mais rápido. A Tabela 9.2 traz os resultados de deslocamentos e acelerações e a Tabela 9.3 os resultados de reações para a condição A com os três tempos de simulação.

Tabela 9.2 – Deslocamentos e acelerações RMS no topo da torre e tempo de processamento para condição A com diferentes tempos de simulação. $\Delta t=0,05s$; $nls=3000$, 30000 e 100000, respectivamente.

Condição	Domínio	Deslocam. longitud. topo (m)	Deslocam. transvers. topo (m)	Deslocam. vertical topo (m)	Aceleração longitud. topo (m/s ²)	Aceleração transvers. topo (m/s ²)	Aceleração vertical topo (m/s ²)	Tempo de Processamento (s)
Condição A 300s	Tempo	3.4921×10^{-2}	1.9277×10^{-2}	2.8417×10^{-3}	6.1726×10^{-2}	3.8378×10^{-2}	2.0388×10^{-4}	8.51743×10^1
	Frequência	4.7946×10^{-2}	2.6356×10^{-2}	4.0188×10^{-3}	6.1726×10^{-2}	3.8378×10^{-2}	2.0388×10^{-4}	8.60281×10^1
Condição A 3000s	Tempo	3.5680×10^{-2}	1.9573×10^{-2}	2.8417×10^{-3}	7.5927×10^{-2}	4.3556×10^{-2}	2.0644×10^{-4}	5.00641×10^3
	Frequência	4.8513×10^{-2}	2.6565×10^{-2}	4.0188×10^{-3}	7.5927×10^{-2}	4.3556×10^{-2}	2.0644×10^{-4}	6.34783×10^2
Condição A 10000s	Tempo	3.5546×10^{-2}	1.9576×10^{-2}	2.8417×10^{-3}	7.3523×10^{-2}	4.3232×10^{-2}	2.0724×10^{-4}	1.80872×10^4
	Frequência	4.8417×10^{-2}	2.6568×10^{-2}	4.0188×10^{-3}	7.3523×10^{-2}	4.3232×10^{-2}	2.0724×10^{-4}	1.93039×10^3

Tabela 9.3 – Valores RMS de reações na base da torre para condição A com diferentes tempos de simulação. $\Delta t=0,05s$; $nls=3000, 30000$ e 100000 , respectivamente.

Condição	Domínio	Rx (N)	Ry (N)	Rz (N)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Tempo de Processamento (s)
Condição A 300s	Tempo	$6,4800 \times 10^4$	$7,0872 \times 10^3$	$1,4116 \times 10^6$	$5,3978 \times 10^5$	$8,9337 \times 10^5$	$2,4348 \times 10^4$	$8,51743 \times 10^1$
	Frequência	$9,0798 \times 10^4$	$9,2363 \times 10^3$	$1,9963 \times 10^6$	$7,2690 \times 10^5$	$1,1690 \times 10^6$	$3,3968 \times 10^4$	$8,60281 \times 10^1$
Condição A 3000s	Tempo	$6,4917 \times 10^4$	$7,3677 \times 10^3$	$1,4116 \times 10^6$	$5,5228 \times 10^5$	$9,2644 \times 10^5$	$2,4433 \times 10^4$	$5,00641 \times 10^3$
	Frequência	$9,0875 \times 10^4$	$9,4509 \times 10^3$	$1,9963 \times 10^6$	$7,3597 \times 10^5$	$1,1940 \times 10^6$	$3,4025 \times 10^4$	$6,34783 \times 10^2$
Condição A 10000s	Tempo	$6,4899 \times 10^4$	$7,3702 \times 10^3$	$1,4116 \times 10^6$	$5,5230 \times 10^5$	$9,2032 \times 10^5$	$2,4444 \times 10^4$	$1,80872 \times 10^4$
	Frequência	$9,0863 \times 10^4$	$9,4542 \times 10^3$	$1,9963 \times 10^6$	$7,3604 \times 10^5$	$1,1892 \times 10^6$	$3,4034 \times 10^4$	$1,93039 \times 10^3$

Como visto, comparando as respostas obtidas no domínio do tempo e comparando as respostas obtidas no domínio da frequência, tanto a simulação mais curta quanto a mais longa apresentam diferenças pequenas nos resultados. Nota-se que as maiores diferenças estão nas acelerações longitudinal e transversal no topo da torre e nos momentos Mx e My na base. Por exemplo, no domínio do tempo, comparando a simulação de 3000s em relação à de 300s o resultado de My é 3,7% maior e de Mx é 2,3% maior e comparando a simulação de 10000s em relação à de 3000s o My é 0,66% maior. No domínio da frequência os percentuais de diferença são ainda menores.

Além disso, percebe-se uma grande diferença de tempo de processamento para as simulações mais longas, fazendo com que muitas vezes se recorra à execução de uma simulação mais curta, sabendo-se que a precisão será um pouco menor. A simulação mais longa, com um vento simulado de 2,77 horas, levou cerca de 5,02 horas para obter os resultados no domínio do tempo e mais cerca 0,53 horas no domínio da frequência, enquanto que a simulação mais curta, com um vento simulado de 5 minutos, executada em um computador com menor poder de processamento, levou cerca de 1 minuto e meio para obter as respostas em cada um dos domínios. Desse modo, o tempo de processamento no domínio da frequência é notoriamente melhor do que no domínio do tempo para as simulações longas (9,37 vezes menor) e para a simulação mais curta o tempo de processamento no domínio da frequência foi praticamente igual, mas um pouco maior do que no domínio do tempo (o que indica que talvez para simulações curtas não haja vantagem aparente entre a utilização de um método ou outro).

10. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas informações em relação ao assunto tratado de aerogeradores e análise dinâmica com a ação do vento na estrutura de uma torre. Alguns casos foram simulados, com a aplicação de ventos com diferentes características para se fazer comparações. A geração do vento utilizou método que leva em conta a correlação espacial existente entre os diferentes pontos de incidência do vento na estrutura de forma espacial com um modelo de decaimento exponencial e com intensidade de turbulência variável com a altura. Foram utilizadas as metodologias do domínio do tempo e do domínio da frequência para análise da estrutura sujeita às diferentes condições de vento. Os desempenhos para a resolução das simulações com as duas metodologias, nos domínios do tempo e da frequência, foram comparados com o intuito de investigar suas vantagens e desvantagens. Os resultados alcançados se mostram consistentes e foram analisados, verificando o impacto que os diferentes parâmetros utilizados para geração do vento em cada caso exercem. Com isso, obteve-se uma ferramenta útil para análise preliminar (pré-projeto) da estrutura com a possibilidade de simular diferentes condições do vento que possam incidir sobre ela. De acordo com o local onde se deseja implementar uma dessas estruturas, pode-se conhecer os parâmetros necessários para se ter condições de vento simuladas mais próximo possível da realidade, além de ser possível a utilização de dados reais de uma estrutura quando estes estão disponíveis. Uma das dificuldades deste trabalho foi a de encontrar estruturas de aerogeradores com todas as suas propriedades listadas. O mesmo ocorreu para os dados das condições ambientais em que estas estruturas estavam expostas, de forma que pudessem ser reproduzidos fielmente, sendo, muitas das vezes, disponibilizado apenas alguns dos dados necessários.

Com as análises, nota-se que a velocidade média do vento é o fator determinante para a escolha do local de implantação de torres e parques eólicos, visto que, de acordo com as simulações feitas, este é o parâmetro que causa maior impacto nos resultados, tanto de deslocamentos, quanto de reações na estrutura, além é claro de fazer diferença em relação à produção de energia, a qual irá depender também do comportamento do vento. Portanto, conhecer as condições e comportamento do vento nos locais onde se pretende construir este tipo de estrutura é de suma importância, tanto para a produção energética quanto para o projeto e a segurança estrutural. Observou-se também a influência do tipo de terreno onde a torre se localiza, visto que, comparando-se as condições B e F, a condição F, com maior expoente da camada limite, resultou em deslocamentos e acelerações maiores no topo da estrutura e em reações maiores na

base dela.

Em relação a configurações para a simulação, notou-se que para casos com curto tempo a ser simulado, como no caso de até 300 segundos, o tempo de processamento dos dois métodos utilizados (domínio do tempo e domínio da frequência) foi praticamente igual, sendo o processamento no domínio do tempo um pouco mais veloz. Cabe salientar que ainda assim, para que os valores no domínio do tempo sejam confiáveis, deve-se realizar diversas simulações independentes no tempo e tomar as médias de seus resultados. Por outro lado, para casos com longo tempo a ser simulado, o método do domínio da frequência se mostrou muito vantajoso em termos de velocidade de processamento, sendo quase 9,37 vezes mais veloz para a simulação de 10000 segundos executada e cerca de 7,89 vezes mais veloz para a simulação de 3000 segundos executada.

Foram alcançados bons resultados em relação ao que foi proposto, sendo comparado qual melhor método de resolução (domínio do tempo ou frequência), concluindo-se que para simulações longas o domínio da frequência se mostra mais eficiente e para simulações curtas, os dois métodos tem eficiência similares. Em termos de precisão, ficou evidente que um bom refinamento (intervalos de tempo de integração ou número de linhas espectrais para discretização do espectro de vento) é essencial para garantia da confiabilidade nas respostas obtidas. Além disso, para aplicação da ação do vento sobre a estrutura foi possível ter um diferencial com a utilização da geração de campos de velocidades do vento correlacionados, que é uma abordagem mais realista em se tratando das características do comportamento do vento. E também, pôde-se analisar o quanto os parâmetros que caracterizam as diferentes condições de vento simuladas impactam nos resultados obtidos. Neste sentido, a simulação da ação o vento sobre os elementos das pás do aerogerador considerando os coeficientes aerodinâmicos pôde simular efeitos importantes como o de torção, mesmo para ventos com incidência eminentemente longitudinais.

10.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, algumas hipóteses foram tomadas para tornar o estudo das torres de aerogeradores viável tanto no domínio do tempo quanto da frequência, permitindo comparações e simulações de longos períodos de tempo. Estas simplificações poderão ser motivo de futuras investigações para avaliar seu efeito e importância nas simulações desenvolvidas.

Imagina-se que a avaliação dos esforços e deslocamentos na torre em conjunto e interagindo (efeito das esteiras) com outras torres num parque eólico levando em conta a geografia do terreno e a interação fluido-estrutura com modelos detalhados das mesmas, ainda seja um desafio não resolvido e que demande muito mais tempo para ser avaliado.

Um modelo mais detalhado em elementos finitos da torre com a discretização em casca e detalhes como a união por flanges internos das seções da torre, assim como modelamento das pás em materiais compósitos e metálicos, ou ainda eventuais aberturas na torre, são interessantes estudos que podem ser feitos. O efeito da fundação elástica, no caso de torres *off-Shore* também é uma sugestão de trabalho futuro a ser desenvolvido.

Dentre as hipóteses do campo de velocidades de vento, assumiu-se os espectros usuais presentes na literatura, entretanto, outros tipos de vento, como as Tormentas Tropicais (*Tropical Storms*) poderiam também ser empregadas, colocando a torre do aerogerador numa condição mais crítica. O efeito do desprendimento de vórtices também foi desprezado, apesar de existente, devido à altura considerável da torre e possibilidade de cancelamento dos efeitos das forças laterais, e também por diferentes velocidades críticas em função da altura da torre. Efeitos inerciais da rotação do rotor também foram desprezados, uma vez que a análise foi específica para um caso de aerogerador parado numa eventualidade de vento extremo.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil (Atualizado em 13/03/2019)**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Agência reguladora. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

ARSHAD, M., O'KELLY, B. C. Analysis and Design of Monopile Foundations for Offshore Wind-Turbine Structures. **Journal Marine Georesources & Geotechnology**, Taylor & Francis Group, LLC, v. 34, p. 503–525. 2015.

ASHURI, T.; ZAAIJER, M.; BRUSSEL, G.; van KUIK, G. An Analytical Model to Extract Wind Turbine Blade Structural Properties for Optimization and Up-scaling Studies. **3rd EWEA Conference - Torque 2010: The Science of making Torque from Wind**. Heraklion, Crete, Greece, jun, 2010. Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:a7c93ec4-7000-4bba-867b-b58e34de563e>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2017**. 2017. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/04/Boletim-Anual-de-Geracao-2017.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.

AWEA - American Wind Energy Association; ASCE - American Society of Civil Engineers. **Recommended practice for compliance of large land-based wind turbine support structures**. Washington, District of Columbia; Reston, Virginia: American Wind Energy Association and American Society of Civil Engineering, 2011.

BATHE, K. J. **Finite element procedures**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

BURTON, T., JENKINS, N., SHARPE, D., BOSSANYI, E. **Wind Energy handbook**. 2nd ed. John Wiley and Sons, 2011.

CHEYNET, E. **Wind field simulation (the user-friendly version)**. MATLAB Central File Exchange, Retrieved May 27, 2019. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/50041-wind-field-simulation-the-user-friendly-version>>. Acesso em: 29 mai. 2019.

CHEYNET, E.; JAKOBSEN, J. B.; SVARDAL, B.; REUDER, J.; KUMER, V. Wind coherence measurement by a single pulsed Doppler wind Lidar. **Energy Procedia**, v. 94, p. 462–477, 2016.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 3rd ed. Berkeley, CA, USA: Computers & structures, 2003.

DAVENPORT, A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 87, p. 194-211, abr. 1961.

DELLEZZOPOLLES JR., C. F. **Análise dinâmica de torres de energia eólica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

DEODATIS, G. Simulation of ergodic multivariate stochastic processes. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 122, no. 8, p. 778-787, 1996.

DIB, **Deutsches Institut für Bautechnik**, Richtlinie für Windenergieanlagen, 2012.

DUMBY, H. J. M. **Aspectos de dimensionamento de torres eólicas tubulares em aço**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra.

EWEA - EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. **Wind energy- the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power**. London, UK: Earthscan, 2009.

FEIJÓ, B. P. **Otimização de torres de aço para geradores eólicos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

FERREIRA, A. J. M. **MATLAB codes for finite element analysis: solids and structures**. Porto, Portugal: Springer, 2009.

FERREIRA, Y. A.; FUTAI, M. M. **Análise do comportamento das fundações de torres eólicas**. XVIII COBRAMSEG, Belo Horizonte, Brasil, 2016.

FURLANETTO, A. **Otimização do projeto estrutural de torres de aço para aerogeradores**. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GAO, Y.; WU, Y.; LI, D.; LIU, H.; ZHANG, N. An improved approximation for the spectral representation method in the simulation of spatially varying ground motions. **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 29, p. 7-15, 2012.

GHENO, R. M. **Campo de velocidades gerado pela combinação de ventos convectivos e sinóticos em cabos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GIACOMOLLI, L. **Otimização de micrositing de parques eólicos: uma abordagem metaheurística**. 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GUIDELINES for design of wind turbines. Copenhagen: Det Norske Veritas; Roskilde, Denmark: Wind Energy Department, Risø National Laboratory, 2002.

GUNDTOFT, S. **Wind turbines.** 2nd ed. University College of Aarhus, June, 2009.

GURLEY, K.; KAREEM, A. Gust loading factors for tension leg platforms. **Applied Ocean Research**, v. 15, p. 137-154, 1993.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind report: annual market update 2015.** 2016. Disponível em: <https://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2019.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind report: annual market update 2016.** 2017. Disponível em: <<http://files.gwec.net/files/GWR2016.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

GWEC - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind report: annual market update 2017.** 2018. Disponível em: <<http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf?ref=PR>>. Acesso em: 10 jul. 2019.

HURTY, W. C.; RUBINSTEIN, M. F. **Dynamics of structures.** New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited, 1967.

IEC 61400-1. International Electrotechnical Commission, 3rd edition, **Wind turbine generator systems Part1, Safety requirements**, 2005.

JEONG, M. S.; LEE, I.; YOO, S. J.; PARK, K. C. Torsional stiffness effects on the dynamic stability of a horizontal axis wind turbine blade. **Energies, MDPI**, v. 6, p. 2242-2261, Basel, Switzerland, 2013.

JSCE, Japan Society of Civil Engineers, **Guidelines for design of wind turbine support structures and Foundations**, 2010.

LI, Y.; Yu, C.; CHEN, X.; XU, X.; TOGBENOU, K.; XIANG, H. An efficient Cholesky decomposition and applications for the simulation of large-scale random wind velocity fields. **Advances in structural engineering**, v. 22, no. 6, p. 1255-1265, 2019.

LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; GRALA, P. Efeitos aerodinâmicos em uma chaminé de concreto armado de elevada esbeltez. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 12, no. 6, p. 1353-1382, dez. 2019.

LOUREIRO, M. A. F. **Dimensionamento de torre eólica de 90m.** Trabalho didático de Design of Steel Structures for Renewable Energy Systems, Mestrado em Sustainable Constructions under Natural Hazards and Catastrophic Events. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2014.

MA, Y.; MARTINEZ-VAZQUEZ, P.; BANIOPOULOS, C. Wind turbine tower collapse cases: a historical overview. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings**, Birmingham, United Kingdom, 2018.

MAGALHÃES, F. M. R. L. **Identificação modal estocástica para validação experimental de modelos numéricos**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

MALCOM, D. J., LAIARD, D. L. Extraction of Equivalent Beam Properties from Blade Models. **Wind Energy Journal**, v. 10, p. 135–157, 2007.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J.G.; ROGERS, A. L. **Wind energy explained: theory, design, and application**. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley and Sons, 2009.

MEIROVITCH, L. **Fundamentals of vibrations**. New York, NY: McGraw-Hill, 2001.

MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A.; SAMALI, B.; CHEUNG, J. Wind loading on tall buildings. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 7, p. 41-54, jan. 2007.

MORFIADAKIS, E.E.; GLINOI, G. L.; KOULOUVARI, M. J. The suitability of the von Karman spectrum for the structure of turbulence in a complex terrain wind farm. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, Wind Energy Department, Center for Renewable Energy Sources, Pikermi, Attika, Greece, 1996.

NEWLAND, D.E. **An introduction to random vibrations and spectral analysis**. 2nd ed. United Kingdom: Longman, 1984.

OH, S.; ISHIHARA, T. **A modified von Karman model for offshore wind field generation**. The eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Chennai, India, 2013.

OH, S.; ISHIHARA, T. Structural parameter identification of a 2.4 MW bottom fixed wind turbine by excitation test using active mass damper. **Wind Energy**, v. 21, no. 11, jun. 2018.

OLIVEIRA, L.F.M.P. **Análise do Comportamento Dinâmico de Torres de Geradores Eólicos**. 2012. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

OSGOOD, R.; BIR, G.; MUTHA, H.; PEETERS, B.; LUCZAK, M.; SABLON, G. Full-scale modal wind turbine tests: comparing shaker excitation with wind excitation. **Structural Dynamics and Renewable Energy**, v. 1, p. 113-124. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, New York, NY, 2011.

PAZ, M.; LEIGH, W. **Structural dynamics: theory and computation**. 5th ed. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2014.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4^a ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RIERA, J. D. Sobre a definição do vento para projeto estrutural na ABNT NBR 6123 (1989) e outras normas sul americanas. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, ASAE, Passo Fundo, v. 13, no. 3, p. 1-27, set./dez. 2016.

RIERA, J. D.; AMBROSINI, R. D. Analysis of structures subjected to random loading using the transfer matrix or numerical integration methods. **Engineering Structures**, v. 14, no. 3, 1992.

RODRIGUÉZ, A. G. G.; RODRIGUÉZ, A. G.; PAYÁN, M. B. Estimating Wind Turbines Mechanical Constants, **RE&PQJ**, v. 1, no. 5, 2007.

SHAMPINE, L.F. Vectorized Adaptive Quadrature in MATLAB. **Journal of Computational and Applied Mathematics**. v. 211, p. 131–140, 2008.

SHINOZUKA, M. Monte Carlo solution of structural dynamics. **Computers & Structures**, Great Britain, v. 2, p. 855-874, 1972.

SHINOZUKA, M.; DEODATIS, G. Simulation of stochastic processes by spectral representation. **Applied Mechanics Reviews**, v. 44, no. 4, abr. 1991.

SHINOZUKA, M.; JAN, C. M. Digital Simulation of Random Processes and Its Applications. **Journal of Sound and Vibration**, v. 25, no. 1, p. 111-138, nov. 1972.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: fundamentals and applications to design**. 3rd. Ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.

SPERA, David A. (Ed.). **Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering**. 2nd Ed. New York: ASME, 2009.

SØRENSEN, P. E. **Frequency domain modelling of wind turbine structures**. Annual report, Technical University of Denmark, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1994.

TORII, A. J. **Análise dinâmica de estruturas com o método dos elementos finitos generalizado**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências, área de concentração: Mecânica Computacional) - Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VALLIS, M. B. **Modelo Climático para ventos extremos no Brasil**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAN ZYL, W. S.; VAN ZIJL, G. P. A. G. Dynamic behavior of normally reinforced concrete wind turbine support structures. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 57, n. 4, p. 38-44, dez. 2015.

WANG, J.; CHEYNET, E.; SNÆBJÖRNSSON, J. P.; JAKOBSEN, J. B. Coupled aerodynamic and hydrodynamic response of a long span bridge suspended from floating towers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 177, p. 19-31, jun. 2018.

ZENDEHBAD, M.; CHOKANI, N.; ABHARI, R. S. Measurements of tower deflections on full-scale wind turbines using an opto-mechanical platform. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 168, p. 72-80, set. 2017.

**APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DOS ALGORITMOS PARA A
ANÁLISE ESTRUTURAL DE AEROGERADORES**

Com o intuito de expor de forma didática e resumida os passos principais dos procedimentos necessários para a obtenção dos resultados da análise dinâmica estrutural realizada neste trabalho, o presente apêndice mostra, na Figura A.1, um fluxograma dos algoritmos utilizados. De acordo com o que foi desenvolvido no trabalho, o fluxograma traz os passos principais para a análise, partindo dos parâmetros de entrada, com dados dos ventos simulados e da estrutura do aerogerador, até os dados de saída apresentados. Para maior clareza, há indicação dos capítulos ou equações mostradas no trabalho que correspondem aos cálculos de cada etapa.

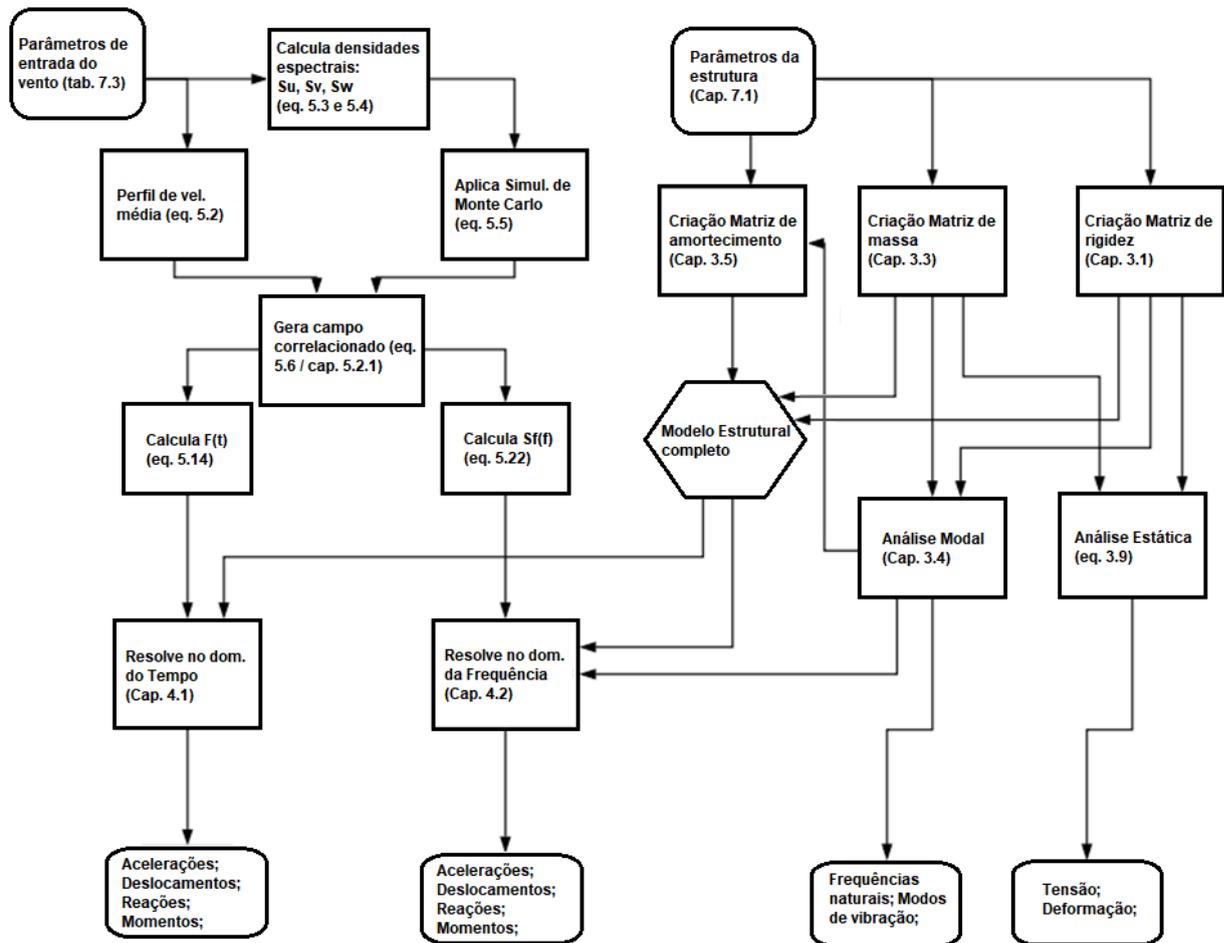


Figura A.1 – Fluxograma dos algoritmos utilizados para a análise estrutural de aerogeradores nos domínios do tempo e da frequência.