

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES DE GERADORES EÓLICOS SOB CARREGAMENTO
ALEATÓRIO DO VENTO

por

Lucas Carminatti Foschiera

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2018.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DINÂMICA DE TORRES DE GERADORES EÓLICOS SOB CARREGAMENTO
ALEATÓRIO DO VENTO

por

Lucas Carminatti Foschiera

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo o apoio e incentivo que me transmitiram ao longo dos anos. Ao meu orientador, Prof. Herbert Martins Gomes, pela confiança e ensinamentos que tornaram possível a realização deste trabalho. A todas as amizades feitas neste período de graduação pelo companheirismo, momentos de descontração e ajuda no crescimento pessoal e profissional.

FOSCHIERA, L. C. **Análise dinâmica de torres de geradores eólicos sob carregamento aleatório do vento**. 2018. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Nos últimos anos a utilização de energias renováveis e limpas cresceu substancialmente. No Nordeste Brasileiro, em 2017, ela representou 50% do abastecimento em energia. O Brasil é um país de enorme potencial gerador e neste contexto, o projeto de torres de aerogeradores merece um destaque especial no impacto de custos e segurança na viabilidade econômica de empreendimentos. Avaliar esforços e deslocamentos tanto nas pás, torres e fundações é de vital importância para o correto projeto de tais estruturas. Este trabalho propõe uma metodologia para avaliar o comportamento dinâmico de aerogeradores levando em conta o efeito da ação do vento em seus componentes estruturais (torre, nacelle e pás). Este comportamento é importante principalmente para a correta avaliação das componentes flutuantes de esforços que surgem devido à condição aleatória do vento. Para isto, um modelo de geração de sinais de velocidade do vento correlacionados no tempo e no espaço é adotado. Este, segue uma Densidade Espectral de Potência usual de von Kármán que possui parâmetros como intensidades de turbulência e desvios padrões das flutuações da velocidade do vento nas três direções, perfil de velocidades com a altura, e coeficientes de decaimento da coerência com a distância entre os pontos de ação do vento. É investigada se a análise feita no domínio do tempo e diretamente no domínio da frequência está adequada quanto ao tempo de simulação e ao esforço computacional na avaliação dos valores RMS de sinais de aceleração e deslocamentos em pontos específicos do aerogerador, assim como reações nas fundações. O modelo proposto do aerogerador leva em conta os perfis de esforços como cortantes, momentos fletores e torsões. A implementação foi realizada em ambiente e linguagem de programação Matlab com rotinas próprias para visualização de grandezas de interesse de forma sistematizada. Uma metodologia no domínio do tempo pelo Método de Newmark para a integração é utilizada nas simulações no tempo. Para as simulações no domínio da frequência, a integração direta das densidades espectrais de potências das grandezas de interesse (deslocamentos, acelerações, etc) pelo método dos trapézios é empregado. Resultados para uma simulação típica são investigados e comparadas em situações diversas de velocidade de vento e parâmetros para a simulação da estrutura. Resultados obtidos indicam similaridades quanto a frequências naturais, modos de vibração além de amplitudes de vibração com casos relatados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: aerogeradores, método de Newmark, análise no domínio da frequência, geração de campo de vento correlacionado.

FOSCHIERA, L. C. **Dynamic analysis of wind turbine towers under random wind loading.** 2018. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

In recent years, the use of renewable and clean energy has grown substantially. In the Northeast of Brazil, in 2017, it accounted for 50% of the energy supply. Brazil is a country with enormous generating potential and in this context, the project of wind turbine towers deserves a special highlight in the impact of costs and safety on the economic viability of ventures. Evaluating loads and displacements in both blades, towers and foundations is of vital importance for the economic design of such structures. This work proposes a methodology to evaluate the dynamic behavior over time of wind turbines taking into account the effects of wind on its structural components (tower, nacelle and blades). This behavior is important mainly for the correct evaluation of the floating components of stresses that arise due to the random wind condition. For this, a model of generation of wind velocity signals correlated in time and space is adopted. This follows a usual von Karman Power Spectral Density which has parameters such as turbulence intensities and standard deviations of the wind speed fluctuations in the three directions, velocity profile with height, and decay coefficients of the coherence with the distance between the points of wind action. It is investigated whether the time domain and frequency domain analysis are adequate in terms of simulation time and computational costs for the evaluation of RMS values of acceleration and displacement signals at specific points of the wind turbine as well as base reactions. The proposed model of the wind turbine takes into account the aerodynamic profiles of the blades and the actions generated in the tower in the lateral direction due to the longitudinal wind. Finite elements of the (three-dimensional) type of bars are used to obtain loads such as shear, bending moments and torsion. The implementation was performed in Matlab environment and programming language with routines for visualization of quantities of interest in a systematized way. A time domain methodology by the Newmark Method for integration is used in time simulations. For the simulations in the frequency domain, the direct integration of specific power spectral densities (displacements, accelerations, etc.) by the trapezoidal rule is employed. Results for a typical simulation are investigated and compared in different situations of wind speed and parameters for the simulation of the structure. The obtained results present similarities regarding natural frequencies, main modes of vibration as well as vibration magnitude with cases reported in the literature.

KEYWORDS: Wind Turbines, Newmark method, frequency domain analysis, correlated wind field generation.

ÍNDICE	Pág.
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 Geradores eólicos	2
4. MODELAGEM NUMÉRICA	3
4.1 Análise Estática.....	4
4.2 Análise dinâmica no domínio do tempo	4
4.3 Análise dinâmica modal no domínio da frequência.....	4
5. ANÁLISE NUMÉRICA E SIMULAÇÃO	5
5.1 Modelagem do vento.....	5
5.2 Geração do campo de vento correlacionado	6
5.3 Gerador eólico.....	7
5.4 Cálculo da Ação do vento na estrutura.....	7
6. RESULTADOS	9
6.1 Velocidade do Vento	9
6.2 Frequências naturais e modos de vibração	10
6.3 Comparativo da Resposta dinâmica.....	11
6.3.1 Resposta no tempo com carregamentos distintos	12
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICES	16
ANEXOS	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Principais elementos de um aerogerador.....	2
Figura 3.2 – Densidades relativas e inércias equivalentes relativas para seção de pá de aerogerador WindPACT 1,5MW.	3
Figura 5.1 – (a) Espectro de energia para o vento e (b) principais espectros de rajadas de vento na engenharia.	6
Figura 5.2 – (a) Aplicação de forças do vento. (b) Coef. aerodinâmico x ângulo de ataque.....	8
Figura 5.3 – (a) Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador. (b) Esforços aerodinâmicos no sistema de local do elemento de pá do aerogerador.	8
Figura 6.1 – Perfil de velocidade média do vento (vermelho) e perfis de velocidade turbulenta (preto) em alguns instantes de tempo, para vento longitudinal e transversal.	10
Figura 6.2 – Seis primeiras frequências naturais e modos de vibração da estrutura.	10
Figura 6.3 – Densidade Espectral de Potência do deslocamento no topo da torre (nó 2): (a) direção longitudinal e (b) direção lateral, para a condição de vento A.	11
Figura 6.4 – Força do vento atuante sobre a estrutura e deslocamento causado para o topo da torre nas direções x e y.	12
Figura 6.5 – Forças aplicadas pelo carregamento e deslocamentos causados no topo da torre para ambas as condições de vento.	13
Figura 6.6 – Reações e esforços em algumas barras em função do tempo.....	13
Figura A1 – Modelo discretizado do Aerogerador.....	16
Figura A2 – Comparação da correlação da velocidade do vento avaliada pelo sinal do tempo.	16
Figura A6 – Algoritmo de análise estrutural desenvolvido.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Parâmetros de entrada para a simulação.	9
Tabela 6.2 – Valores de força e momento sobre as estruturas.....	11
Tabela 6.3 – Valores RMS das solicitações turbulentas para alguns pontos.	13
Tabela A6 – Dimensões da torre.	17
Tabela A4 – Valores do coeficiente de arrasto.	17
Tabela A5 – Taxa de amortecimento estrutural.	17

1. INTRODUÇÃO

A análise de estruturas de torres de geradores eólicos faz parte do projeto destes sistemas de captação de energia a partir de parques e fazendas eólicas. No Brasil o investimento neste tipo de geração de energia tem aumentado recentemente frente à volatilidade do mercado de energias não renováveis de carvão e petróleo e à crescente demanda por energia.

Análises numéricas de comportamento estrutural dinâmico ao longo do tempo assim como comportamento no domínio da frequência são ferramentas essenciais para um projeto econômico de um aerogerador. Isto é relevante quando diversas combinações de carregamentos (situações) devem ser previstas por imposição normativas ou mesmo análises mais detalhadas quanto à flambagem e fadiga de elementos estruturais devido à característica oscilante das ações externas (principalmente vento) ao longo do tempo de serviço destes sistemas mecânicos.

Relatos em 2012 de quedas de torres de aerogeradores no Parque de Cerro Chato (Santana do Livramento) frente a tormentas TS (*Tropical Storms* – Ciclones tropicais de 250 km/h) indicam o vento extremo como o principal causador das falhas. Entretanto outras causas também são relatadas como desbalanceamento, sistemas de freios do aerogerador, fadiga de baixo e alto ciclo, aberturas, descontinuidades entre partes, pás defeituosas, além de causas de construção, raios, incêndio e fissuras em partes dos componentes [Ma *et al*, 2018]

1.1 Motivação

O estudo dos esforços, vibrações e reações nas fundações em sistemas de aerogeradores tem sido motivo de diversos trabalhos na literatura e o seu correto entendimento e modelamento permite projetos mais econômicos. Esta economia de projeto reflete no custo final de implantação inicial de um parque eólico composto por diversas torres de aerogeradores. O desenvolvimento de ferramentas para simulações e testes numéricos para aerogeradores é foco de diversas empresas que visam aumentar a segurança destes sistemas, assim como a redução dos custos envolvidos em sua construção.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia de análise de estruturas de torres de geradores eólicos no domínio do tempo e frequência com a possibilidade de obter informações como esforços, frequências naturais, deslocamentos, reações nas fundações, etc. baseadas na geração no tempo de sinais de ventos definidos pelas suas densidades espectrais e propriedades da torre de aerogerador, simulada de forma simplificada, em elementos finitos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A necessidade da análise dinâmica de estruturas altas e esbeltas submetidas ao carregamento gerado pelo vento é destacada por Simiu e Scanlan, 1996, e Blevins, 1977, que associa a necessidade da análise de vibrações introduzidas por carregamentos flutuantes com o crescimento da esbeltez da estrutura. A norma brasileira NBR6123, 2013 também destaca a necessidade desta análise em estruturas esbeltas ou qualquer estrutura cuja maior dimensão vertical ultrapasse 50m.

Para estruturas de comportamento linear, a determinação da resposta estrutural pode ser obtida fazendo uso das propriedades estatísticas do fluxo de vento e funções de transferência, obtendo-se o espectro da resposta estrutural, como descrito por Clough e Penzien, 1993, os quais destacam ainda que, para este tipo de análise, métodos no domínio da frequência podem representar a técnica de solução mais conveniente.

Para dinâmica estrutural, Shinozuka, 1972, apresenta uma metodologia para aplicação de Simulação de Monte Carlo (SMC) para a simulação multivariável de processos Gaussianos aleatórios como do vento. Pagnini e Solari, 2002, utilizaram a SMC para a simulação de parâmetros de turbulência incertos. Os autores concluíram que o método oferece uma representação efetiva da dispersão nas funções espectrais de turbulência atmosférica. Verifica-se, ainda, que o mesmo permite a análise da propagação de tais incertezas na resposta estrutural

excitada pelo vento. Yasui *et al.*, 1999 utilizam dados de pressão obtidos em túnel de vento para gerar séries temporais de carregamento através de uma simulação de Monte Carlo. Os autores ressaltam a similaridade dos espectros de potência obtidos experimentalmente e pela simulação.

Ambrosini *et al.*, 2002 propuseram uma formulação para a análise de estruturas esbeltas sob a ação do vento. O carregamento do vento é modelado no domínio da frequência, como um processo estocástico Gaussiano estacionário, que torna esta hipótese aplicável a sistemas extensos de pressão, mesmo casos de tempestades tropicais. Este tipo de análise permite “a consideração de comportamentos do material dependentes do tempo, sem dificuldades adicionais”. O procedimento é aplicado a duas estruturas e os resultados comparados àqueles disponíveis na literatura, como prova de conceito. Importante notar que no referido trabalho apenas o carregamento é determinado no domínio da frequência, o qual é convertido em série temporal para análise por integração direta no domínio do tempo.

Para o caso específico de análise no domínio da frequência de turbinas eólicas constata-se uma escassez de trabalhos na literatura, destaca-se Halfpenny, 1998 que em sua dissertação de doutorado propõe uma metodologia para análise de turbinas eólicas *on e off shore* no domínio da frequência, considerando também o carregamento decorrente das ondas no caso *off shore*. No entanto, sua metodologia se baseia na utilização de pacotes de análise numérica comerciais e sua adaptação para o caso específico, somando-se aos significativos avanços no campo da computação nos últimos vinte anos sua metodologia é passível de revisão.

No presente trabalho a SMC foi utilizado para geração de séries temporais de velocidade e densidades espectrais espacialmente correlacionadas, utilizando o algoritmo desenvolvido por Cheynet [Wang *et al.*, 2018].

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Geradores eólicos

Geradores eólicos são equipamentos cuja função é a conversão da energia cinética do vento em alguma forma útil de energia, geralmente energia elétrica. Os aerogeradores podem ser classificados de acordo com a orientação do eixo do rotor, podendo ser eixo vertical ou horizontal, sendo os mais utilizados atualmente são os de eixo horizontal. Sistemas modernos em larga escala são tipicamente compostos por turbinas de eixo horizontal de três pás em conjunto nas chamadas fazendas eólicas. Eles são compostos principalmente por pás, rotor, nacelle, plataforma, torre e fundação. A Figura 3.1 indica estes principais componentes.

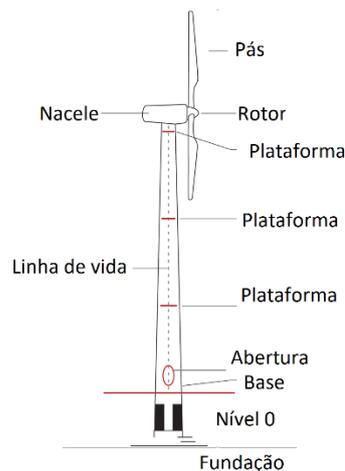


Figura 3.1 – Principais elementos de um aerogerador.

Torre é a estrutura que suporta a nacelle e o rotor, e que ao mesmo tempo proporciona a elevação necessária para o melhor aproveitamento do vento. Precisam possuir robustez suficiente para suportar os esforços causados pelo vento, o peso do conjunto rotor/nacelle, força de *thrust*, desbalanceamento quando em funcionamento bem como o seu peso próprio.

As torres tubulares são o tipo de estrutura mais usados atualmente, na construção de turbinas eólicas. São compostas por secções cónicas de 20 a 30 m de comprimento que são unidas por juntas internas de flanges parafusadas. Este comprimento máximo das secções é regido pelos requisitos de transporte e montagem. A prevalência de torres tubulares em geradores eólicos modernos se deve basicamente a três fatores: facilidade de montagem; a segurança e conforto para o acesso da nacelle; e por ser esteticamente menos invasivo para a paisagem. Devido a seu papel estrutural crítico somado ao fato de que seu custo corresponde a aproximadamente 30% do valor total do aerogerador, é natural que existam grandes incentivos para o preciso dimensionamento de sua estrutura, de forma a minimizar custo e garantir a integridade do aerogerador durante toda sua vida útil.

A pás são construídas de materiais leves como polímeros, fibra de vidro, resinas e madeira, para a minimizar a inércia rotacional do equipamento, apresentam formato aerodinâmico de forma a otimizar a captação da energia do vento e a faixa de velocidades em que podem operar. Para simulações simplificadas, as propriedades mecânicas da pá podem ser avaliadas em cada seção da pá, de forma a obter um modelo compatível em termos de rigidez e massa para avaliação de deslocamentos e frequências naturais. Isto se faz com aproximações que igualam estas propriedades às de uma seção equivalente de barras [Rodríguez *et al.*, 2007, Malcolm *et al.*, 2007 e Ashuri *et al.*, 2010]. Para uma pá modelo WindPACT 1.5MW (R=35m), tem-se um gráfico como o indicado na Figura 3.2, onde as rigidezes na direção e perpendicular aos bordos e rigidez torcional, assim como densidade, são dadas em função destes parâmetros na raiz da pá e da distância adimensional até a raiz. Sabendo as informações na raiz da pá, podem-se obter as informações do restante da pá. O presente trabalho faz uso da aproximação citada anteriormente para modelar, de maneira simplificada, as pás do gerador eólico.

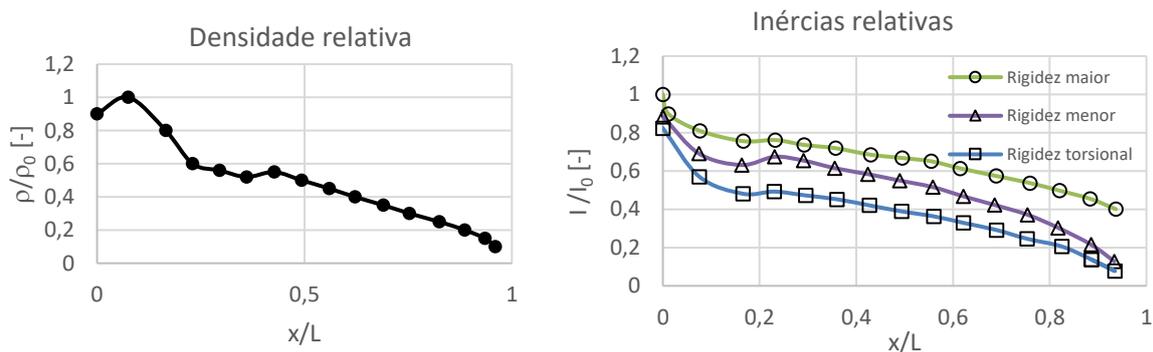


Figura 3.2 – Densidades relativas e inércias equivalentes relativas para seção de pá de aerogerador WindPACT 1,5MW. (Malcolm *et al.*, 2007)

4. MODELAGEM NUMÉRICA

A torre de gerador eólico, no contexto do Método dos Elementos Finitos, forma um sistema de equações diferenciais para as três direções de movimento da estrutura dado por:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{F}(t)\} \quad (4.1)$$

onde $\{\mathbf{F}(t)\}$ representa o vetor de carregamento, nas três direções, aplicado sobre a estrutura, $[\mathbf{M}]$ a matriz de massa da estrutura, $[\mathbf{C}]$ matriz de amortecimento estrutural e $[\mathbf{K}]$ matriz de rigidez. Foram utilizados elementos finitos 3D de vigas para o modelamento, ou seja, o vetor de deslocamentos no espaço $\{\mathbf{x}(t)\}$ é representado por todas as componentes dos graus de liberdade $u, v, w, \theta_u, \theta_v, \theta_w$ e suas derivadas, $\{\dot{\mathbf{x}}(t)\}$, $\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\}$.

A resolução deste sistema de equações diferenciais de segunda ordem pode ser efetuada: no domínio de tempo, recorrendo a funções de resposta; no domínio da frequência, pela aplicação da transformada de Fourier a ambos os lados da equação;

4.1 Análise Estática

Através do método da rigidez, é resolvido um sistema de equações que determina incógnitas do problema, como deslocamentos, reações e esforços solicitantes em cada nó. Este método assume os elementos 3D de vigas, estas unidas através de seus nós, os quais possuem 6 graus de liberdade cada. A partir de equações constitutivas e de compatibilidade, é expresso o comportamento individual de cada barra. Uma vez obtida a matriz de rigidez, é feita a adequação do sistema local dos elementos com o sistema global de equações de equilíbrio. O sistema de equações de equilíbrio típico de uma estrutura de pórtico 3D pode ser colocado como:

$$[\mathbf{K}]\{x\} = \{F\} \quad (4.2)$$

onde $[\mathbf{K}]$ é a matriz de rigidez global da estrutura, $\{x\}$ é o vetor de deslocamento nodal, e $\{F\}$, o vetor das forças externas aplicadas nos nós e graus de liberdade a matriz de rigidez no sistema global $[\mathbf{K}_e]$ de um elemento é definida como:

$$[\mathbf{K}_e] = [\mathbf{T}]^T [\mathbf{k}] [\mathbf{T}] \quad (4.3)$$

onde $[\mathbf{K}_e]$ é a matriz de rigidez no sistema global do elemento, $[\mathbf{T}]$ é a matriz de rotação, e $[\mathbf{k}]$, a matriz de rigidez em coordenadas locais. Para a obtenção da matriz global $[\mathbf{K}]$ procede-se à montagem (superposição) das $[\mathbf{K}_e]$ utilizando-se a numeração dos graus de liberdades efetivos. Diante destes dados, podem ser averiguadas os deslocamentos e esforços e assim as condições do sistema a fim de garantir a segurança da estrutura.

4.2 Análise dinâmica no domínio do tempo

A matriz de massa para o elemento é avaliada de acordo com a formulação consistente, e pode ser calculada a partir da mesma transformação. Utilizando a expressão da energia cinética associada ao elemento, obtém-se a matriz de massa consistente para o sistema global:

$$[\mathbf{M}_e] = [\mathbf{T}]^T [\mathbf{m}] [\mathbf{T}] \quad (4.4)$$

onde $[\mathbf{M}_e]$ é a matriz consistente do elemento em coordenadas globais, $[\mathbf{T}]$ é matriz de transformação, e $[\mathbf{m}]$, a matriz de massa consistente em coordenadas locais. A matriz global $[\mathbf{M}]$ é obtida da mesma forma que $[\mathbf{K}]$. Um modelo de amortecimento proporcional é empregado de forma que $[\mathbf{C}]$ é diagonalizável com a matriz de modos. Inicialmente é especificado apenas as razões de amortecimento para cada modo e então, $[\mathbf{C}]$ é calculada a partir das frequências e modos de vibração, orto-normalizados pela massa modal.

Para a resolução do sistema de equações diferenciais de movimento acopladas, utilizou-se o método de integração numérica implícita de Newmark. Segundo Clough e Penzien, 1993, a estabilidade deste método depende dos parâmetros α e β e ele é incondicionalmente estável para $\alpha \geq (1/4)(\beta + 1/2)^2$ e $\beta \geq 1/2$. As equações de recorrência para a aplicação de equações de movimento, considerando a variação linear da aceleração, velocidade e deslocamento em intervalos de tempo Δt , são:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{i+1} = & \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} [\mathbf{M}] + \frac{\beta}{\alpha(\Delta t)^2} [\mathbf{C}] + [\mathbf{K}] \right]^{-1} \times \left\{ \ddot{F}_{i+1} + [\mathbf{M}] \left(\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \ddot{x}_i + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\ddot{x}}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\ddot{x}}_i \right) + \right. \\ & \left. [\mathbf{C}] \left(\frac{\beta}{\alpha \Delta t} \ddot{x}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\ddot{x}}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \ddot{\ddot{x}}_i \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

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

$$\dot{\ddot{x}}_{i+1} = \dot{\ddot{x}}_i + [(1 - \beta)\ddot{\ddot{x}}_i + \beta\ddot{\ddot{x}}_{i+1}]\Delta t \quad (4.7)$$

A escolha do intervalo de tempo é tal que possibilita a captura das pequenas variações de força, neste caso $\Delta t = 5 \times 10^{-3}$ s.

4.3 Análise dinâmica modal no domínio da frequência

As frequências naturais e modos de vibração do sistema são computadas a partir da solução do problema de autovalores e autovetores:

$$([\mathbf{K}] - \omega^2[\mathbf{M}])\{\boldsymbol{\varphi}\} = \mathbf{0} \quad (4.8)$$

onde ω representa as frequências de vibração (diagonal) (rad/s) e $\{\boldsymbol{\varphi}\}$ é a matriz das formas naturais de vibração (cada coluna representando um modo). Este vetores são ortonormalizados, de forma que $\{\boldsymbol{\varphi}\}^T[\mathbf{M}]\{\boldsymbol{\varphi}\} = \mathbf{I}$ com \mathbf{I} sendo a matriz identidade e $\{\boldsymbol{\varphi}\}^T[\mathbf{K}]\{\boldsymbol{\varphi}\} = [\boldsymbol{\Lambda}]$, com $\text{diag}([\boldsymbol{\Lambda}]) = \{\omega_1^2, \dots, \omega_n^2\}^T$, os quadrados das frequências naturais. Com a hipótese de amortecimento diagonalizável, ou seja, $\{\boldsymbol{\varphi}\}^T[\mathbf{C}]\{\boldsymbol{\varphi}\} = \text{diag}(2\xi_1\omega_1, \dots, 2\xi_n\omega_n)$, chega-se à matriz de amortecimento global:

$$[\mathbf{C}] = \{\boldsymbol{\varphi}\}^{-T} \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 2\xi_n\omega_n \end{bmatrix} \{\boldsymbol{\varphi}\}^{-1} = \{\boldsymbol{\varphi}\}^{-T} 2[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]\{\boldsymbol{\varphi}\}^{-1} \quad (4.9)$$

Assumindo separabilidade de tempo e espaço dos modos e da vibração $\mathbf{x}(t) = \{\boldsymbol{\varphi}\}\boldsymbol{\eta}(t)$, a equação do movimento fica $[\mathbf{I}]\{\ddot{\boldsymbol{\eta}}(t)\} + 2[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]\{\dot{\boldsymbol{\eta}}(t)\} + [\boldsymbol{\Lambda}]\{\boldsymbol{\eta}(t)\} = \{\boldsymbol{\varphi}\}^T\{\mathbf{F}(t)\} = \{\mathbf{F}_m(t)\}$, que é desacoplada linha a linha. Procedendo-se à transformada de Fourier desta equação chega-se à $-\omega^2[\mathbf{I}]\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} + 2i\omega[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]^{1/2}\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} + [\boldsymbol{\Lambda}]\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = \{\mathbf{F}_m(\omega)\}$ que pode ser simplificada como $\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = [\mathbf{H}_m(\omega)]\{\mathbf{F}_m(\omega)\}$. Assim, a função de transferência do sistema no espaço modal fica:

$$[\mathbf{H}_m(\omega)] = [-\omega^2[\mathbf{I}] + 2i\omega[\mathbf{Z}][\boldsymbol{\Lambda}]^{1/2} + [\boldsymbol{\Lambda}]]^{-1} \quad (4.10)$$

A densidade espectral de um processo linear, $\{\boldsymbol{\eta}(\omega)\} = [\mathbf{H}_m(\omega)]\{\mathbf{F}_m(\omega)\}$, é definido como $[\mathbf{S}_\eta(\omega)] = [\mathbf{H}_m(\omega)][\mathbf{S}_{Fm}(\omega)][\mathbf{H}_m^*(\omega)]^T$, com o “*” representando o conjugado complexo, \mathbf{S}_{Fm} a densidade espectral das forças modais e $\mathbf{H}_m(\omega)$ a função de transferência [Newland, 1984]. Voltando ao espaço das variáveis reais $\mathbf{x}(t)$, chega-se à expressão para a densidade espectral dos graus de liberdade, $[\mathbf{S}_x(\omega)] = \{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m(\omega)]\{\boldsymbol{\varphi}\}^T[\mathbf{S}_F(\omega)]\{\boldsymbol{\varphi}\}[\mathbf{H}_m^*(\omega)]^T\{\boldsymbol{\varphi}\}^T$ que são as densidades espectrais das variáveis do problema original. Pela definição de densidade espectral a partir da função e correlação, para avaliar o valor *rms* de determinada variável com média zero, basta então extrair a raiz da integração do respectivo espectro no domínio da frequência,

$$E[\{x^2(t)\}_i] = (1/T) \int_0^T x_i^2(t) dt = (x_{i,rms})^2 = 2 \int_0^\infty [S_x(\omega)]_{i,i} d\omega \quad (4.11)$$

onde o valor da integral é duplicado para levar em conta que $[S_x(\omega)]_{i,i}$ é definido entre $-\infty$ e ∞ . E a integral ser realizada entre 0 e ∞ . Para outras grandezas derivadas, vale $[\mathbf{S}_{\dot{x}}(\omega)] = \omega^2[\mathbf{S}_x(\omega)]$ e $[\mathbf{S}_{\ddot{x}}(\omega)] = \omega^4[\mathbf{S}_x(\omega)]$ [Newland, 1984]. Para tensões internas de um determinado elemento finito, vale $\{\boldsymbol{\sigma}^e(t)\} = [\mathbf{B}^e]\{\mathbf{x}^e(t)\}$, logo, $[\mathbf{S}_\sigma^e(\omega)] = [\mathbf{B}^e][\mathbf{S}_x^e(\omega)][\mathbf{B}^e]^T$, o mesmo valendo para reações de apoio, deformações, etc.

5. ANÁLISE NUMÉRICA E SIMULAÇÃO

5.1 Modelagem do vento

A avaliação dos esforços causados pelo vento sobre o aerogerador depende de uma precisa modelagem dos valores de velocidade que atingem o gerador. A Figura 5.1 indica a natureza mutável da velocidade do vento na camada limite atmosférica na forma de espectro de energia. O espectro de energia é caracterizado por dois picos distintos com uma longa lacuna entre eles. Os efeitos que causam os dois picos são respectivamente em macro e microescala. Os efeitos macro meteorológicos são de ordem global e causados pelo fluxo de ar entre sistemas de pressão criados na atmosfera da terra pelo aquecimento diferencial formando células de alta e baixa pressão que ainda são modificados pelo efeito Coriolis da rotação da terra. Do ponto de vista estrutural, esses ventos representam o carregamento que ocorrerá de forma persistente na vida útil da turbina. Os efeitos micro meteorológicos são rajadas turbulentas causadas primordialmente pelo atrito com o solo e obstáculos na vizinhança da turbina.

A lacuna espectral (Figura 5.1a) abrange os períodos de 5 minutos a 5 horas onde há relativamente poucos efeitos físicos para alimentar em energia o sistema ao longo deste intervalo. A lacuna espectral permite que as estatísticas de longo e curto prazo sejam separadas. Desta forma a velocidade do vento pode ser descrita como a soma da parcela média e da parcela flutuante conforme equação:

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

A velocidade média ($\bar{U}(z)$) é modelada sob a hipótese de camada limite atmosférica fazendo com que seja função da altura e pode ser representada de forma logarítmica ou exponencial, em função da velocidade u_r em uma altura de referência z_r , neste trabalho a forma de potência é usada: $\bar{U}(z) = u_r (z/z_r)^\alpha$. A característica fundamentalmente aleatória de formação das rajadas impede o tratamento determinístico das velocidades do vento, exigindo um estudo estatístico. Uma metodologia atraente para este tipo de análise é através da densidade espectral.

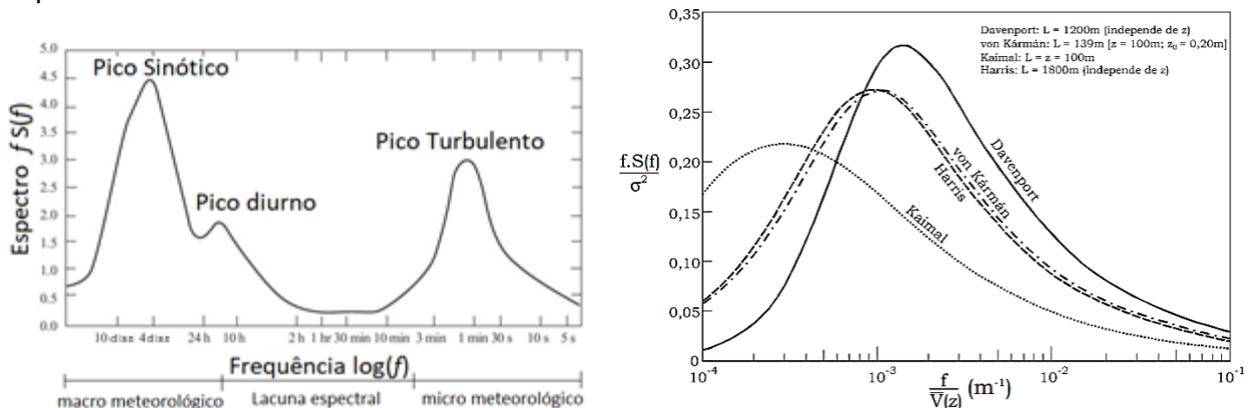


Figura 5.1 – (a) Espectro de energia para o vento e (b) principais espectros de rajadas de vento na engenharia (adaptado de Lazanha, 2003).

Para a representação do vento na engenharia de estruturas, os espectros mais utilizados são os propostos por Kaimal, von Kármán, Harris e Davenport, mostrados na Figura 5.1b, estes são obtidos a partir de medidas da velocidade do vento para diferentes tipos de terrenos e alturas. Para o espectro de von Kármán, tem-se as equações:

$$S_u(f) = \sigma_u^2 \frac{4 \left(\frac{L_i}{U_{z_0}}\right)}{[1 + 70.8(fL_u/U_{z_0})^2]^{5/6}} \quad \text{e} \quad S_j(f) = \sigma_j^2 \frac{4[L_j/U_{z_0}](1 + 188.4(fL_j/U_{z_0})^2)}{[1 + 70.8(fL_u/U_{z_0})^2]^{11/6}} \quad j = v, w \quad (5.1)$$

sendo U_{z_0} a velocidade longitudinal média na altura de referência z_0 , L_i o comprimento de escala de separação da turbulência da i -ésima componente e f a frequência [Hz]. A unidade da densidade espectral S_u é (m/s)²/Hz. Como demonstrado por Morfiadakis *et al.*, 1996, quando comparado com valores medidos para a aplicação em parques eólicos, o espectro de von Kármán demonstrou uma melhor concordância na escala e forma do espectro de potência para condições de fluxo livre. Por este motivo, para a sequência deste trabalho será utilizado este espectro, sob a hipótese de fluxo livre e atmosfera estável.

5.2 Geração do campo de vento correlacionado

Para a geração do campo de vento foi utilizado o algoritmo desenvolvido por Wang e Cheynet, 2018 o qual foi desenvolvido para análise de uma ponte de grande comprimento. O método é baseado em uma simulação de Monte Carlo, cujos fundamentos de sua utilização na engenharia estrutural foram firmados por Shinozuka, 1972, que basicamente indica para um processo aleatório regido por uma certa densidade espectral a formulação $x(t) = \sum_{i=1}^{nls} \sqrt{2S_x(\omega_i)} d\omega \cos(\omega_i t + \varphi_i)$, onde nls é o número de linhas espectrais e φ_i uma fase aleatória para cada frequência.

O campo espectral de histórico do vento pode ser gerado de duas formas, pela representação de ponto único ou pela representação de pontos múltiplos. Representação de ponto único assume um campo completamente homogêneo, ou seja, todos os pontos da estrutura estão submetidos às mesmas flutuações do vento ao mesmo tempo. Isso é válido para estruturas de pequeno porte que possam ser consideradas pontuais. Para grandes estruturas a hipótese de homogeneidade não é realista, sendo necessário relacionar as flutuações de velocidade de um local para outro local através de uma função. Esta representação de campo de vento multiponto pode ser usada para determinar a ação da parcela flutuante do vento em locais diferentes na estrutura. Para Davenport *et al.*, 1961 a correlação espacial de velocidades pode ser descrita em função da distância entre dois pontos d e da frequência da rajada f , como:

$$Coh(d, f) = \exp[-f \sqrt{C_z^2(z_1 - z_2) + C_y^2(y_1 - y_2)} / \bar{U}] \quad (5.2)$$

onde y_1, y_2, z_1 e z_2 são as coordenadas de dois pontos da face da estrutura atingida pelo vento; C_z e C_y são coeficientes de decaimento exponencial determinados experimentalmente. Neste trabalho adota-se os valores dos coeficientes, $C_z = 7$ e $C_y = 10$, estes produzindo distribuições de carregamento a favor da segurança, propostos pelo mesmo autor.

5.3 Gerador eólico

O aerogerador de eixo horizontal tem três pás, de dimensão 30 metros de comprimento. A torre possui uma altura total de 60m e tem formato de tronco de cone vazado, seguindo padrões comuns a indústria e é dividida em 4 segmentos de 15 metros. A divisão em segmentos é comum no mercado e visa facilitar o transporte da torre do local da fabricação até o local da instalação. O diâmetro da torre varia linearmente da base até o topo e cada segmento possui parede com espessuras diferentes, conforme tabela A6. Para a análise estrutural, o aerogerador foi discretizado em 60 elementos de pórtico espacial, sendo 20 elementos para a torre, 10 elementos para a nacele e 10 elementos para cada uma das pás (Figura A1). Essa discretização é suficiente para assegurar a convergência dos resultados por elementos finitos.

A nacele foi simplificada como uma caixa retangular vazada de aço, com dimensões de 1,5x1,5x10 m e espessura de 0,08 m. A massa dos elementos internos da nacele foi considerada de 5 ton, distribuídas ao longo do comprimento da nacele. Não foram considerados na simulação aberturas e elementos internos da torre. A massa e o momento de inércia das pás foram calculados adotando as simplificações propostas por Rodríguez *et al.*, 2007. As propriedades do material utilizadas foram os referentes a um aço comercial, sendo o peso específico do material de 7800 kg/m³, o módulo de elasticidade de 210 GPa. As áreas e inércias das seções são as mesmas indicadas no trabalho de Furlanetto, 2018.

5.4 Cálculo da Ação do vento na estrutura

Para calcular a força de arrasto ao longo da torre, simplificou-se o carregamento distribuído para cargas concentradas, obtendo-se uma força escalonada ao longo da estrutura. Tomando como exemplo um elemento n qualquer, com nó inicial i e nó final j , então a força de arrasto nos nós i e j pode ser calculada como:

$$F_n = A_n C_D(Re) \rho [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]^2 \quad (5.3)$$

onde a área A_n é calculada levando-se em conta as áreas das duas metades adjacentes ao nó k como indicado na Figura 5.2(a). O coeficiente de arrasto $C_D(\alpha)$ é função do ângulo de ataque α e do número de Reynolds para a velocidade média $\bar{U}(z)$ na altura onde se está aplicando a ação do vento. A força da resultante da ação do vento sobre as pás é calculada em termos da força de sustentação e da força de arrasto segundo princípios aerodinâmicos. O procedimento de cálculo foi baseado nos estudos de Jeong *et al.*, 2013. A Figura 5.3 ilustra os ângulos, velocidades e eixos utilizados para o cálculo. No sistema local da pá, identifica-se o ângulo de *pitch* ψ que a corda do aerogerador faz com o eixo local do elemento y_L . Depois identifica-se o ângulo γ que a velocidade relativa do vento V_{rel} faz com este mesmo eixo local y_L .

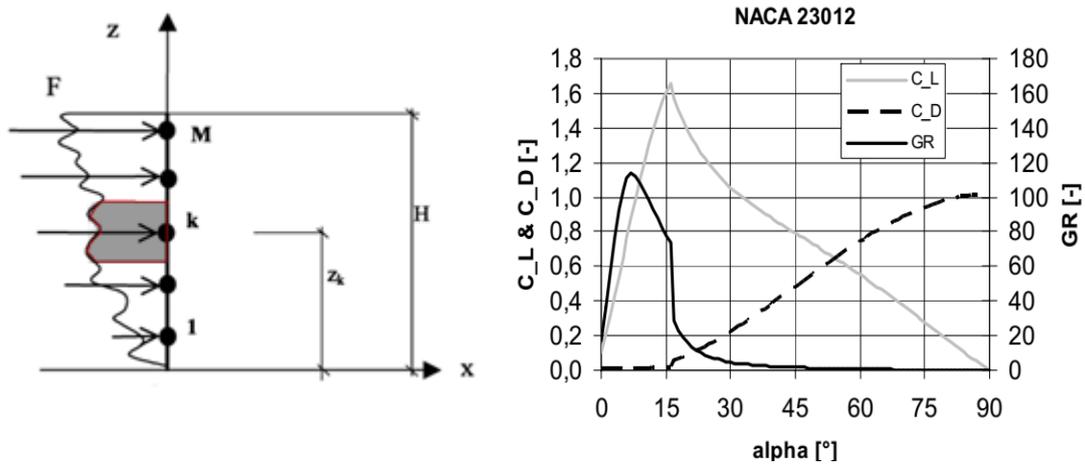


Figura 5.2 – (a) Aplicação de forças do vento. (b) Coef. aerodinâmico x ângulo de ataque. (Gundtoft, 2009)

Neste caso a velocidade relativa V_{rel} é a composição vetorial da velocidade angular da pá (à distância da raiz em que se faz a avaliação), ou seja, $V_{rel} = [(\omega r)^2 + V_0^2]^{1/2}$. O ângulo de ataque de V_{rel} em relação ao perfil da pá é definido como $\alpha = \psi + \gamma$. Para o cálculo da força de arrasto (F_D) e de sustentação (F_L) avalia-se $F_D = A_p C_D(\alpha) \rho [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]$ e $F_L = A_p C_L(\alpha) [\bar{U}(z) + \tilde{u}(y, z, t)]$. Os valores dos coeficientes são obtidos por interpolação de curvas experimentais para o aerofólio NACA23012, Figura 5.2b. Para obter as forças no sistema local do elemento de pá, calculam-se as componentes das forças aerodinâmicas neste sistema de coordenadas, $F_{x_L} = 0$, $F_{y_L} = -F_D \cos(\gamma) + F_L \sin(\gamma)$, $F_{z_L} = F_D \sin(\gamma) + F_L \cos(\gamma)$ as quais sofrem, posteriormente, uma rotação para o sistema global de coordenadas.

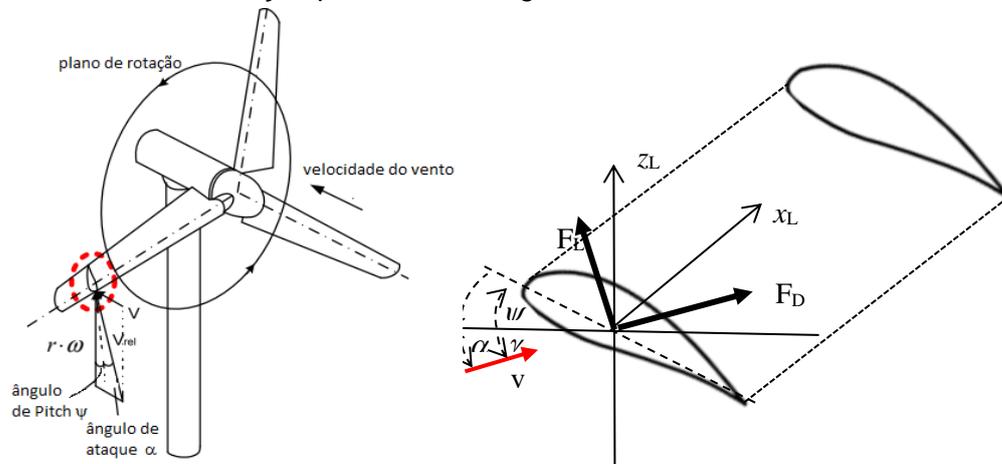


Figura 5.3 – (a) Composição da velocidade relativa na pá do aerogerador. (b) Esforços aerodinâmicos no sistema de local do elemento de pá do aerogerador. (Jeong *et al.*, 2013)

No domínio da frequência, o espectro de velocidade do vento precisa ser transformado em espectro de força e, segundo Simui e Scanlan, 1996, o espectro de força pode ser representado com suficiente precisão a partir da informação das forças e do espectro de velocidades como:

$$S_f(y, z, f) = (\rho C \bar{U}(z) A_n)^2 S_v(y, z, f), \quad (5.4)$$

onde C é o coeficiente resultante de arrasto e/ou sustentação do corpo a ser calculado.

Desta forma, tem-se todos os componentes necessários à análise dinâmica de torres de geradores eólicos, a sistematização de um algoritmo de cálculo é apresentada na figura A6.

6. RESULTADOS

A partir do método descrito, foi possível a implementação de uma rotina de cálculo na linguagem de programação numérica MATLAB de forma a permitir cálculos rápidos e precisos. O método foi aplicado ao gerador eólico descrita anteriormente, com duas series de dados de vento para comparação. Os parâmetros de entrada estão descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Parâmetros de entrada para a simulação.

Parâmetro	Condição A	Condição B
Vel. média do vento (m/s)	25,0	25,0
Altura de ref. (m)	10,0	10,0
Expoente da camada limite α (-)	0,130	0,160
Comp. De turbulência (m)	170(x) 100(y) 35(z)	130(x) 40(y) 10(z)
Desv. padrão de turb. (m/s)	2.60(x) 2.20(y) 1.56(z)	3.6(x) 2.70(y) 2.1(z)
Tempo de simulação T (s)	50,0	50,0
Intervalo de Tempo Δt (s)	0,005	0,005
Número de linhas espectrais (s)	5000	5000

As propriedades do escoamento estão disponíveis para a grande maioria das paisagens em atlas eólicos, ou podem ser estimados através de medições meteorológicas. Os valores adotados neste trabalho não representam nenhuma localização específica, no entanto, são típicos de instalações eólicas de grande porte brasileiras e pretendem fornecer uma base para avaliação e comparação dos resultados, como pode ser percebido tem a mesma velocidade média porem parâmetros de turbulência distintos.

Amortecimento estrutural é notoriamente difícil de ser avaliado ou medido com precisão. Ele é dado como porcentagem do amortecimento crítico. Dos dados disponíveis em Burtun *et al.*, 2001, para torres de aço de seções cônicas parafusadas, tem-se os valores na Tabela A5 para os 4 primeiros modos. Para os demais é assumido amortecimento crítico. Resultados e dados avaliados são apresentados e discutidos na sequência.

6.1 Velocidade do Vento

A série de dados do campo de velocidade do vento ao longo de tempo é gerada conforme o procedimento descrito em 5.1. As flutuações equivalentes a parte turbulenta do campo de velocidade são correlacionadas pela função de coerência (equação 5.2) e os valores esperados e calculados são comparados na Figura A2. Pode ser percebida uma boa concordância dos dados da coerência obtida com o sinal gerado no tempo da velocidade do vento (pontos vermelhos) com aquele prescrito (linha preta) de von Kármán, para diversas distâncias (8,4, 21, 38 e 59 m) o que nos dá confiança de que os dados gerados aderem à função proposta.

O histórico de flutuações aplicado aos nós da estrutura pode ser observado na Figura 6.1. Qualitativamente pode-se perceber a influência da função de correlação entre os gráficos de cada nó, isto é, o campo é aleatório, mas as flutuações são próximas para pontos próximos, o que traz significantes melhorias ao campo de velocidade do vento, aproximando-o da realidade. Como forma de avaliar a amplitude das velocidades atuantes, as Figuras 6.1(a) e (b) trazem os perfis de velocidade média e as flutuações turbulentas para as direções x e y, respectivamente, em função da altura para ambos as condições de vento.

Importante notar nas Figura 6.1 (a1) e (b1) a amplitude das rajadas do vento em relação à velocidade média. No primeiro caso possuem maiores variações, e no segundo caso são mais próximas à média. Nota-se também na direção y, Figura 6.1 (a2) e (b2), que mesmo possuindo média zero e considerando apenas as flutuações turbulentas, já apresentam valores de rajada expressivos.

Estes efeitos são de interesse no cálculo estrutural pois podem ocasionar falhas mesmo em uma condição considerada normal, ressaltando a importância deste tipo de análise, pois

efeitos como este não seriam adequadamente percebidos com a metodologia proposta pela norma brasileira (NBR 6123), por exemplo, para ventos estáticos equivalentes e coeficientes de majoração.

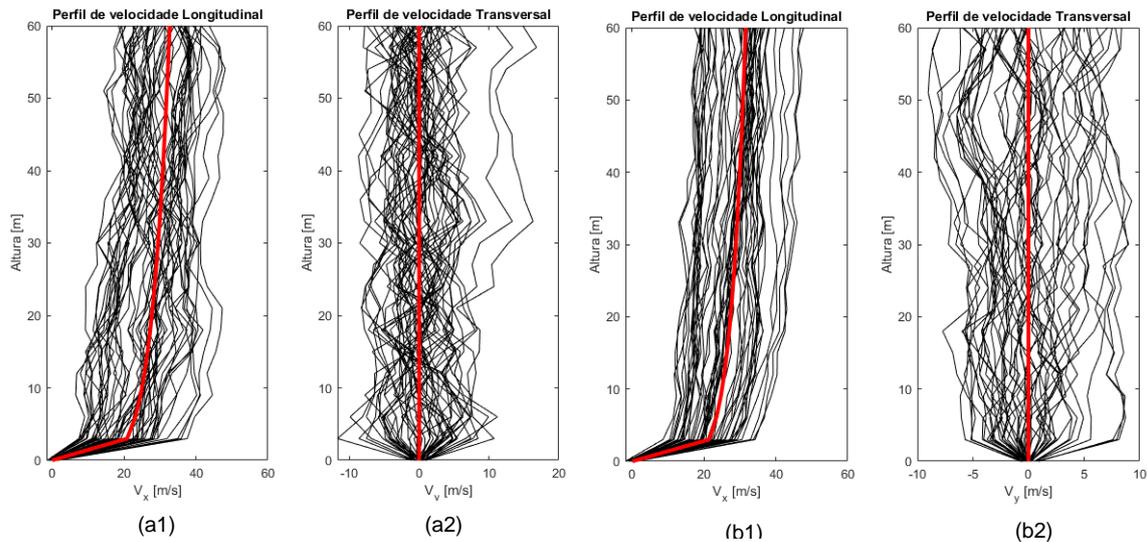


Figura 6.1 – Perfil de velocidade média do vento (vermelho) e perfis de velocidade turbulenta (preto) em alguns instantes de tempo, para vento longitudinal e transversal.

6.2 Frequências naturais e modos de vibração

Como é característico de estrutura esbeltas, os valores para frequências naturais são baixos, a Figura 6.2 são apresentadas as primeiras 6 frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. As duas primeiras, por exemplo, estão relacionadas ao primeiro modo de flexão lateral e longitudinal da torre do aerogerador como um todo.

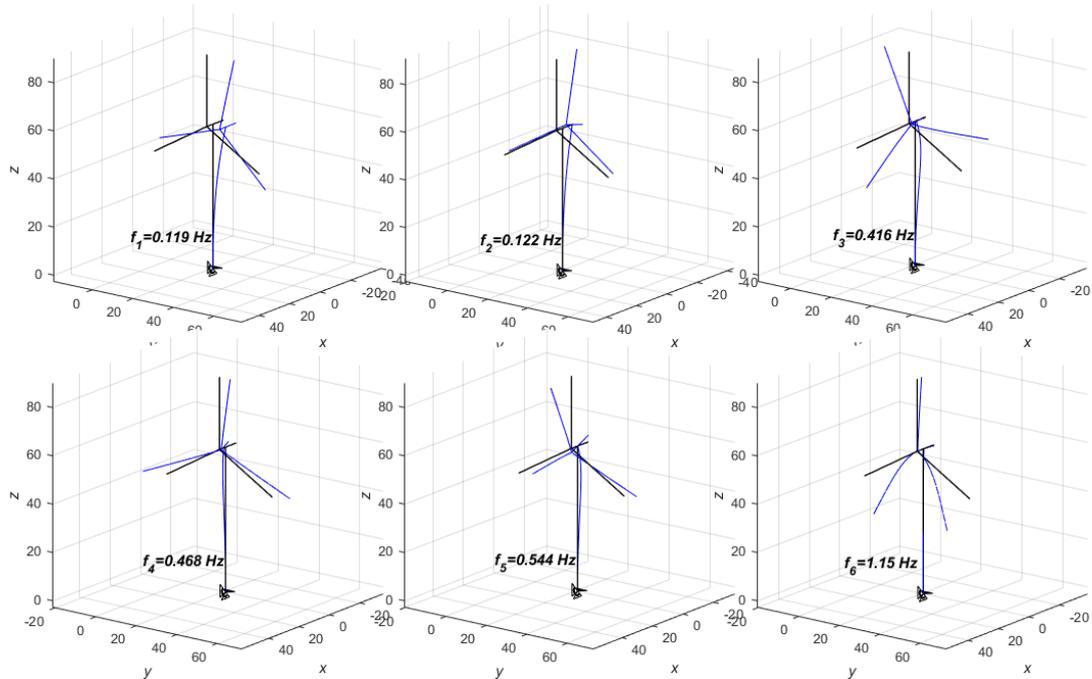


Figura 6.2 – Seis primeiras frequências naturais e modos de vibração da estrutura.

O fato das frequências naturais terem valor baixo neste tipo de estrutura é de interesse uma vez que as frequências de rajada da parte turbulenta do vento apresenta frequências similares, ficando entre 0,0055 - 0,2Hz (ver figura 5.1 (a)), e os efeitos de forças de excitação na

mesma faixa das frequências naturais da estrutura são notórios, sendo inclusive destacado pela norma brasileira NBR6123 a necessidade de uma análise dinâmica nestes casos.

A densidade espectral do deslocamento (G_x) é apresentada em função da frequência na Figura 6.3, note que os picos na densidade espectral da estrutura são precisamente os mesmos das frequências naturais, ou seja, a estrutura reage mais intensamente nas suas frequências naturais, de acordo com o esperado mostrando a coerência do modelo. As demais frequências naturais não aparecem, pois devido à falta de informação relevante e confiável, foi considerado amortecimento crítico para modos acima do quarto, conforme descrito anteriormente.

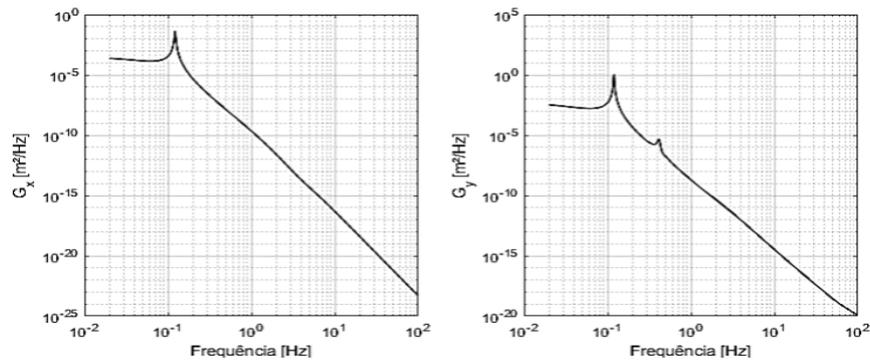


Figura 6.3 – Densidade Espectral de Potência do deslocamento no topo da torre (nó 2): (a) direção longitudinal e (b) direção lateral, para a condição de vento A.

As frequências naturais simuladas estão de acordo com a faixa descrita pela literatura como Burtun *et al.*, 2001, e com ensaios em estruturas reais realizado por Osgood *et al.*, 2010 com o uso de acelerômetros e Zendeabad, 2017, por instrumentos ópticos. No entanto, este tipo de trabalho inclui significativas fontes de erro e tratam de modelos de turbina ligeiramente diferentes do apreciado neste trabalho. Além disso, informações precisas sobre a estrutura dos geradores eólicos comerciais são escassas, de forma que uma comparação direta entre o modelo e a medição se torna inviável, com os dados disponíveis até então.

6.3 Comparativo da Resposta dinâmica

As análises em ambos os domínios, tempo e frequência, fornecem dados de deslocamento velocidade e aceleração. A fim de comparar os resultados de ambas as metodologias implementadas a Tabela 6.2 apresenta valores em alguns pontos críticos.

Tabela 6.2 – Valores de força e momento sobre as estruturas

	Dom. do Tempo		Dom da Freq.	
	x	y	x	y
Desloc. no topo rms (m)	0,73205	0,21167	0,72189	0,22351
Aceleração rms (m/s²)	0,03933	0,03362	0,03431	0,04223
Momento na base (kNm)	110,56	756,41	146,08	738,48
Tempo computacional (s)	888,99		858,35	

Pode-se perceber claramente a conformidade dos valores encontrados através dos dois métodos evidenciando a coerência na implementação do algoritmo.

Na tabela 6.2 são comparados também os tempos computacionais para cada uma das análises. A literatura que trata de análises dinâmicas de estruturas dá grande destaque à análise no domínio da frequência por sua formulação matemática, supostamente, ser muito mais eficiente para a implementação computacional. No entanto, como pode ser percebido não foi observado grande diferença nos tempos de processamento neste caso específico. Avaliando as linhas de código que mais gastaram tempo na análise, percebe-se ser a geração do campo de

velocidades do vento correlacionado assim como a geração das densidades espectrais de potência dos graus de liberdade da estrutura.

A geração de uma série temporal completa de esforços e deslocamentos permite ainda avaliar outros efeitos como o da fadiga. Na figura 6.4 encontram-se os valores de deslocamento nas direções x e y para as alturas de 12, 33 e 60m da torre.

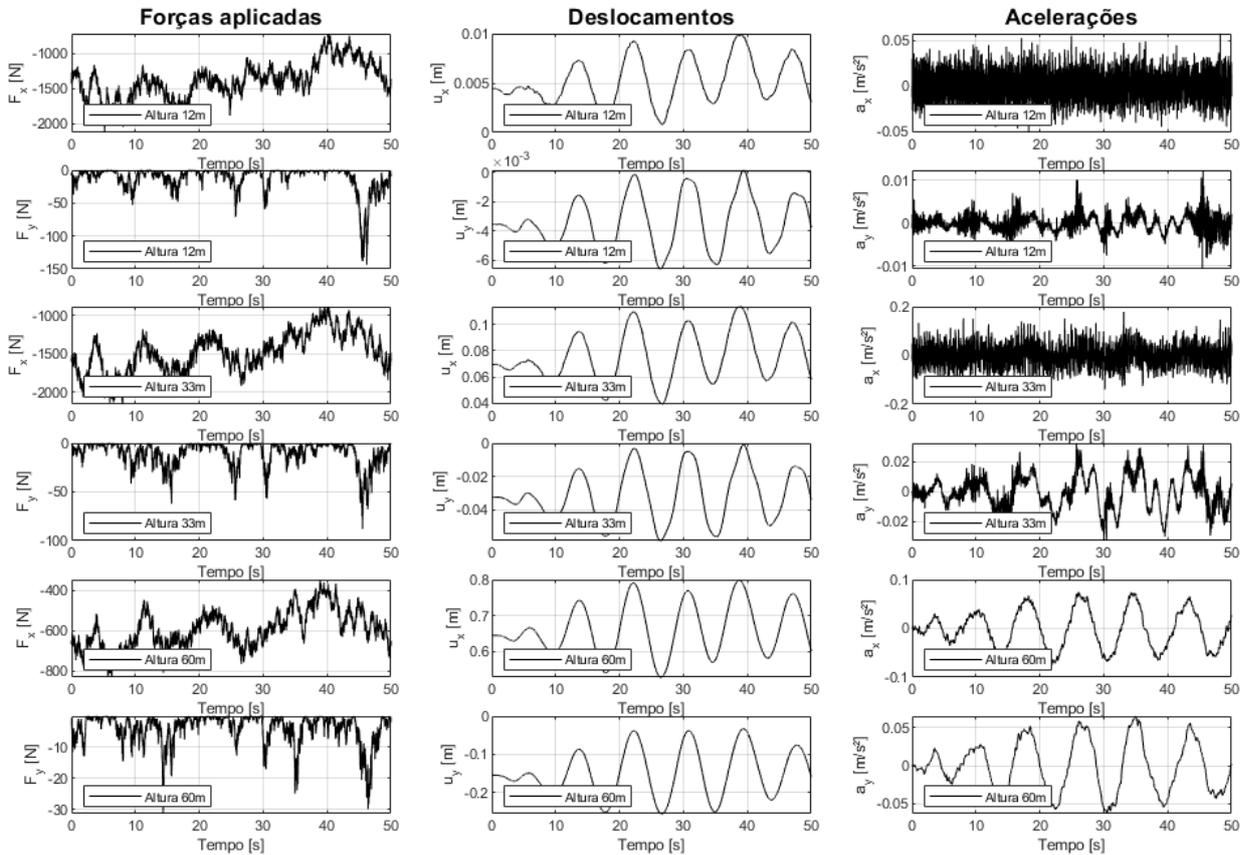


Figura 6.4 – Força do vento atuante sobre a estrutura e deslocamento causado para o topo da torre nas direções x e y.

Pode-se perceber o caráter recorrente e cíclico dos deslocamentos gerados sobre a torre, este tipo de esforço é de interesse uma vez que podem ocasionar falha por fadiga, tendo em vista que este tipo de estrutura tem uma vida útil esperada de 20 a 25 anos com manutenção regular.

Um efeito pertinente que pode ser observado é o deslocamento na direção transversal (y) ao escoamento, que apresenta a mesma forma e período do deslocamento na direção longitudinal, apenas com amplitude reduzida, isto é, na situação avaliada de parada de operação, com as pás embandeiradas e freios aplicados, existe deslocamento e conseqüentemente esforço na direção perpendicular ao do vento. Dada a amplitude desprezível do carregamento do vento nesta direção, é possível concluir que a causa deste deslocamento deve ser outra. Analisando as possíveis causas deste efeito conclui-se que a origem mais provável seja a força de sustentação gerada pelo perfil da pá, tangencialmente ao sentido de giro do rotor.

Da figura 6.4 também pode ser observado como a aceleração tende a ter frequência mais alta nos elementos mais baixos da torre, e sua frequência e amplitude e período tende a se ajustar àquele da força e deslocamento, conforme a rigidez estrutural diminui com a altura.

6.3.1 Resposta no tempo com carregamentos distintos

Com a finalidade de avaliar a relevância dos efeitos turbulentos serão comparados os esforços causados pelas duas condições de vento apresentado na seção 6.1, haja vista que elas

possuem mesma velocidade média, mas parâmetros de turbulência e rugosidades do terreno distintas. Na figura 6.5 são apresentadas as forças resultantes para cada condição e os deslocamentos gerados pela parcela turbulenta do vento no topo da torre.

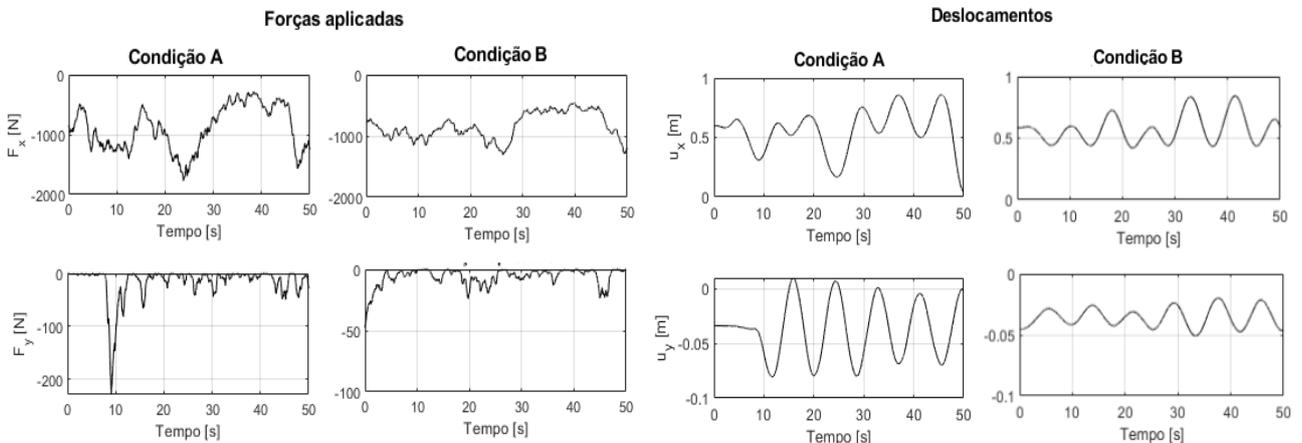


Figura 6.5 – Forças aplicadas pelo carregamento e deslocamentos causados no topo da torre para ambas as condições de vento.

Nota-se claramente uma redução da amplitude do carregamento e do deslocamento para a condição B de carregamento, o que se confirma ao analisarmos os valores RMS para cada caso (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Valores RMS das solicitações turbulentas para alguns pontos.

Solicitação	Condição A	Condição B	Var. (%)
Força no topo F_x (kN)	969,1669	866,4258	12%
Força no topo F_y (kN)	34,8700	9,5526	265%
Deslocamento no topo U_x (m)	0,5859	0,5847	0%
Deslocamento no topo U_y(m)	0,0452	0,0364	24%
Momento na base M_x (kNm)	110564,1307	68356,8688	62%
Momento na base M_y (kNm)	1838,1000	835,8400	120%
Esf. na primeira barra F_x (kN)	1002,1037	987,6801	1%
Esf. na primeira barra F_y (kN)	39,6910	24,9531	59%

Os efeitos são ainda mais dramáticos quando se trata dos momentos das reações na base. Pode ser observado na figura 6.6 que a diferença chega a ser superior a uma ordem de grandeza, e o mesmo se repete para os esforços cortantes no primeiro componente da estrutura.

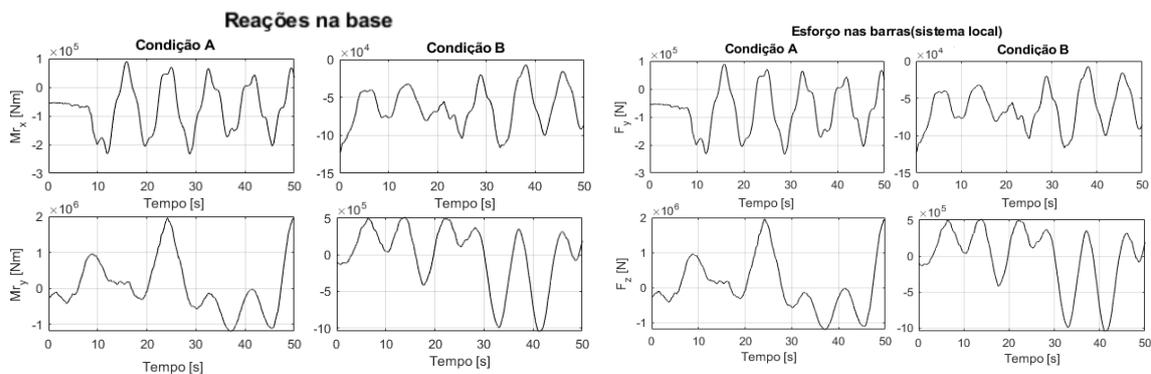


Figura 6.6 – Reações e esforços em algumas barras em função do tempo.

Estes resultados ressaltam a significância da parcela aleatória e da rugosidade do terreno no carregamento sobre as estruturas e evoca possíveis discrepância com métodos que utilizam a velocidade média como único parâmetro de cálculo.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho desenvolveu um algoritmo para a análise estrutural dinâmica de uma torre de gerador eólico. Desenvolvida na plataforma de programação MATLAB a rotina teve como função avaliar os deslocamentos, velocidades, acelerações, forças e momentos que agem na estrutura, bem como as frequências naturais e modos de vibração da torre. Para tal aplicou-se dois métodos de solução dinâmica a estrutura, método por integração no domínio do tempo e a solução no domínio da frequência

A torre e demais elementos do aerogerador foram modelados de forma simplificada ignorando as aberturas e elementos internos da torre. Os esforços considerados na estrutura são aqueles decorrentes do peso próprio da torre, dos elementos superiores (nacele e pás), e principalmente do vento. O vento teve seus efeitos avaliados através da geração de um campo correlacionado multiponto, composto da parcela média dependente de parâmetros do terreno e crescendo exponencialmente com a altura e de uma parcela aleatória, simulada a partir de espectros de potência conhecido e do método de Monte Carlo. Valores obtido para frequência natural e deslocamentos se mostraram, de modo geral, coerentes com os apresentados pela literatura.

Foram comparadas duas condições de vento que diferem unicamente nos parâmetros da parte aleatória do vento. Identificou-se variação nas forças e momentos gerados, com picos que ultrapassam uma ordem de grandeza. Para o caso estudado não foi possível concluir que o algoritmo implementado no domínio da frequência tem grande vantagem computacional sobre o método mais tradicional de integração direta. No entanto, os algoritmos propostos mostraram-se adequados e robustos em vista da concordância e coerência dos resultados.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise de um gerador eólico mais realista, levando em conta aberturas e elementos internos da torre, bem como os efeitos dinâmicos da rotação das pás. A implementação de algoritmos de otimização também se torna atrativo uma vez que esta análise incorpora os efeitos aleatório do carregamento. Recomenda-se fortemente, também um estudo sobre fadiga, que dado a natureza cíclica do carregamento e a vida útil prolongada deste tipo de equipamento tende a representar uma restrição importante no projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123. "**Forças devidas ao vento em edificações**". 2013.

Ambrosini, R.D., Riera, J.D., Danesi, R.F. "**Analysis of structures subjected to random wind loading by simulation in frequency domain**". Prob. Engrg Mechanics. V.17, pp.233-239, 2002.

Ashuri, T., Zaaijer, M., Bussei, G., van Kulk, G. "**An Analytical Model to Extract Wind Turbine Blade Structural Properties for Optimization and Up-scaling Studies**", 3rd EWEA Conf. The Science of Making Torque from Wind, Heraklion, Crete, Greece, 1-7, 2010.

Blevins, R.D. "**Flow-induced Vibrations**". Van Nostrand Reinhold Company, 363p. 1977.

xBurton, T., Sharpe, D., Jenkins, D., Bossanyi, D. "**Wind Energy Handbook**," John Wiley and sons, 2001.

Clough, R. W., Penzien, J. "**Dynamics of Structures**", Publisher: McGraw-Hill College; 2nd. Ed., 768p. 1993.

Davenport, A. G., **“The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”**. Q.J.R. Meteorol. Soc., 87: 194–211, 2018

Furlanetto, A. **Otimização do projeto estrutural de torres de aço para aerogeradores**. 2018. 15p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica)- Depto. de Eng Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2018.

Gundtoft, S. **“Wind Turbines”**. 2nd. Edition, University College of Aarhus, June 2009.

Halfpenny, A. **“Dynamic analysis of both on and offshore wind turbines in the frequency domain”**. Doctoral thesis, University of London, 1998.

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”**, MDPI, Basel, Suíça, 2013.

Lazanha, E.C., **“Análise dinâmica elasto-plástica de estruturas metálicas sob excitação aleatória de vento”**. Dis. Mestrado. USP, Dep. Estruturas e Fundações. SP, 2003.

Ma, Y., Martinez-Vazquez, P., Baniotopoulos, C. **“Wind turbine tower collapse cases: a historical overview”**. Proc. of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings. 2018.

Malcolm, D.J., Laird, D.L. **“Extraction of Equivalent Beam Properties from Blade Models”**. Wind Energ., V.10, pp.135-157, 2007.

Mofiadakis, E.E., Glinou, G.L., Koulouvari, M.J. **“The suitability of the von Karman spectrum for the structure of turbulence in a complex terrain wind farm”**. J. of Wind Engrg. and Ind. Aerod. V. 62, pp.237-257, 1996.

Newland, D.E. **“An introduction to random vibration and spectral analysis”**, 2nd.Ed. Longman, 1984.

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, Volume 1 pp 113-124. 2011.

Pagnini, L.C., Solari, G. **“Gust buffeting and turbulence uncertainties”**. J. of Wind Engrg. and Ind. Aerod., v.90, pp.441-459. 2002.

Rodríguez, A.G.G., Rodríguez, A.G., Payán, M.B. **“Estimating Wind Turbines Mechanical Constants”**, RE&PQJ, Vol. 1, No.5, 2007.

Shinozuka, M. **“Monte Carlo solution of structural dynamics”**. Comp. & Struc., Vol.2, pp.855-874, 1972.

Simiu, E., Scanlan, R.H. **“Wind effects on structures: fundamentals and applications to design”**, John Wiley and Sons, Inc. New York, 3rd. Ed., 1996.

Wang, J., Cheynet, E., Snæbjörnsson, J. P., Jakobsen, J. B. **“Coupled aerodynamic and hydrodynamic response of a long span bridge suspended from floating towers”**. J. of Wind Engrg. and Ind. Aerod., v.177, pp.19-31, 2018.

Yasui, H., Marukawa, H., Momomura, Y., Ohkuma, T. **“Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers”**. J. of Wind Engrg. and Ind. Aerod. V.83, pp.431-441. 1999.

Zendehbad, M., Chokani, N., Abhari R.S. **“Measurements of tower deflections on full-scale wind turbines using an opto-mechanical platform”**. J. of Wind Engrg. and Ind. Aerod. V.168, pp.72–8. 2017.

APÊNDICES

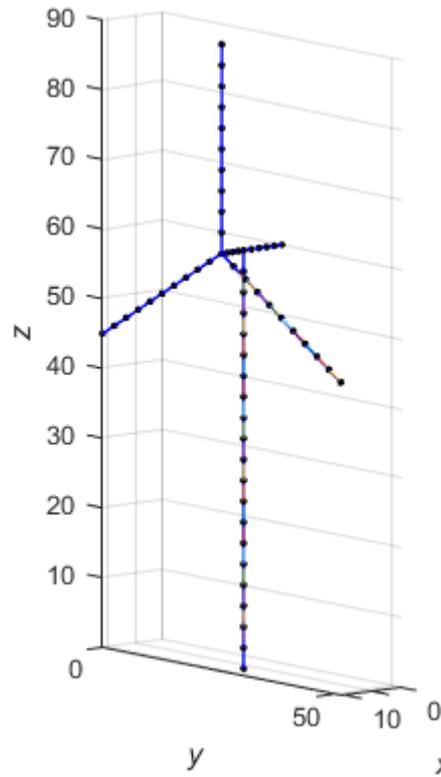


Figura A1 – Modelo discretizado do Aerogerador.

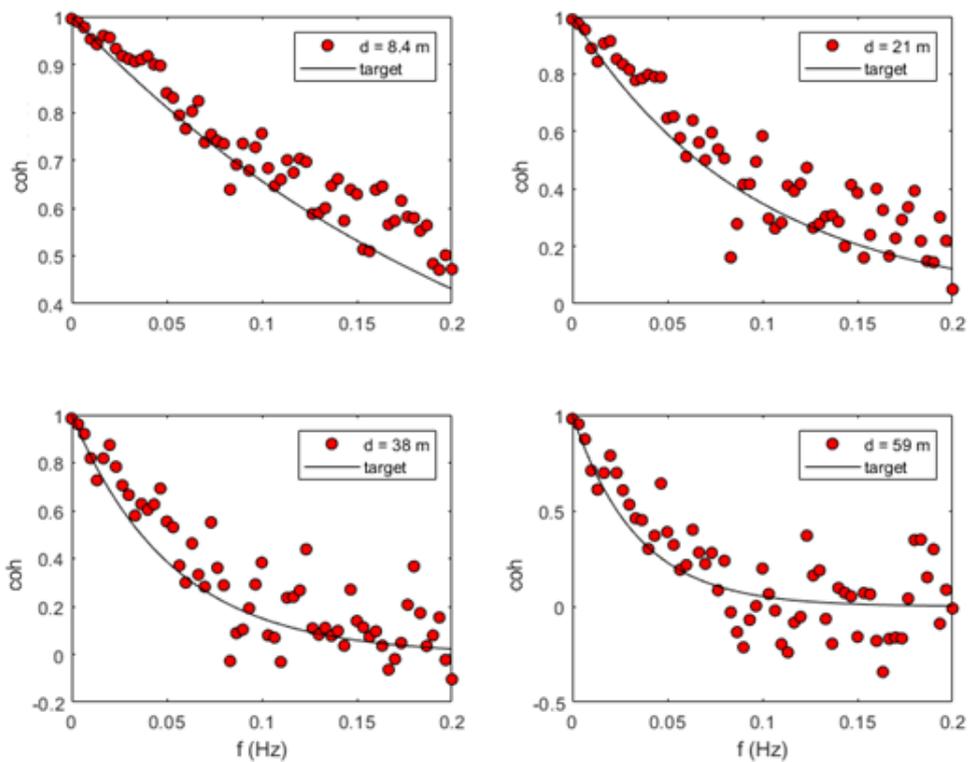


Figura A2 – Comparação da correlação da velocidade do vento avaliada pelo sinal do tempo gerado x frequência, para diversas distâncias entre pontos (modelo de von Kármán).

Tabela A6 – Dimensões da torre.(Furlanetto, 2018)

Dimensão	Espessura (m)
Diâmetro da base	3,84
Diâmetro do topo	2,07
Espessura segmento 1	0,0160
Espessura segmento 2	0,0125
Espessura segmento 3	0,0125
Espessura segmento 4	0,0095

Tabela A4 – Valores do 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

Tabela A5 – Taxa de amortecimento estrutural. (Burtun, 2001)

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

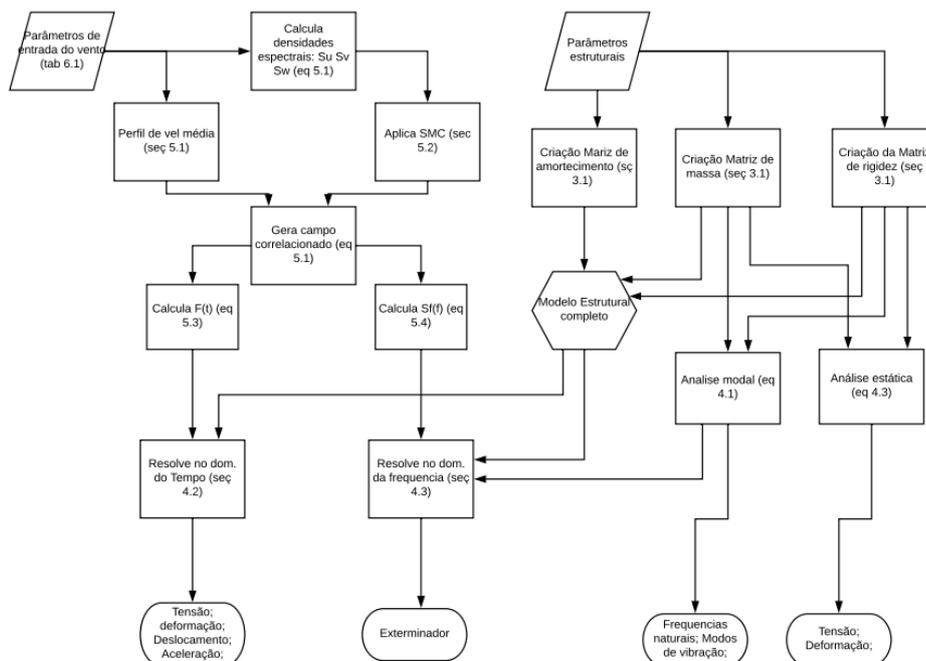


Figura A6 – Algoritmo de análise estrutural desenvolvido.