



MODELO ACOPLADO TORRE-AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Rodolfo de Lima Paula

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Michèle Schubert Pfeil

Eliane Maria Lopes Carvalho

Rio de Janeiro

Março de 2012

MODELO ACOPLADO TORRE-AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Rodolfo de Lima Paula

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof^a. Michèle Schubert Pfeil, D. Sc.

Prof^a. Eliane Maria Lopes Carvalho, D. Sc.

Prof. Ronaldo Carvalho Battista, Ph. D.

Prof. Paulo Batista Gonçalves, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2012

Paula, Rodolfo de Lima

Modelo acoplado torre-aerogerador de eixo horizontal / Rodolfo de Lima Paula. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XIII, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Eliane Maria Lopes Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 84-86.

1. Turbina eólica 2. Dinâmica estrutural 3. Análise experimental I. Pfeil, Michèle Schubert “*et al*” . II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico esse trabalho aos meus pais, Ruy e Fátima,
pelo amor, dedicação e esforço dispensados
na criação e educação dos seus filhos.

Agradecimentos

À Deus, pela saúde, força e oportunidades.

Aos meus pais: Ruy, grande incentivador e um exemplo profissional. Fátima, conselheira e um exemplo de mulher; Pelo carinho, educação e amor dispensados por eles.

Aos meus irmãos Rafael e Fernanda, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram.

A toda minha família, em especial a minha avó Alda, que sofreu junto nas dificuldades.

À Luciana pelo apoio e paciência nos momentos mais difíceis e por compartilhar os momentos de alegria e carinho fundamentais para completar esse trabalho;

Ao Wilson, um novo irmão, que colaborou muito nessa jornada, com apoio técnico ou motivacional além de compartilhar muitas risadas nos momentos de descontração;

À minhas professoras orientadoras, Michèle Pfeil, por ser uma constante fonte de conhecimento e inspiração; e Eliane Carvalho, que me acompanha desde a graduação, por toda sua dedicação, paciência, conhecimento, apoio, motivação e inspiração.

Ao professor Ronaldo Battista, pelas valiosas sugestões que colaboraram no desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus amigos, pela compreensão nos momentos em que estive ausente ao longo desses anos, em especial Renato e Pedro, grandes amigos desde a infância.

À Monique, pela força, apoio e companhia sempre agradável na faculdade;

Aos colegas Carlos Rossigali, Eduardo Peldoza, Juarez Franco, Thiago Grabois e todos os outros colegas do LabEst que de alguma forma colaboraram com esse trabalho;

Ao Maurício Santos, Marcela Lopes e Rafael Berbert que mesmo nas dificuldades, me incentivaram e apoiaram à dedicação ao mestrado.

A todos os professores, profissionais fundamentais, que fizeram parte da minha educação, desde a alfabetização;

A CAPES pelo apoio financeiro;

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELO ACOPLADO TORRE-AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL

Rodolfo de Lima Paula

Março/2012

Orientadores: Michèle Schubert Pfeil

Eliane Maria Lopes Carvalho

Programa: Engenharia Civil

O território brasileiro dispõe de um significativo potencial eólico e a participação da energia eólica na geração de energia elétrica, embora seja ainda pequena, vem crescendo de forma promissora. Um dos problemas a serem enfrentados no projeto de aerogeradores é o da vibração excessiva das pás e da torre podendo levar à fadiga precoce dos materiais. Para abordar este tema apresenta-se neste trabalho um modelo analítico do comportamento dinâmico do sistema acoplado torre-aerogerador de eixo horizontal cujos resultados são comparados a medições experimentais efetuadas em um aerogerador de pequeno porte. O modelo considera dois graus de liberdade de cada pá e um modo de vibração de flexão da torre. As equações de movimento foram desenvolvidas a partir do Princípio de Hamilton e a sua integração no domínio do tempo foi efetuada numericamente. Para a faixa de frequência em que foi identificada proximidade entre frequências naturais da torre e das pás, os resultados teóricos apresentaram boa correlação com os resultados experimentais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TOWER-TURBINE OF HORIZONTAL AXIS COUPLED MODEL

Rodolfo de Lima Paula

March/2012

Advisors: Michèle Schubert Pfeil

Eliane Maria Lopes Carvalho

Department: Civil Engineering

Brazil's territory displays a significant potential wind turbine power and the contribution of wind energy to power generation, although small, is growing fast. One of the problems to be faced in a wind turbine design is the blades and tower large amplitude vibration which may lead to early fatigue. To deal with this issue this paper presents an analytical discrete model of the dynamic behavior of the coupled system tower-horizontal axis wind turbine whose results are compared to experimental measurements performed to a small wind turbine. The coupled model considers two degree of freedom for each blade and a tower bending vibration mode. The equations of motion were developed from Hamilton's Principle and its integration in the time domain was performed numerically. Within the frequency range in which close natural frequencies of the blade and the tower were indentified near resonant theoretical results showed good correlation with experimental measurements.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.1.1	<i>A energia eólica no Brasil</i>	<i>2</i>
1.1.2	<i>Sistema torre-aerogerador</i>	<i>4</i>
1.2	OBJETIVOS.....	5
1.3	ESCOPO DO TRABALHO.....	6
2	CONCEITOS GERAIS.....	7
2.1	AEROGERADOR.....	7
2.1.1	<i>Torre</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Nacele</i>	<i>8</i>
2.1.3	<i>Pás.....</i>	<i>10</i>
2.2	RELAÇÃO DE VELOCIDADE DE PONTA	12
2.3	SISTEMA DE COORDENADAS	13
2.4	POTÊNCIA DO AEROGERADOR	14
2.5	CONTROLE DE PASSO.....	15
3	MODELO MATEMÁTICO	16
3.1	GRAUS DE LIBERDADE DO SISTEMA.....	16
3.2	VETOR POSIÇÃO DE UM PONTO DA PÁ.....	18
3.3	ENERGIA CINÉTICA.....	23
3.4	ENERGIA POTENCIAL.....	24
3.5	FORÇAS NÃO CONSERVATIVAS.....	25
3.6	EQUAÇÃO DE LAGRANGE.....	25
3.6.1	<i>Grau de Liberdade de rotação da pá (beta).....</i>	<i>25</i>
3.6.2	<i>Grau de Liberdade de rotação da pá (zeta).....</i>	<i>26</i>
3.6.3	<i>Grau de Liberdade de translação da torre (v).....</i>	<i>27</i>
4	FORÇAS ATUANTES NAS TURBINAS.....	29
4.1	FORÇAS AERODINÂMICAS NAS PÁS.....	29
4.1.1	<i>Velocidade Relativa.....</i>	<i>30</i>
4.1.2	<i>Ângulo de ataque.....</i>	<i>33</i>
4.1.3	<i>Coeficiente de Arrasto e Sustentação (C_D e C_L).....</i>	<i>34</i>
4.1.4	<i>Componentes das Forças.....</i>	<i>35</i>
4.2	FORÇAS GENERALIZADAS.....	36
4.2.1	<i>Força Generalizada em Beta.....</i>	<i>40</i>
4.2.2	<i>Força Generalizada em Zeta.....</i>	<i>41</i>
4.2.3	<i>Força Generalizada em v.....</i>	<i>42</i>
5	ANÁLISE DINÂMICA DE AEROGERADOR.....	45

5.1	ESTRUTURA	46
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	48
5.2.1	<i>Vibrações Livres das Pás</i>	48
5.2.2	<i>Ensaio de Vibração Livre da Torre</i>	51
5.2.3	<i>Estrutura sob ação do vento</i>	52
5.3	MODELO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DA ESTRUTURA.....	54
5.3.1	<i>Modelo da estrutura</i>	54
5.3.2	<i>Resultados de Vibrações Livres</i>	55
5.3.3	<i>Comparação Teórico-Experimental</i>	57
5.4	MODELO ANALÍTICO DO SISTEMA TORRE-AEROGERADOR SOB AÇÃO DO VENTO	57
5.4.1	<i>Dados do Modelo</i>	57
5.4.2	<i>Resultado para velocidade de vento variável no tempo</i>	60
5.4.3	<i>Resultados para velocidade de vento constante</i>	74
6	CONCLUSÃO E CONTINUIDADE DO TRABALHO	82
6.1	CONCLUSÃO	82
6.2	CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	83
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Componentes de uma Turbina Eólica	1
Figura 1.2 – Crescimento da Produção de Energia no Brasil.....	3
Figura 1.3 – Localização dos parques eólicos no país.....	3
Figura 1.4 - Torre (a) estaiada e autoportante (b) treliçada ou (c) tubular	4
Figura 2.1 - Componentes da Turbina	7
Figura 2.2 - Nacele	8
Figura 2.3 - Ângulo de inclinação do eixo do rotor	9
Figura 2.4 – Seção Transversal da pá.....	11
Figura 2.5 - Ângulo de azimute	11
Figura 2.6 – Ângulo de torção da pá	12
Figura 2.7 - Sistema Global de Coordenadas	13
Figura 2.8 - Sistema de Coordenadas Girantes.....	13
Figura 2.9- Potência Nominal x Velocidade do Vento.....	15
Figura 3.1 - Graus de Liberdade do modelo.....	17
Figura 3.2 – Graus de liberdade das pás.....	17
Figura 3.3 – Sistema de Eixos 1 e 2	18
Figura 3.4 - Sistema de eixos 3	19
Figura 3.5 - Sistema de eixos 4	20
Figura 3.6 - Sistema de eixos 5	21
Figura 3.7 - Sistema de eixos 7	22
Figura 4.1 - Discretização dos elementos da pá	29
Figura 4.2 - Perfil vertical da velocidade do vento incidente.....	32
Figura 4.3 - Ângulo de ataque	34
Figura 4.4 – Coeficientes do perfil modelo NACA 4415.....	35
Figura 4.5 - Forças atuantes nas pás	36
Figura 4.6 - Elemento da pá.....	38
Figura 4.7 - Representação da forma modal	44
Figura 5.1 - Torre no Paraná [BATTISTA, 2009].....	45
Figura 5.2 - Ilustração da Torre	46
Figura 5.3 – Turbina [ENERSUD, 2012]	47
Figura 5.4 - Ensaio no Laboratório [BATTISTA, 2009].....	49
Figura 5.5 - Acelerômetros na pá [BATTISTA, 2009]	49

Figura 5.6 - Auto-espectros da aceleração [BATTISTA, 2009].....	50
Figura 5.7 - Aceleração x Tempo - Vibrações Livres da Torre [BATTISTA, 2009].....	51
Figura 5.8 - Autoespectro da aceleração [BATTISTA, 2009]	52
Figura 5.9 - Resposta da torre no tempo sob ação do vento [BATTISTA, 2009].....	53
Figura 5.10 - Autoespectro da aceleração no topo da torre [BATTISTA, 2009]	54
Figura 5.11 – Modelo Numérico da Estrutura.....	55
Figura 5.12 – Quatro primeiros modos de vibrar da estrutura.....	56
Figura 5.13 - Aerofólio MH 102 - C_L [HEPPERLE, 2008]	58
Figura 5.14 – Aerofólio MH 102 - C_D [HEPPERLE, 2008].....	59
Figura 5.15 - Ângulo e direção do Vento	62
Figura 5.16 - Diagrama de Campbell da turbina analisada	64
Figura 5.17 - Aceleração no topo da torre – Filtro passa faixa 15-20Hz - Acelerômetro L-O	65
Figura 5.18 - Aceleração no topo da torre - Passa Faixa 15-20Hz - Acelerômetro N-S	65
Figura 5.19 - Aceleração no topo da torre - Modelo analítico	66
Figura 5.20 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – L-O – Passa Faixa	66
Figura 5.21 - Autoespectro da aceleração no topo da torre - N-S - Passa Faixa.....	67
Figura 5.22 - Autoespectro da aceleração no topo da torre - Teórico - Altas frequências	67
Figura 5.23 - Comparação entre resultados com termos lineares e não-lineares	69
Figura 5.24 - Aceleração experimental no topo da torre - Filtro Passa Baixa (6 Hz) – N-S.....	70
Figura 5.25 – Aceleração teórica no topo da estrutura – Baixas Frequências (1,74 Hz)	71
Figura 5.26 - Comparação Teórico-Experimental da aceleração no topo da torre para baixas frequências.....	72
Figura 5.27 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – N-S – Filtro Passa Baixa (6Hz).....	72
Figura 5.28 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – L-O – Filtro Passa Baixa (6Hz).....	73
Figura 5.29 - Autoespectro da aceleração teórica no topo da estrutura – Baixa Frequência (1,74 Hz)	73
Figura 5.30 - Componentes do Torque da pá	75
Figura 5.31 - Torque da pá ao longo do tempo	75
Figura 5.32 - Curva de potência obtida no modelo teórico	77

Figura 5.33 - Curva de potência fornecida pelo fabricante [ENERSUD,2012]	77
Figura 5.34 - Ângulo de fluxo ao longo do tempo	78
Figura 5.35 - Aceleração Beta - Vento Constante 12m/s	79
Figura 5.36 - Aceleração Zeta - Vento Constante - 12 m/s	79
Figura 5.37 - Autoespectro da aceleração Beta	80
Figura 5.38 - Autoespectro da aceleração Zeta	80
Figura 5.39 - Momentos de Flap e Lag x Velocidade do Vento	81

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 - Características do aerogerador	47
Tabela 5.2 - Propriedades dinâmicas dos primeiros modos de vibração da pá.....	50
Tabela 5.3 - Correlação dos resultados teóricos e experimentais.....	57
Tabela 5.4 - Características das pás.....	59
Tabela 5.5 - Características da Estrutura	60
Tabela 5.6 - Parâmetros Considerados	60
Tabela 5.7 - Parâmetros de correção do vento.....	61
Tabela 5.8 - Frequências Naturais da Pá e da Torre.....	63

1 Introdução

1.1 Motivação

Dentre as fontes alternativas para geração de energia elétrica, a energia eólica é uma opção promissora no Brasil. Com a preocupação da preservação do meio ambiente, a energia eólica surge como alternativa sustentável e limpa por se tratar de uma geração de energia que não emite gases poluentes nem gera resíduos. Além disso, o vento é uma matéria prima inesgotável, natural e gratuita.

O aproveitamento da energia eólica ocorre pela sua conversão em energia de rotação, através de turbinas, denominadas aerogeradores, para geração de energia elétrica. Estes equipamentos são compostos por rotor, pás, gerador de energia elétrica e a torre de sustentação, conforme ilustra a Figura 1.1. (SANT'ANNA, 2009)

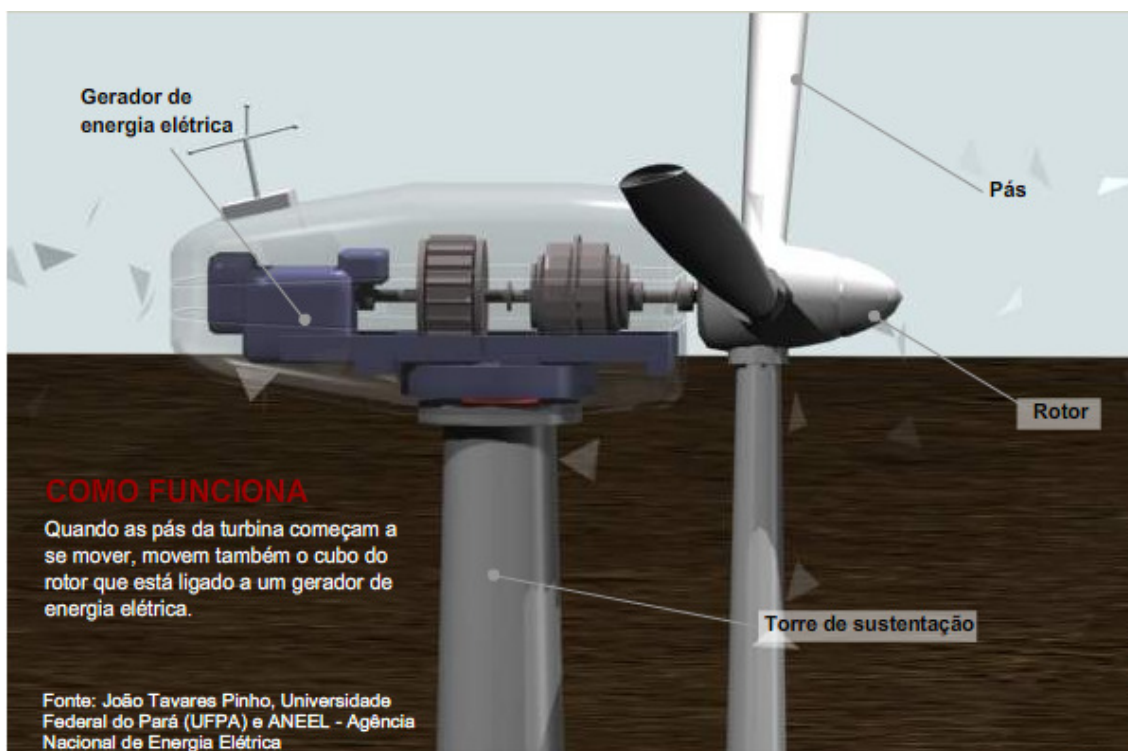


Figura 1.1 – Componentes de uma Turbina Eólica

1.1.1 A energia eólica no Brasil

De acordo com estudos publicados em 2009 na revista científica “Proceedings of the National Academy of Sciences” (LU, McELROY, KIVILUOMA, 2009), o vento pode suprir as necessidades energéticas do mundo. Porém, de acordo com especialistas do INPE, esse estudo leva em consideração apenas o potencial de aproveitamento do vento. De acordo com o órgão, os ventos brasileiros podem atender 60% do consumo nacional de forma competitiva. (ERENO, 2010)

O nordeste apresenta a maior parte dos mais de 71 mil quilômetros quadrados do território brasileiro que contam com velocidade de vento superior a sete metros por segundo, necessária à geração de energia em aerogeradores de grande porte, proporcionando um potencial eólico de 272 terawatts-hora por ano. É um valor considerável, diante do consumo nacional de energia elétrica de 424 Twh/ano. (AMARANTE ET AL., 2001)

O aproveitamento desse potencial ainda é baixo, porém o crescente apoio do setor financeiro vem contribuindo para o aumento da capacidade de geração de energia eólica no Brasil (Figura 1.2). Em 2009, por exemplo, essa capacidade aumentou cerca de 77% em relação ao ano anterior (ABDALA, 2010). Os dados divulgados pelo Conselho Global de Energia Eólica mostraram que o Brasil cresceu mais que o dobro da média mundial, que foi 31%. Desde 1992, ano da instalação da primeira turbina eólica no país, localizada em Fernando de Noronha, e principalmente depois da criação do Programa de Incentivos de Fontes Alternativas (PROINFA), que aconteceu em 2002, a produção de energia eólica no país cresceu de 22 MW em 2002 para 602 MW em 2009, ano em que 36 parques eólicos estavam em operação, localizados no Sul, Sudeste e principalmente no Nordeste do país. Até o início de 2011 eram 51 parques eólicos em operação no Brasil (Figura 1.3 – SANT’ANNA, 2009), com uma capacidade instalada de 937 MW (ENERGIA, 2011). Em março de 2011, foi aprovado o financiamento de nove parques eólicos no país, sendo oito deles no Ceará com capacidade de 211 MW e o último em Tramandaí, no Rio Grande do Sul, com 70 MW de potência instalada. Além desses, outros 18 projetos, com mais 500 MW entraram em operação ainda em 2011, incluindo o parque eólico de Tramandaí. Incluindo as duas operações que já foram assinadas ou estão em processo de assinatura, 51 contratos de financiamento direto e indiretos, para implementação de 1369 MW. Além desses, outras 44 operações estão em

análise (BNDES, 2011). De acordo com NATUREZA (2012) a capacidade eólica no Brasil já chegou a 1509 MW no início de 2012.

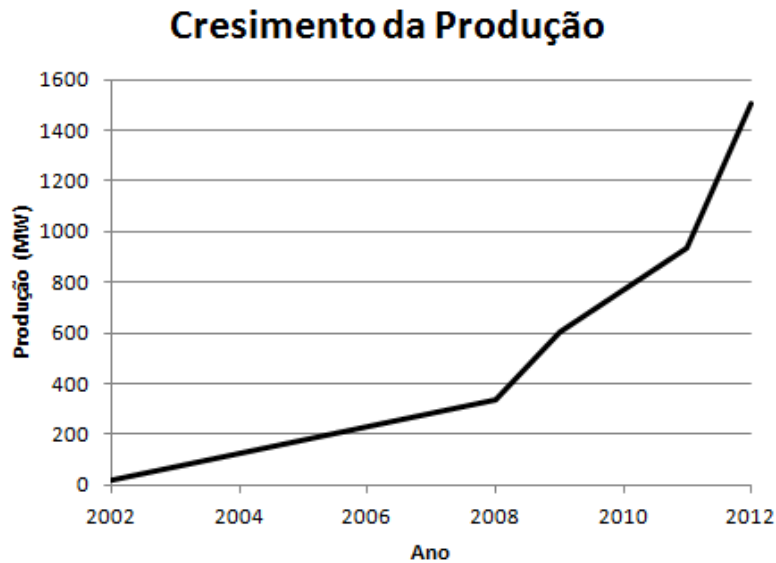


Figura 1.2 – Crescimento da Produção de Energia no Brasil



Figura 1.3 – Localização dos parques eólicos no país

O gráfico mostra que a energia eólica é um setor que está cada vez mais tomando espaço no mercado e a tendência é que isso aumente ainda mais. Porém, no Brasil, grande parte da tecnologia e dos estudos para fabricação e desenvolvimento dessas

turbinas vem do exterior. Algumas empresas brasileiras que participam da produção de turbinas eólicas são subsidiárias de empresas alemãs ou espanholas, por exemplo (ERENO, 2010).

1.1.2 Sistema torre-aerogerador

Dependendo das dimensões do aerogerador, as torres podem ser autoportantes ou estaiadas, como ilustrado na Figura 1.4 (FIGUEREDO, 2012). No primeiro grupo estão as torres reticuladas e as tubulares. As torres estaiadas são, em geral, compostas de mastros tubulares de pequeno diâmetro estabilizados por cabos pré-tensionados ancorados no terreno (estais). (FIGUEREDO, 2012)

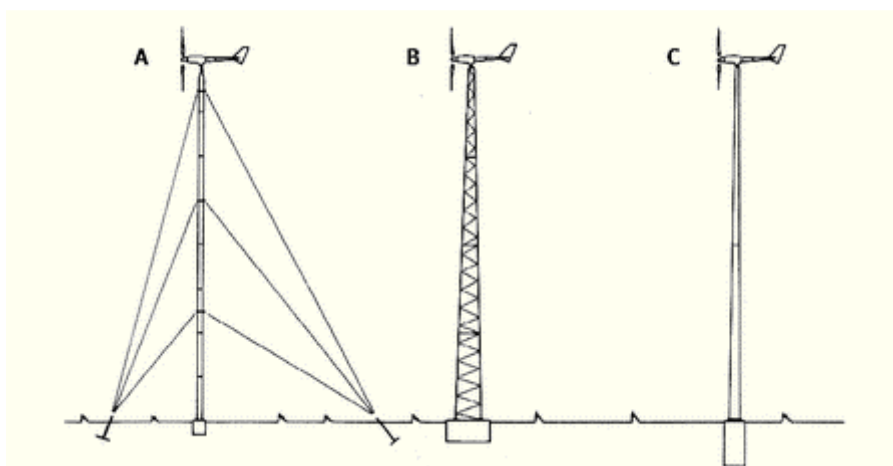


Figura 1.4 - Torre (a) estaiada e autoportante (b) treliçada ou (c) tubular

Os aerogeradores de grande porte podem ser montados sobre torres com mais de cem metros de altura. Existem também os projetos de pequeno porte, com torres de quinze ou vinte metros de altura, que vêm sendo desenvolvidos por pequenas empresas e pesquisadores nas universidades e centros de pesquisas brasileiros, com foco no mercado de comunidades isoladas, fazendas ou áreas sem acesso a energia convencional. De acordo com ERENO (2010) o mercado mundial de aerogeradores de pequeno porte está em expansão e no ano da publicação apresentou um crescimento de 53% em relação ao ano de 2007, superando a capacidade de 40 megawatts alcançada em 2008. Além disso, os mais de duzentos fabricantes espalhados pelo mundo venderam

aproximadamente dezenove mil aerogeradores de pequeno porte em 2008. (ERENO, 2010)

A torre e o aerogerador formam um sistema mecânico cujo comportamento sob ação do vento pode ser caracterizado por vibrações das pás e da torre havendo a possibilidade de ressonância devida à aproximação entre frequências naturais de vibração das pás e da torre. Sendo assim, um dos problemas a serem enfrentados no projeto deste sistema é o da vibração excessiva das pás e da torre que pode levar à fadiga dos materiais.

1.2 Objetivos

Este trabalho focaliza o comportamento dinâmico do sistema acoplado torre-aerogerador de eixo horizontal por meio de um modelo analítico-numérico. O desenvolvimento do modelo é feito a partir do trabalho apresentado por PEREIRA (1993) que aborda o comportamento dinâmico das pás sob ação do vento, considerando dois modos de vibração em cada uma delas. O modelo aqui desenvolvido é aplicado a um sistema de pequeno porte que foi monitorado sob ação de vento (BATTISTA, 2009), para fins de comparação teórico-experimental. A torre eólica é tubular em aço e estaiada e o aerogerador tem potência de 6 kW.

Os objetivos podem ser assim descritos:

1. Incluir o acoplamento torre-aerogerador no modelo analítico apresentado por PEREIRA (1993), considerando-se também um modo de vibração da torre em flexão no plano vertical que contém a direção do vento.
2. Desenvolver as equações de movimento do sistema acoplado torre-aerogerador e implementar a sua solução numérica.
3. Comparar os resultados teóricos do modelo com os resultados experimentais de monitoração dinâmica de um sistema torre estaiada tubular - aerogerador executados por BATTISTA (2009)

O desenvolvimento das equações do sistema acoplado é feito com base no Princípio Variacional de Hamilton aplicado a um modelo discreto com três graus de liberdade, sendo dois referentes à pá e um à torre.

A determinação das propriedades dinâmicas da torre-exemplo é feita por meio de modelo numérico composto de elementos de pórtico espacial para representar o mastro tubular e elementos de treliça espacial para os estais. Após calibração deste modelo numérico em termos de frequências naturais, as propriedades modais de um dos modos de vibração foram inseridas no modelo analítico do sistema acoplado. As comparações teórico-experimentais foram efetuadas em termos de aceleração no topo da torre e apresentaram boa correlação para uma faixa de frequência em que foi identificada ressonância pela proximidade entre uma das frequências naturais da torre e uma das pás.

1.3 Escopo do Trabalho

O conteúdo desse trabalho foi organizado da seguinte forma:

O capítulo 1 apresenta introdução da situação da energia eólica no Brasil e no mundo e do desenvolvimento do trabalho

O capítulo 2 contém um resumo com os conceitos básicos que envolvem um aerogerador, necessários a uma melhor compreensão do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta as considerações feitas para definir o modelo matemático e o desenvolvimento das equações de movimento dos graus de liberdade considerados.

O capítulo 4 contém o desenvolvimento algébrico das forças aerodinâmicas baseadas na teoria do elemento de pá, definindo o vetor velocidade relativa do vento e as componentes do vetor de força aerodinâmica, determinando os coeficientes de sustentação e arrasto e definindo as equações de forças generalizadas para os graus de liberdade considerados.

O capítulo 5 descreve as características de um aerogerador monitorado sob ação de vento e apresenta as respostas dinâmicas obtidas em medições experimentais. Por fim, são apresentadas as respostas obtidas com o modelo analítico desenvolvido ao longo do trabalho e comparadas com as respostas experimentais.

O sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho baseadas nos resultados mais relevantes e sugestões para dar continuidade à linha de pesquisa

2 Conceitos Gerais

A potência elétrica gerada pelas turbinas eólicas depende do perfeito funcionamento de todos os seus componentes e da interação entre eles. O estudo do comportamento aeroelástico de um aerogerador exige modelos de cálculos refinados para tratar o acoplamento entre os elementos flexíveis (pás), o elemento rígido (nacele) e a estrutura esbelta da torre.

O modelo discreto do sistema estrutural consiste dos graus de liberdade generalizados da torre e de cada pá. A complexidade da análise depende de quantos componentes são modelados e do número de graus de liberdade associados a cada pá. Inicialmente foram desenvolvidas as equações de movimento para os dois primeiros graus de liberdade de uma pá isolada (PEREIRA, 1993)

2.1 Aerogerador

Existem dois tipos principais de aerogeradores: os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Atualmente os mais usados são os de eixo horizontal, nos quais se distinguem três componentes principais: pás, nacele e torre (vide Figura 1.1).

Dependendo de cada projeto, de acordo com os estudos técnicos e econômicos, são definidas as configurações desses componentes tais como: quantidade de pás, material de cada componente, orientação do eixo do rotor, entre outras.

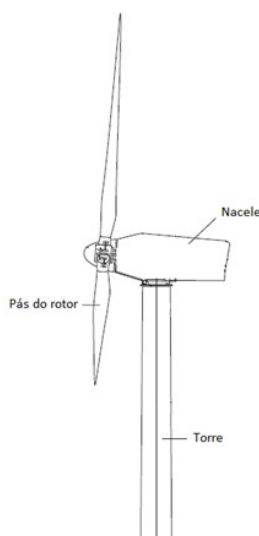


Figura 2.1 - Componentes da Turbina

Apresenta-se a seguir uma breve descrição desses componentes.

2.1.1 Torre

A principal função da torre é suportar a turbina permitindo que as pás girem a uma altura adequada acima do terreno. As torres podem ser treliçadas ou tubulares, autoportantes ou estaiadas, de aço ou concreto. As mais comuns nos parques eólicos brasileiros são as de aço com seção tubular.

2.1.2 Nacele

A nacele é o componente do aerogerador onde são instalados os sistemas responsáveis pelo funcionamento do rotor e transformação da energia eólica em energia elétrica.

As mais modernas apresentam diversos tipos de sistemas que proporcionam um melhor funcionamento das turbinas. Um deles é o sistema de orientação da nacele que posiciona as pás num plano perpendicular à direção do vento, com objetivo de aproveitar o máximo do vento na geração de energia. Outro sistema presente nas turbinas é o de segurança, que restringe a rotação quando os ventos atingem velocidades muito altas.

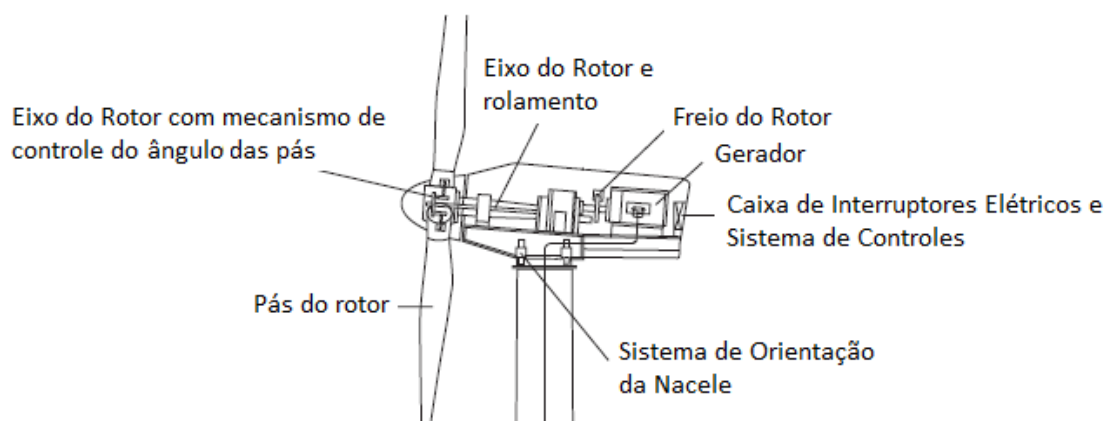


Figura 2.2 - Nacele

Inclinação do eixo do rotor

As torres eólicas são muito próximas ao plano de rotação das pás. Por esse motivo, para evitar que as pás possam colidir com a torre em razão das suas vibrações, os projetos das turbinas costumam apresentar um ângulo de inclinação do eixo do rotor (θ_c) em relação ao plano horizontal, conforme Figura 2.3:

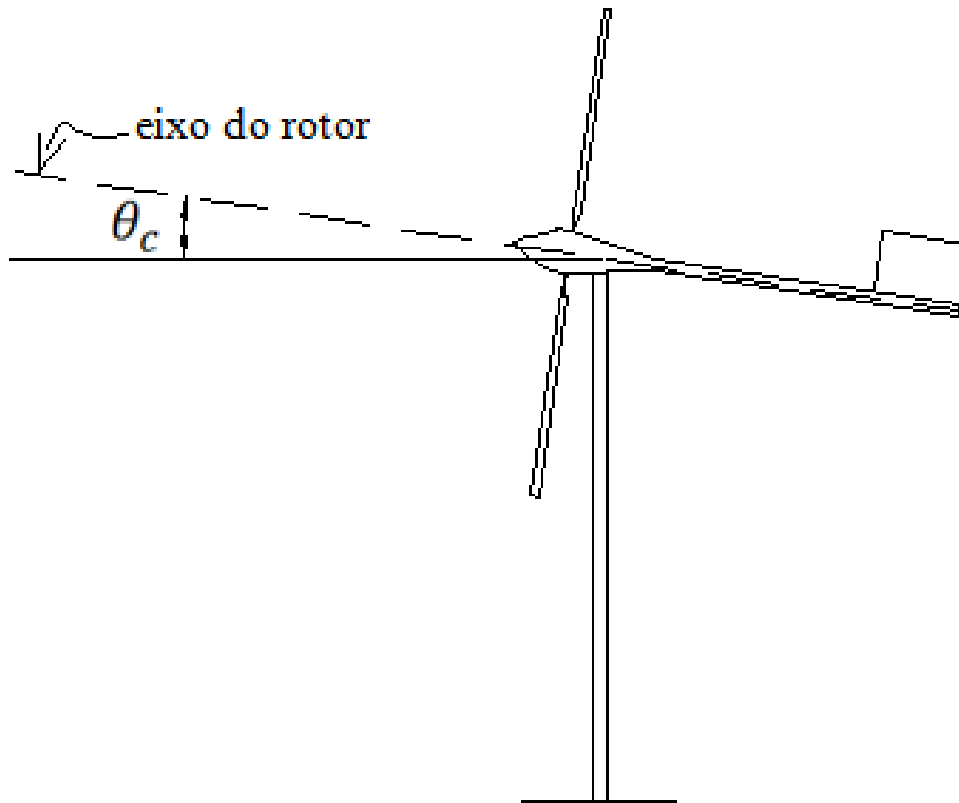


Figura 2.3 - Ângulo de inclinação do eixo do rotor

Alinhamento da torre

Atualmente as turbinas eólicas apresentam um mecanismo de ajuste da posição da nacelle para que o plano de rotação se mantenha perpendicular ao vento. Porém, a direção do vento sofre rápidas e constantes mudanças o que torna impossível uma turbina eólica acompanhar essa variação de forma instantânea. Portanto, essas turbinas não ficam sempre alinhadas com a direção principal do vento, ou seja, a direção do vento médio e as flutuações provocam um pequeno ângulo de desalinhamento (δ) desse fenômeno natural quando atinge as pás. Dessa forma podemos dizer que o vento que incide na pá devido ao alinhamento é:

$$V_i = \begin{Bmatrix} V_0 \sin \delta \\ V_0 \cos \delta \\ 0 \end{Bmatrix}$$

2.1.3 Pás

As características das pás, tais como o formato, material e rigidez, por exemplo, são extremamente importantes para o desempenho da turbina, influenciando principalmente a aerodinâmica das mesmas. Atualmente, os perfis mais utilizados para fazer pás de turbinas de grande porte são os modelos NACA séries 44 e 230. (HAU, 2005) Alguns aerogeradores de pequeno porte apresentam modelos MH, conforme ENERSUD (2012).

Nos aerogeradores de três pás, elas são mais esbeltas do que em um modelo de duas pás. Além disso, apresentam uma baixa relação entre a velocidade do vento e a velocidade angular das pás. Essa relação é dada pela chamada relação da velocidade de ponta da pá descrita no item 2.2. Outro critério importante na definição das pás está relacionado à emissão de ruídos gerados pelas turbinas. Esse problema é causado quando as pás apresentam uma velocidade de ponta de aproximadamente 70 m/s. (HANSEN, 2008)

Perfil da pá

As propriedades aerodinâmicas definidas pelo perfil da pá são parâmetros importantes para definir a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto. As pás têm perfil (aerofólio) semelhante aos das asas dos aviões com objetivo de minimizar a relação C_D/C_L entre os coeficientes de arrasto e sustentação, maximizando assim a eficiência e desempenho dos rotores.

A Figura 2.4 apresenta as principais características que devem ser definidas para escolha da seção transversal de uma pá, com objetivo de obter a relação ótima entre os coeficientes.

Ângulo de Azimute

O ângulo de azimute (ψ) é formado entre o eixo vertical e a direção do comprimento da pá, sendo considerado $\psi=0^\circ$ quando orientado na vertical para baixo, como apresentado na Figura 2.5. Derivando o ângulo de azimute em relação ao tempo obtém-se a velocidade angular da pá ($\Omega = \dot{\psi}$).

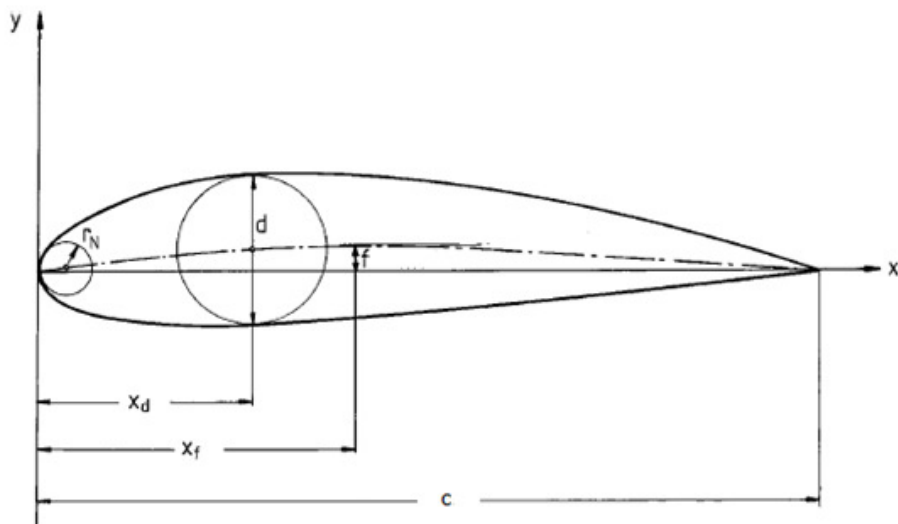


Figura 2.4 – Seção Transversal da pá

- O comprimento da corda (c)
- A curvatura máxima (f) e a posição horizontal (x_f) onde está situada
- Diâmetro máximo da pá (d) e a posição horizontal (x_d) onde o mesmo está situado
- Raio da ponta da pá (r_n)

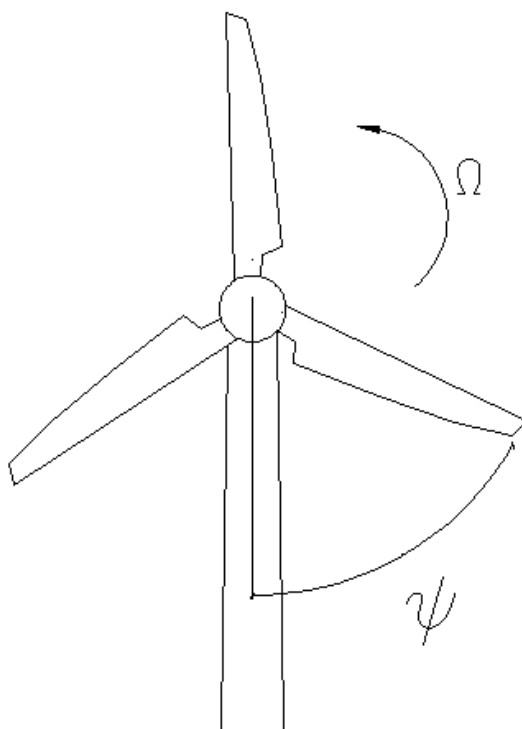


Figura 2.5 - Ângulo de azimute

Ângulo de torção

Para o melhor aproveitamento do vento e bom desempenho da turbina, as pás não são paralelas ao plano de rotação, mas apresentam uma rotação em relação a esse plano. A Figura 2.6 apresenta o ângulo de torção θ entre a corda da pá e o plano de rotação.

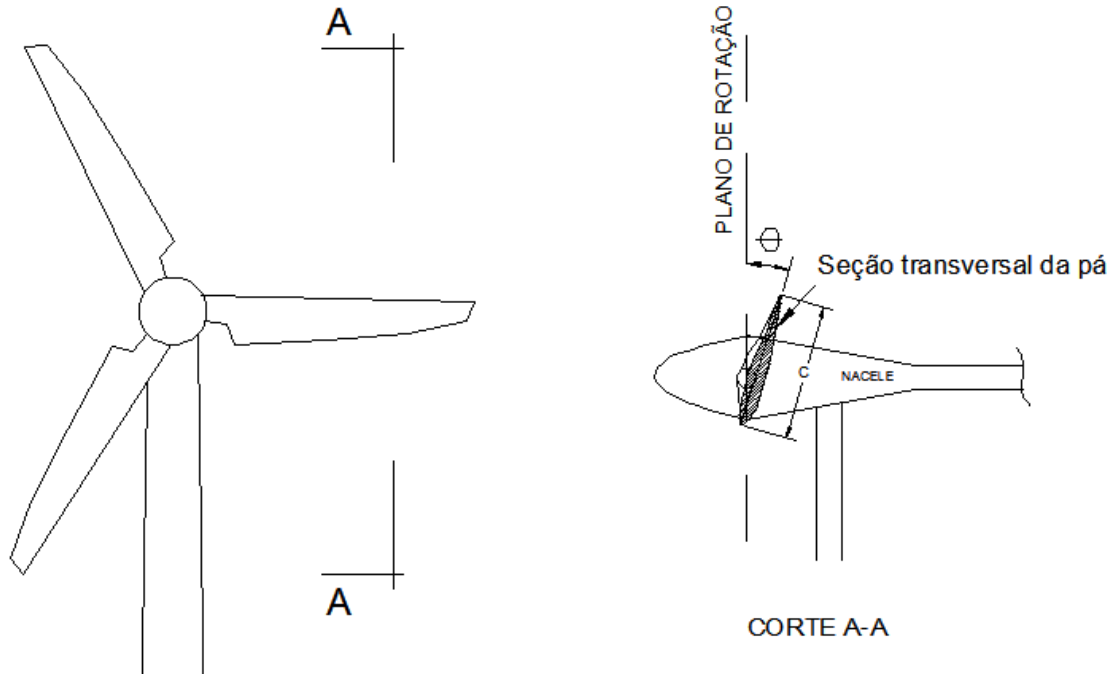


Figura 2.6 – Ângulo de torção da pá

2.2 Relação de Velocidade de Ponta

É possível determinar a velocidade de rotação das pás através do *Tip Speed Ratio* (λ) que é a relação entre a velocidade tangencial da ponta das pás e a velocidade do vento não perturbado, dada pela equação abaixo: (GALIZIA, 2004)

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} \quad (2.1)$$

ω e R são respectivamente velocidade angular e o raio da pá e V_0 é a velocidade do vento não perturbado. A relação de velocidade de ponta pode ser obtida através de análises experimentais, determinando a velocidade angular para uma velocidade de vento qualquer. Alguns fabricantes fornecem esses dados, como aconteceu no modelo utilizado nesse trabalho.

2.3 Sistema de coordenadas

O modelo aeroelástico de uma turbina eólica se torna complexo em função da rotação das pás. Portanto é necessário definir o sistema de coordenadas utilizado na análise. Nesse caso foi definido o sistema de coordenadas inercial, com origem no topo e centro da torre conforme a Figura 2.7:

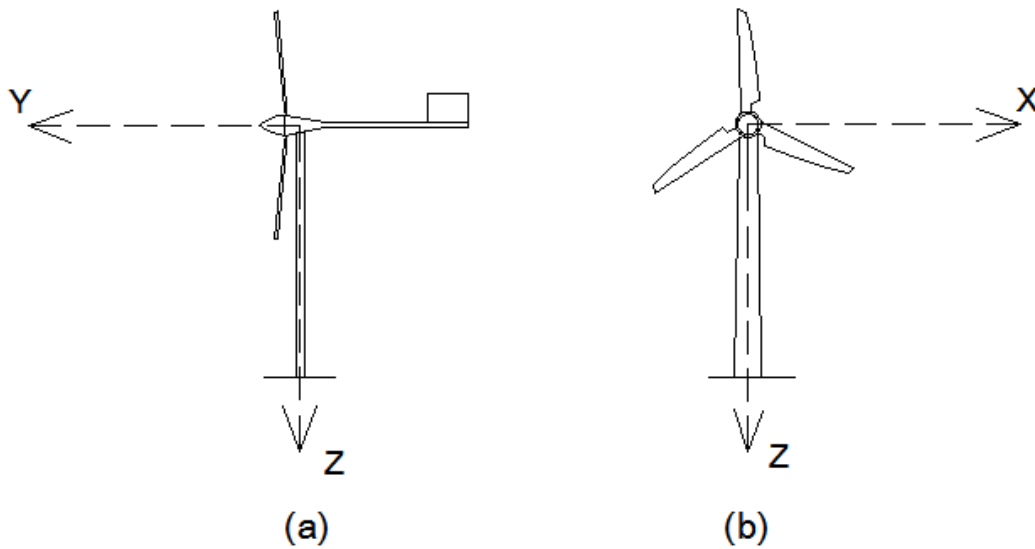


Figura 2.7 - Sistema Global de Coordenadas

O vetor posição \mathbf{a} de um ponto p qualquer pode ser facilmente escrito em função do sistema de eixos girantes acoplados à articulação da pá (Figura 2.8). Uma série de transformações de eixos é necessária para escrevê-lo no sistema inercial.

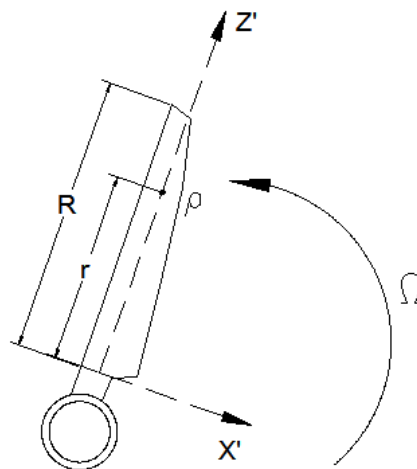


Figura 2.8 - Sistema de Coordenadas Girantes

2.4 Potência do aerogerador

As turbinas eólicas são classificadas pela potência de seus aerogeradores que é obtida pela extração da potência disponível no vento (P_v) definida pela equação (2.2) (GALIZIA, 2004):

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 \quad (2.2)$$

sendo A a área de varredura da pá, ou seja, a área de um círculo fictício formado pelo movimento das pás, ρ é a massa específica do ar e V_0 a velocidade do vento.

De acordo com Betz e Glauert apenas parte dessa potência pode ser extraída pelas turbinas. Dessa forma, a potência mecânica pode ser escrita em função do coeficiente de potência $C_{p,Betz}$, conforme a equação (2.3): (HANSEN, 2008)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{p,Betz} \quad (2.3)$$

A extração da energia pode chegar a um máximo de 59,3% da energia do vento, porém de acordo com GASH e TWELW (2002) é ainda menor, podendo chegar a 50% em casos de turbinas que se movimentam devido às forças de sustentação.

A potência do rotor também é definida pela equação (2.4):

$$P = \omega T \quad (2.4)$$

sendo T o torque das três pás e ω a velocidade angular das pás.

Além de extrair apenas um percentual da potência disponível no vento, a potência do rotor apresenta algumas perdas devido ao rendimento elétrico, da turbina e dos redutores que compõe o aerogerador. O aerogerador descrito em um exemplo (GALIZIA, 2004) tem rendimento da turbina (η_t) aproximado de 60%, o rendimento do redutor (η_r) é de 85% e o rendimento elétrico (η_e) igual a 80%. Dessa forma, o aproveitamento da potência do aerogerador pode chegar a apenas 25% da potência disponível de vento.

Considerando as perdas, a potência do aerogerador pode ser definida pela equação (2.5):

$$P = \omega T \cdot \eta_t \cdot \eta_r \cdot \eta_e \quad (2.5)$$

2.5 Controle de Passo

Atualmente aerogeradores apresentam diversos mecanismos de controle como de orientação, velocidade e carga, entre outros. Nesse trabalho nos limitaremos a apresentar o controle de passo, mecanismo existente no modelo utilizado como exemplo e que tem preferência dos fabricantes por oferecer maior flexibilidade em sua operação. (DUTRA, 2008)

O controle de passo trabalha em conjunto com um controlador, que monitora a potência de saída, os ângulos de controle e as condições do vento, por exemplo. Através das informações recebidas do controlador, o sistema de Controle de Passo faz com que as pás girem em torno do seu eixo longitudinal, modificando o ângulo de ataque sempre que a potência nominal do gerador é superada. Ou seja, à medida que a velocidade do vento começa a aumentar, as pás começam a girar mais rápido até chegar à velocidade nominal. Quando a velocidade do vento já se torna alta suficiente para ultrapassar essa velocidade nominal, o controle de passo aciona o mecanismo de rotação das pás, alterando o ângulo de torção (Figura 2.6), diminuindo o ângulo de ataque, conseqüentemente a força aerodinâmica e a velocidade de rotação das pás, mantendo essa última com a velocidade nominal. Em outras palavras, para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o controle determina o ângulo de ataque necessário para que a potência seja nominal, conforme mostra a Figura 2.9.

Outra vantagem do controle de passo se deve ao fato de permitir controle de potência ativo sob todas as condições de vento e também sob potências parciais.

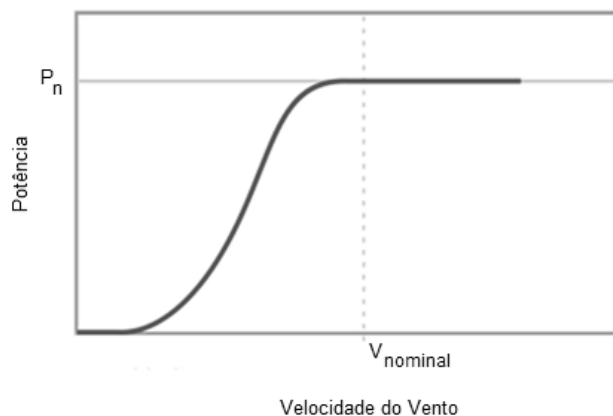


Figura 2.9- Potência Nominal x Velocidade do Vento

3 Modelo Matemático

3.1 Graus de Liberdade do sistema

As equações de movimento do modelo acoplado torre-aerogerador são deduzidas com base no Princípio Variacional de Hamilton aplicado ao modelo discreto ilustrado na Figura 3.1, considerando apenas os elementos de pá e da torre, para os graus de liberdade mais representativos desse sistema.

Este modelo é baseado em PEREIRA (1993) que foi desenvolvido com base em CHOPRA e DUGUNDJI (1979), EGGLESTON e STODDARD (1987), FEITOSA (1989) e principalmente em BIERBOOMS (1990).

Cada pá pode ser modelada como uma barra rígida com duas molas elásticas (Figura 3.1 – PEREIRA,1993) representando seus dois graus de liberdade permitidos (Figura 3.2). O primeiro é o movimento da pá na direção perpendicular à corda da pá (*flap* - β). O segundo é o movimento na direção paralela à corda da pá (*lag* - ζ).

A torre trabalha de forma análoga a uma barra com uma extremidade engastada e a outra livre. Nesse caso, cada ponto da torre apresenta seis graus de liberdade (três de rotação e três de translação).

Para definição do modelo neste trabalho foi considerado para torre apenas os graus de liberdade generalizados associados à translação fora do plano de rotação das pás. O sistema de coordenadas é definido sempre com o eixo y na direção do vento. Além disso, devido à complexidade das pás e imprecisões de alguns fatores referentes ao vento (ângulo de ataque, por exemplo) foram feitas algumas simplificações:

- A seção transversal da pá que normalmente tem características diferentes ao longo do comprimento, no modelo foi definida com perfil de seção constante e conseqüentemente coeficientes de arrasto e sustentação constantes.
- Com a simplificação anterior, a massa conseqüentemente foi considerada com distribuição uniforme ao longo da pá.
- A turbina não apresenta um ângulo de inclinação (θ_c), ou seja, o eixo da nacele está na horizontal.

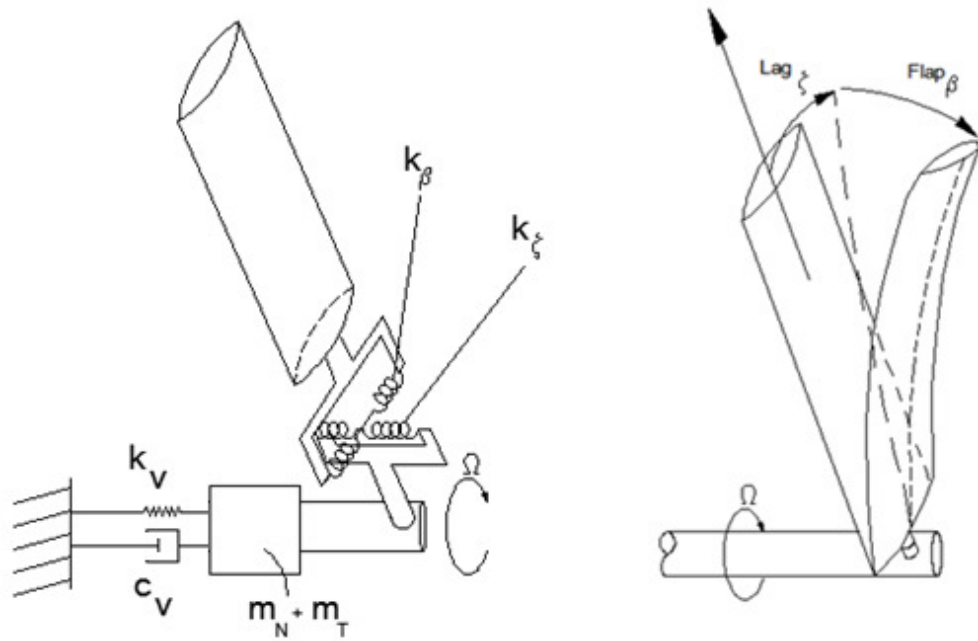


Figura 3.1 - Graus de Liberdade do modelo

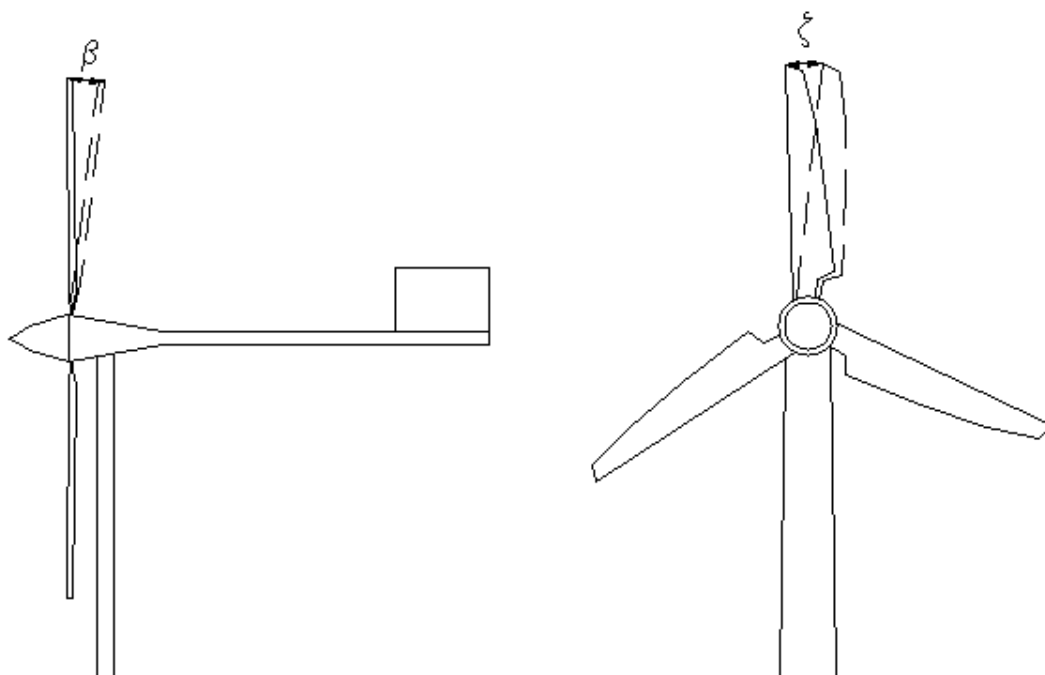


Figura 3.2 – Graus de liberdade das pás

3.2 Vetor Posição de um ponto da pá

Como as pás se apresentam em um sistema girante, por meio de algumas rotações e translações de coordenadas, é possível definir o vetor posição \mathbf{a} de um ponto p qualquer da pá em relação ao sistema fixo no topo da torre.

Como apresentado na Figura 2.7, o sistema de coordenadas inercial encontra-se no topo da torre, com o eixo vertical Z_1 apontando para baixo e Y_1 perpendicular ao plano de rotação.

O cubo das pás está a uma distância L do eixo da torre (vide Figura 3.3). O vetor \mathbf{V}_L é responsável pela translação do sistema de coordenadas acoplado ao cubo para o eixo da torre.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ L \cdot \cos(\theta_c) \\ L \cdot \sin(\theta_c) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo

$$\mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} 0 \\ L \cdot \cos(\theta_c) \\ L \cdot \sin(\theta_c) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Como θ_c foi considerado nulo, nesse caso o eixo Y_1 coincide com o eixo Y_2 .

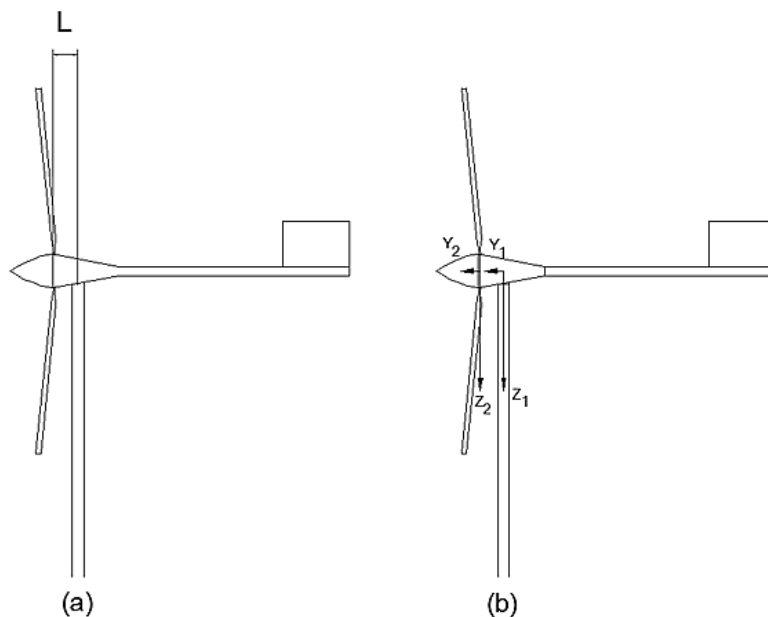


Figura 3.3 – Sistema de Eixos 1 e 2

Como as pás giram em torno do eixo Y, é feita a transformação do sistema girante acoplado ao cubo (sistema 3) para o sistema inercial 2 através da multiplicação por uma matriz de rotação. O Eixo Y₃ coincide com o Eixo Y₁, porém os eixos Z₃ e X₃ variam de acordo com o ângulo de azimute ψ . (Figura 3.4)

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\psi \cdot \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Sendo,

$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos(\psi(t)) & 0 & \sin(\psi(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi(t)) & 0 & \cos(\psi(t)) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

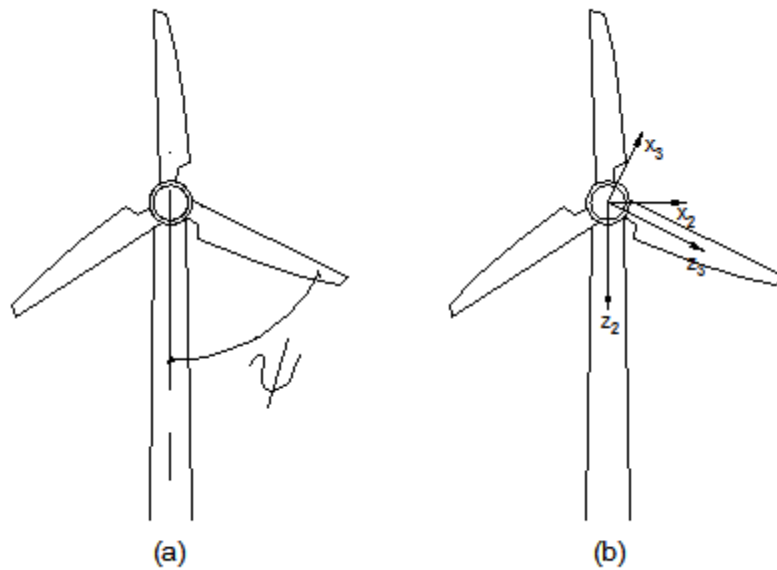


Figura 3.4 - Sistema de eixos 3

A articulação da pá apresenta uma excentricidade E em relação ao eixo Y do sistema global (ver Figura 3.5). Portanto é necessário considerar uma translação dos eixos girantes, considerando o eixo Z₄ paralelo ao eixo Z₃ do sistema de coordenada girante.

$$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \cdot \sin(\theta_c) \\ E \cdot \cos(\theta_c) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sendo,

$$\mathbf{V}_E = \begin{bmatrix} 0 \\ E \cdot \text{sen}(\theta_c) \\ E \cdot \text{cos}(\theta_c) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Como θ_c foi considerado nulo, nesse caso o eixo Z_3 coincide com o eixo Z_4 .

O ponto arbitrário p está localizado a uma distância r da articulação, como apresentado na Figura 3.6. O Vetor \mathbf{V}_R é o vetor posição do ponto p no sistema girante acoplado à articulação da pá.

$$\begin{bmatrix} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \cdot \text{sen}(\theta_c) \\ r \cdot \text{cos}(\theta_c) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_5 \\ Y_5 \\ Z_5 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

sendo,

$$\mathbf{V}_R = \begin{bmatrix} 0 \\ r \cdot \text{sen}(\theta_c) \\ r \cdot \text{cos}(\theta_c) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Como θ_c foi considerado nulo, nesse caso o eixo Z_4 coincide com o eixo Z_5 .

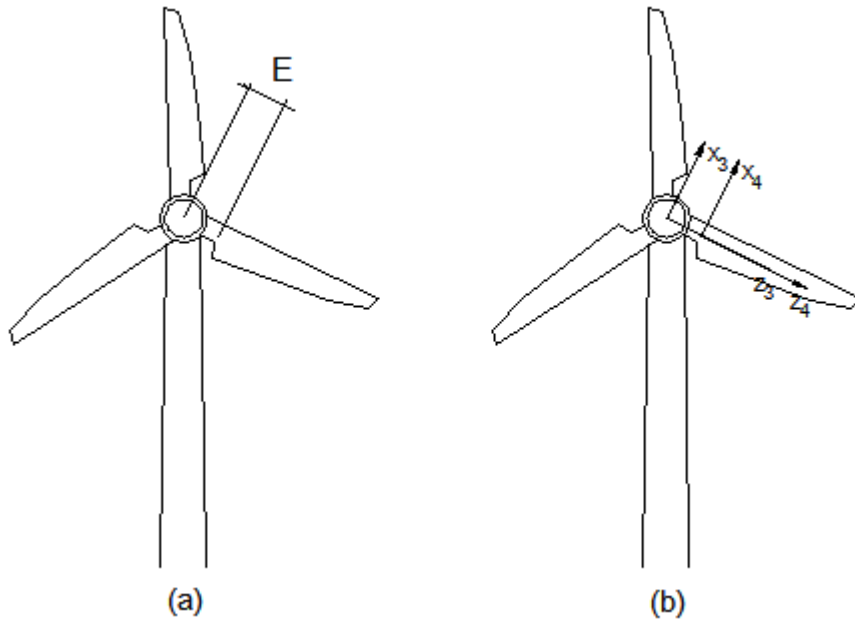


Figura 3.5 - Sistema de eixos 4

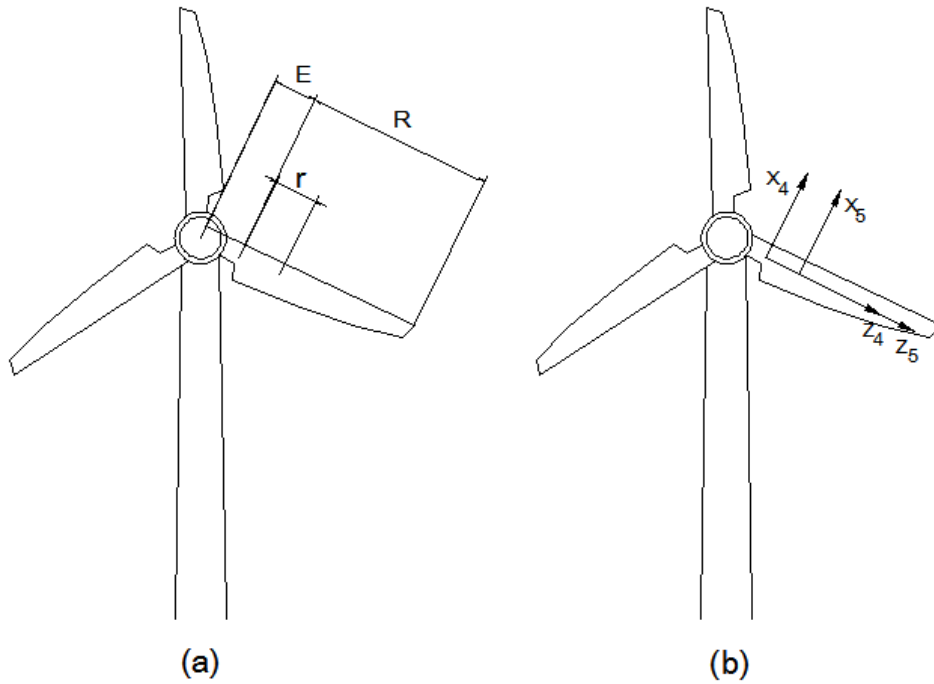


Figura 3.6 - Sistema de eixos 5

Devido à vibração da pá nos graus de liberdade β e ζ , o sistema de eixos que acompanha o movimento da pá com origem no ponto p é o sistema 7, representado pela Figura 3.7

$$\begin{bmatrix} X_5 \\ Y_5 \\ Z_5 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\beta \cdot \begin{bmatrix} X_6 \\ Y_6 \\ Z_6 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

e

$$\begin{bmatrix} X_6 \\ Y_6 \\ Z_6 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_\zeta \cdot \begin{bmatrix} X_7 \\ Y_7 \\ Z_7 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sendo

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta(t)) & \sin(\beta(t)) \\ 0 & -\sin(\beta(t)) & \cos(\beta(t)) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

e

$$\mathbf{R}_\zeta = \begin{bmatrix} \cos(\zeta(t)) & 0 & \sin(\zeta(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\zeta(t)) & 0 & \cos(\zeta(t)) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

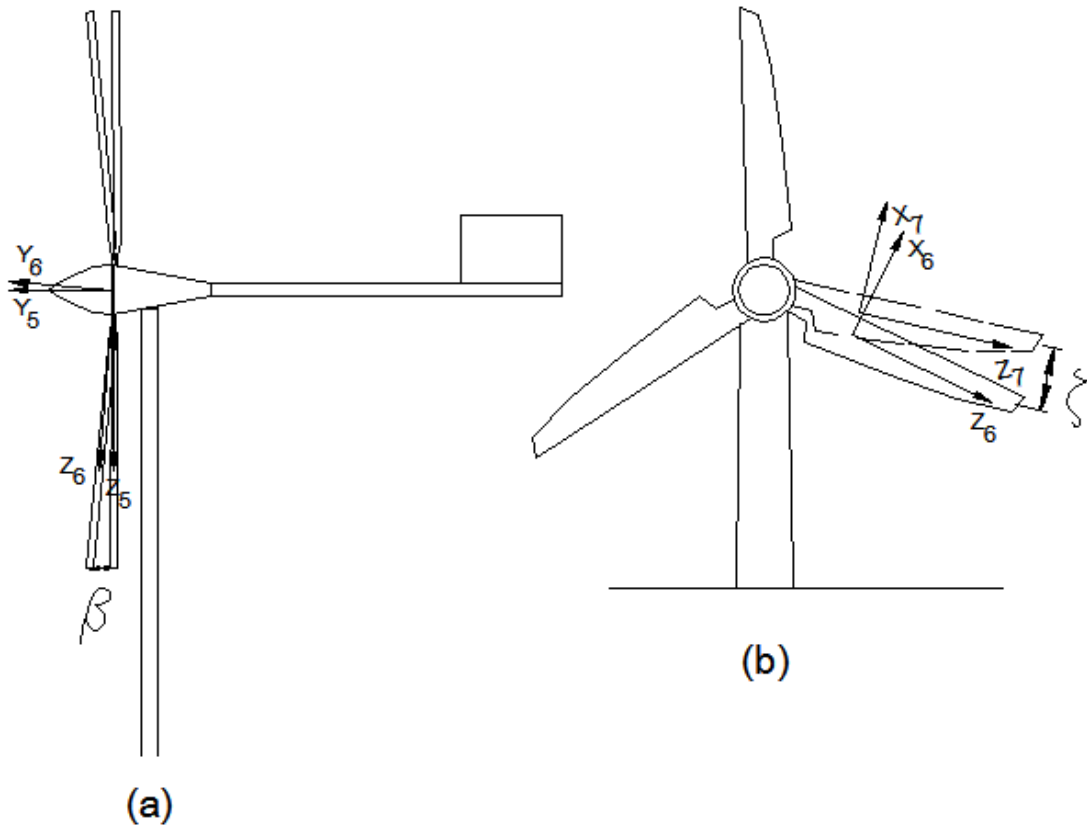


Figura 3.7 - Sistema de eixos 7

A equação (3.13) representa o vetor posição \mathbf{a}' do ponto p escrito no sistema inercial 1, para o caso de um rotor acoplado a um suporte fixo.

$$\mathbf{a}' = [\mathbf{V}_L + \mathbf{R}_\psi(\mathbf{V}_E + \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\zeta \mathbf{V}_R)] \quad (3.13)$$

Com θ_c igual a zero, tem-se

$$\mathbf{a}' = \begin{bmatrix} 0 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_\psi \left[\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E \end{bmatrix} + \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\zeta \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} \right] \quad (3.13a)$$

No caso de uma turbina, é necessário considerar também os movimentos da torre. Essa consideração é feita através da multiplicação do vetor \mathbf{a} por uma matriz de rotação referente aos graus de liberdade da torre e, por fim, somar o vetor que representa o deslocamento de translação da torre. Como no presente modelo somente será

considerado o movimento de translação $v(t)$ da torre na direção y_I tem-se o vetor \mathbf{V}_U definido na equação (3.14):

$$\mathbf{V}_U = \begin{bmatrix} 0 \\ v(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dessa forma é possível reescrever o vetor posição de um ponto arbitrário na pá, agora denominado \mathbf{a} , em relação ao sistema inercial localizado no topo da torre, através da Equação (3.15):

$$\mathbf{a} = \mathbf{V}_U + \mathbf{V}_L + \mathbf{R}_\psi(\mathbf{V}_E + \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\zeta \mathbf{V}_R) \quad (3.15)$$

Com θ_c igual a zero, tem-se

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 0 \\ v(t) + L \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_\psi \left[\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ E \end{Bmatrix} + \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_\zeta \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{Bmatrix} \right] \quad (3.15a)$$

Substituindo essas matrizes na Equação (3.15) é definido o vetor posição \mathbf{a} de um ponto arbitrário p da pá no sistema de coordenadas global como:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \cos(\psi(t)) \sin(\zeta(t))r + \sin(\psi(t))(E + \cos(\beta(t)) \cos(\zeta(t))r) \\ v(t) + L + \sin(\beta(t)) \cos(\zeta(t))r \\ -\sin(\psi(t)) \sin(\zeta(t))r + \cos(\psi(t))(E + \cos(\beta(t)) \cos(\zeta(t))r) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.3 Energia Cinética

A energia cinética para cada pá i é calculada através da seguinte equação:

$$T_i = \frac{1}{2} \int \dot{\mathbf{a}} \cdot \dot{\mathbf{a}} dm \quad (3.17)$$

Sendo $dm = \mu dr$, onde μ é a massa da pá por unidade de comprimento e $\dot{\mathbf{a}}$ o vetor velocidade do elemento infinitesimal da pá. A derivada ao longo do tempo do ângulo de azimute representa a velocidade angular da pá ($\dot{\psi} = \Omega$).

A energia cinética associada ao movimento da torre (T_T) é dada por:

$$T_T = \frac{1}{2}(m_N + m_T)\dot{v}^2 \quad (3.18)$$

Onde m_N é a massa da nacele e m_T é a massa da torre.

Portanto, a energia cinética do sistema pode ser expressa por:

$$T = \sum_{n=1}^3 \left[\frac{1}{2} I_B (\dot{\zeta}^2 + \Omega^2 + \Omega^2 \cos \beta^2 \cos \zeta^2 + 2 \Omega \dot{\beta} \sin \zeta \sin \beta \cos \zeta + 2 \Omega \dot{\zeta} \cos \beta + \dot{\beta}^2 \cos \zeta^2 - \Omega^2 \cos \zeta^2) + \frac{1}{2} F_B (2 \dot{v} \dot{\beta} \cos \beta \cos \zeta - 2 \dot{v} \dot{\zeta} \sin \beta \sin \zeta - 2 \Omega E \dot{\zeta} \cos \zeta + 2 \Omega^2 E \cos \beta \cos \zeta) + \frac{1}{2} m_B (\dot{v}^2 + \Omega^2 E^2) \right] + \frac{1}{2} (m_T + m_N) \dot{v}^2 \quad (3.19)$$

onde, m_B representa a massa total de uma pá, F_B é o momento estático da pá e I_B o momento de inércia da pá e são definidos por:

$$m_b = \int_0^R \mu dr = \mu R$$

$$F_b = \int_0^R \mu r dr = \mu \frac{R^2}{2} = m_b \frac{R}{2} = m_b R_{cg}$$

$$I_b = \int_0^R \mu r^2 dr = \mu \frac{R^3}{3} = m_b \frac{R^2}{3} = \frac{4}{3} m_b R_{cg}^2$$

É sabido que todos os graus de liberdade considerados no trabalho (β, ζ e v) e o ângulo de azimute (ψ) variam ao longo do tempo. Porém, com objetivo de simplificar as equações, foram omitidos os termos (t).

3.4 Energia Potencial

A energia potencial total de uma pá é dada pela soma da energia de deformação elástica no plano de rotação e fora dele, além da energia potencial gravitacional. A energia potencial total do sistema inclui também a energia potencial da nacele e da torre. Considerando os graus de liberdade do sistema utilizado nesse trabalho, a energia potencial total é definida pela fórmula:

$$P = \frac{1}{2}(\sum_{i=1}^3(k_{\beta_i}\beta_i^2 + k_{\zeta_i}\zeta_i^2) + k_v v^2) + m_B g h_{cg} + (m_N + m_T) g h_{cgT} \quad (3.20)$$

Na equação (3.20), a variável v representa o grau de liberdade de translação do topo da torre e β e ζ os de rotação da pá; k representa a rigidez de cada grau de liberdade, m_b é a massa da pá, g a aceleração gravitacional, h_{cg} a altura do centróide em relação ao eixo da nacele, $m_N + m_T$ são as massas da nacele e da torre. Essa altura varia na medida em que a pá gira, portanto pode ser substituída pelo valor da coordenada z do vetor posição definido na equação (3.15) com r igual a $r_{cg} = R/2$. Assim, para o modelo utilizado nesse trabalho a equação da Energia Potencial pode ser reescrita como:

$$P = \frac{1}{2}(k_v v^2 + k_{\beta}\beta^2 + k_{\zeta}\zeta^2) + m_b g (\cos \psi \sin \zeta r_{cg} - m_b g E \sin \psi - m_b g \sin \psi \cos \beta \cos \zeta r_{cg}) \quad (3.21)$$

3.5 Forças não conservativas

As forças não conservativas são as forças aerodinâmicas generalizadas e as forças de amortecimento estrutural das pás e da torre e serão definidas mais adiante no item 4.2.

3.6 Equação de Lagrange

Já definidas as equações da Energia Cinética e Potencial, derivando-as em relação ao tempo e aos graus de liberdade foram determinadas as equações de movimento de cada grau de liberdade definidas pela Equação de Lagrange (CLOUGH, JOSEPH, 1982), escrita na equação (3.22):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}} T \right) - \frac{\partial}{\partial q} T + \frac{\partial}{\partial q} P = Q_q \quad (3.22)$$

Onde Q_q é a força generalizada associada ao grau de liberdade q .

3.6.1 Grau de Liberdade de rotação da pá (beta)

Para o grau de liberdade β da pá, pode-se reescrever a equação (3.22) como:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\beta}} T \right) - \frac{\partial}{\partial \beta} T + \frac{\partial}{\partial \beta} P = Q_{\beta} \quad (3.23)$$

Resolvendo cada uma das derivadas parciais é obtido:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\beta}} T \right) = & I_B (\Omega \dot{\zeta} \cos \zeta^2 \sin \beta + \Omega \dot{\beta} \sin \zeta \cos \beta \cos \zeta - \Omega \dot{\zeta} \sin \zeta^2 \sin \beta + \\ & \ddot{\beta} \cos \zeta^2 - 2\dot{\beta} \dot{\zeta} \cos \zeta \sin \zeta) + F_B (\ddot{v} \cos \beta \cos \zeta - \dot{v} \dot{\beta} \sin \beta \cos \zeta - \\ & \dot{v} \dot{\zeta} \cos \beta \sin \zeta) \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \beta} T = & I_B (-\Omega^2 \cos \beta \cos \zeta^2 \sin \beta + \Omega \dot{\beta} \sin \zeta \cos \beta \cos \zeta - \Omega \dot{\zeta} \sin \beta) + \\ & F_B (-\dot{v} \dot{\beta} \sin \beta \cos \zeta - \dot{v} \dot{\zeta} \cos \beta \sin \zeta - E \Omega^2 \sin \beta \cos \zeta) \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} P = k_{\beta} + mg \cos \psi \sin \beta \cos \zeta r_{cg} \quad (3.26)$$

Substituindo os três termos, expandindo os senos e cossenos de β e ζ em série de Taylor e mantendo apenas os termos de primeira ordem (ou seja, fazendo $\sin \beta = \beta$, $\cos \beta = 1$ e $\sin \zeta^2 = \cos \zeta^2 = 1$) a equação lagrangeana do movimento para a coordenada generalizada β é definida pela equação (3.27), relacionada a cada pá:

$$I_B (\ddot{\beta} + 2\Omega \dot{\zeta} \beta - 2\dot{\beta} \dot{\zeta} \zeta + \Omega^2 \beta) + F_B (\ddot{v} + g \beta \sin \psi + \Omega^2 E \beta) + k_{\beta} \beta = Q_{\beta} - c \dot{\beta} \quad (3.27)$$

A determinação da Força Generalizada Q_{β} e do amortecimento estrutural $c \dot{\beta}$ será feita no item 4.2.1.

3.6.2 Grau de Liberdade de rotação da pá (zeta)

Para o grau de liberdade ζ da pá, pode-se reescrever a equação (3.22) como:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\zeta}} T \right) - \frac{\partial}{\partial \zeta} T + \frac{\partial}{\partial \zeta} P = Q_{\zeta} \quad (3.28)$$

Resolvendo cada uma das derivadas parciais é obtido:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{\zeta}} T \right) = I_B (\ddot{\zeta} - \Omega \dot{\beta} \sin \beta) + F_B (-\dot{v} \sin \beta \sin \zeta - \dot{v} \dot{\beta} \cos \beta \sin \zeta - \dot{v} \dot{\zeta} \sin \beta \cos \zeta - \Omega E \dot{\zeta} \sin \zeta) \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \zeta} T = & I_B (-\Omega^2 \cos \beta^2 \cos \zeta \sin \zeta - \dot{\beta}^2 \cos \zeta \sin \zeta + \Omega^2 \cos \zeta \sin \zeta + \Omega \dot{\beta} \cos \zeta^2 \sin \beta - \\ & \Omega \dot{\beta} \sin \zeta^2 \sin \beta) + F_B (-\Omega E \dot{\zeta} \sin \zeta - \Omega^2 E \cos \beta \sin \zeta - \dot{v} \dot{\beta} \cos \beta \sin \zeta - \\ & \dot{v} \dot{\zeta} \sin \beta \cos \zeta) \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial \zeta} P = k_\zeta + mg \cos \psi \cos \zeta r + mg \sin \psi \cos \beta \sin \zeta \quad (3.31)$$

Substituindo os três termos, expandindo os senos e cossenos de β e ζ em série de Taylor e mantendo apenas os termos de primeira ordem (ou seja, fazendo $\sin \beta = \beta$, $\cos \beta = 1$ e $\sin \zeta^2 = \cos \zeta^2 = 1$) a equação lagrangeana do movimento para a coordenada generalizada ζ é definida pela

$$I_B (\ddot{\zeta} + \dot{\beta}^2 \zeta - 2\Omega \dot{\beta} \beta) + F_B (-\dot{v} \beta \zeta + \Omega^2 E \zeta + g \sin \psi + g \cos \psi \zeta) = Q_\zeta - c \dot{\zeta} \quad (3.32)$$

A determinação da Força Generalizada Q_ζ e do amortecimento $c \dot{\zeta}$ será feita no item 4.2.2.

3.6.3 Grau de Liberdade de translação da torre (v)

Para o grau de liberdade v da torre, pode-se reescrever a equação (3.22) como:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{v}} T \right) - \frac{\partial}{\partial v} T + \frac{\partial}{\partial v} P = Q_v \quad (3.33)$$

Resolvendo cada uma das derivadas parciais é obtido:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial}{\partial \dot{v}} T \right) = \frac{1}{2} (m_T + m_N + 3m_b) \ddot{v} + F_B (-\sin \beta \dot{\beta}^2 \cos \zeta + \cos \beta \ddot{\beta} \cos \zeta - \quad (3.34)$$

$$2 \cos \beta \dot{\beta} \sin \zeta \dot{\zeta} - \sin \beta \cos \zeta \dot{\zeta}^2 - \sin \beta \sin \zeta \ddot{\zeta}) \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial v} T = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial v} P = k_v v \quad (3.36)$$

Substituindo os três termos, expandindo os senos e cossenos de β e ζ em série de Taylor e mantendo apenas os termos de primeira ordem (ou seja, fazendo $\sin \beta = \beta$, $\cos \beta = 1$ e $\sin \zeta = \zeta$, $\cos \zeta = 1$) e fazendo $(m_T + m_N + 3m_b) = m_m$, onde m_m é a massa modal do sistema, a equação lagrangeana do movimento para a coordenada generalizada v é definida pela equação (3.27), relacionada a cada pá:

$$m_m \ddot{v} + F_B(-\beta \dot{\beta}^2 + \ddot{\beta} - 2\dot{\beta} \zeta \dot{\zeta} - \beta \dot{\zeta}^2 - \ddot{\zeta}) + k_v v = Q_v - c \dot{v} \quad (3.37)$$

O termo Q_v representa a força generalizada do grau de liberdade da torre e $c \dot{v}$ representa o amortecimento estrutural da torre, e ambos serão discutidos no item 4.2.3.

4 Forças atuantes nas Turbinas

4.1 Forças Aerodinâmicas nas pás

Para determinação das forças aerodinâmicas atuantes nas pás da estrutura, foi utilizada a Teoria do Elemento de Pá (HANSEN, 2008). Nessa teoria, a pá é dividida em “n” seções, conforme apresenta a Figura 4.1 (LEITE, ARAUJO, 2007) e duas suposições são feitas (LEITE, ARAUJO, 2007):

1. Não existe interação aerodinâmica entre os elementos;
2. As forças atuantes na pá são determinadas apenas pelas características dos coeficientes de arrasto e sustentação de cada elemento.

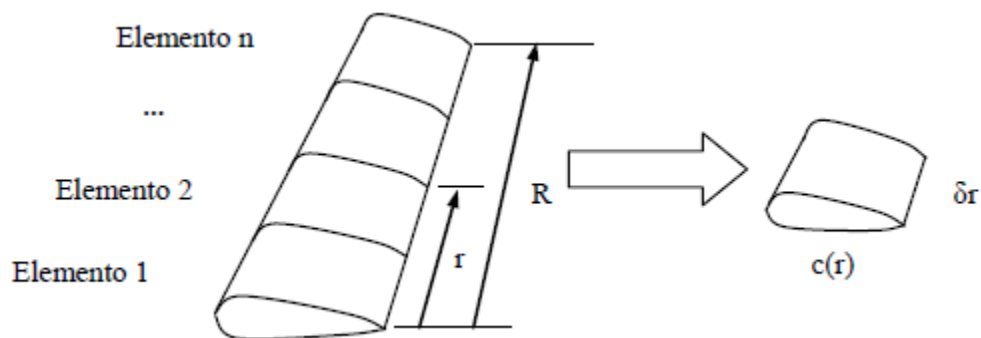


Figura 4.1 - Discretização dos elementos da pá

Dessa forma é possível determinar a força aerodinâmica em cada pá integrando a força de cada elemento infinitesimal ao longo da mesma.

A força aerodinâmica em um elemento infinitesimal da pá pode ser decomposta na força de arrasto (dD) e na força de sustentação (dL). A primeira é na direção do vento relativo, enquanto a segunda é perpendicular. Para cada elemento infinitesimal podemos expressar cada uma delas, respectivamente, por:

$$dL = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) V_{rel}^2 dr \quad (4.1)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) V_{rel}^2 dr \quad (4.2)$$

Para que se tenha um bom entendimento dessas expressões é necessário conhecer o conceito dos termos que estão presentes nelas que e serão apresentados nos itens a seguir.

4.1.1 Velocidade Relativa

A velocidade que interessa para o cálculo da força aerodinâmica não é a velocidade incidente do vento, mas a velocidade relativa, que nada mais é do que a subtração vetorial daquela com a velocidade de movimento das pás. A vibração das pás resulta em pequenas velocidades tanto na direção tangencial como na perpendicular ao plano de rotação. Além disso, esse movimento das pás ora aumenta ora diminui a velocidade relativa.

O vetor velocidade relativa do vento em relação a cada ponto das pás pode ser definido como a diferença entre o vetor velocidade do vento incidente (\mathbf{V}_i) e a velocidade absoluta dos pontos das pás ($\dot{\mathbf{a}}$), descrita da seguinte forma:

$$\mathbf{V}_{rel} = \mathbf{V}_i - \dot{\mathbf{a}} \quad (4.3)$$

Pode ser considerado que cada uma dessas velocidades é formada por três componentes: perpendicular (perpendicular ao plano de rotação), tangencial (perpendicular ao eixo da pá no plano de rotação) e longitudinal (na direção do eixo da pá). Ou seja, o vetor velocidade pode ser escrito por:

$$\mathbf{V}_{rel} = \begin{Bmatrix} V_t \\ V_p \\ V_l \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

Velocidade do Vento Incidente

A velocidade do vento medida por um anemômetro pode ser considerada a velocidade absoluta do vento. Porém diversas características, tanto do vento quanto da estrutura, influenciam nessa velocidade que não é a mesma quando incide na estrutura, tão pouco a mesma em toda estrutura. Esses fatores são diversos e se tratando de uma turbina eólica, podemos destacar alguns.

Rugosidade da superfície

A superfície da Terra influencia a circulação do ar, reduzindo consideravelmente a velocidade do vento. Portanto, à medida que se afasta da superfície terrestre, o vento tende a fluir mais livremente, como é apresentado na Figura 4.2. A variação da velocidade do vento com a altura z acima do terreno pode ser descrita pela chamada Lei Potencial: (BLESSMANN, 1995)

$$V_i = V_0 \left(\frac{z}{H} \right)^p \quad (4.5)$$

Sendo

V_0 – Velocidade média do vento sobre t segundos, a uma altura H sobre o terreno.

H – Altura de referência (em geral 10m) associada à Velocidade V_0

p – parâmetro função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo t

Como as estruturas eólicas normalmente são extremamente altas e as pás estão em constante movimento, a velocidade do vento que atinge a ponta da pá é diferente quando ela está no ponto mais alto da rotação do que quando está no ponto mais baixo.

Alinhamento da torre

Atualmente as turbinas eólicas apresentam um mecanismo de ajuste da posição da nacele para que o plano de rotação se mantenha perpendicular ao vento. Porém, a direção do vento sofre rápidas e constantes mudanças o que torna impossível uma turbina eólica, extremamente pesada, acompanhar essa variação de forma exata. Portanto, essas turbinas ficam alinhadas com a direção principal do vento, ou seja, a direção do vento médio e as flutuações provocam um pequeno ângulo de desalinhamento (δ) instantâneo. Dessa forma podemos dizer que o vento que incide na pá, graças ao desalinhamento, é:

$$\mathbf{V}_i = \begin{Bmatrix} V_0 \sin \delta \\ V_0 \cos \delta \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.6)$$

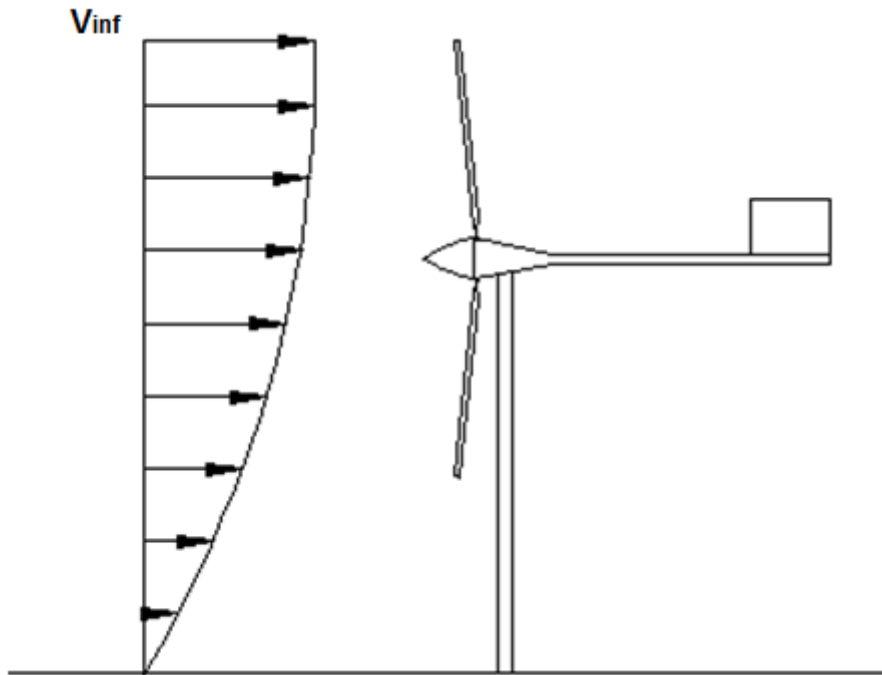


Figura 4.2 - Perfil vertical da velocidade do vento incidente

Inclinação do Eixo do rotor

A inclinação do eixo do rotor θ_c (vide item 2.1.2) faz com que as componentes do vento que atuam na estrutura sofram pequenas alterações, descritas abaixo na equação (4.7). Porém como esse é relativamente pequeno, no modelo matemático desse trabalho foi considerado como zero.

$$\mathbf{V}_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ V_0 \cos \theta_c \\ V_0 \sin \theta_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ V_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Velocidade absoluta do rotor

A velocidade absoluta do rotor é o vetor velocidade do ponto genérico p da pá, obtida derivando-se no tempo o vetor posição \mathbf{a} , definido pela equação (3.16) e expressa no sistema inercial por:

$$\dot{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Sendo as componentes do vetor expressas por:

$$\begin{aligned} \dot{x} = & \text{sen } \psi \Omega \sin \zeta r + \cos \psi \cos \zeta \dot{\zeta} r - \cos \psi \Omega E - \cos \psi \Omega \cos \beta \cos \zeta r + \\ & \text{sen } \psi \sin \beta \dot{\beta} \cos \zeta r + \text{sen } \psi \cos \beta \sin \zeta \dot{\zeta} r \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\dot{y} = -\dot{v} - \cos \beta \dot{\beta} \cos \zeta r + \sin \beta \sin \zeta \dot{\zeta} r \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} = & \cos \psi \Omega \sin \zeta r + \text{sen } \psi \cos \zeta \dot{\zeta} r + \text{sen } \psi \Omega E + \text{sen } \psi \Omega \cos \beta \cos \zeta r + \\ & \cos \psi \sin \beta \dot{\beta} \cos \zeta r + \cos \psi \sin \zeta \dot{\zeta} \cos \beta r \end{aligned} \quad (4.11)$$

4.1.2 Ângulo de ataque

O ângulo de ataque α é o ângulo formado entre a direção da velocidade relativa do vento e o eixo da corda da pá. Como já foi dito no item 2.1.3, existe um ângulo de torção, formado entre a direção da corda da pá e o plano de rotação. O ângulo de fluxo é o ângulo formado entre o plano vertical que contém o vetor velocidade relativa do vento e o plano de rotação. Dessa forma é possível determinar o ângulo de ataque (Figura 4.3) subtraindo o ângulo de torção do ângulo de fluxo.

$$\alpha = \phi - \theta \quad (4.12)$$

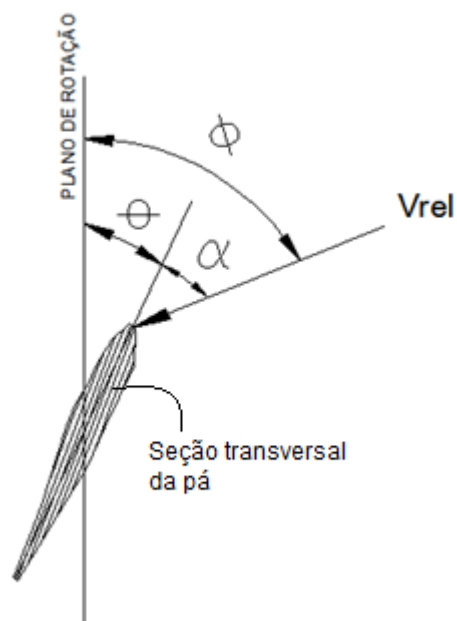


Figura 4.3 - Ângulo de ataque

O ângulo de fluxo relaciona o plano que contém o vetor velocidade relativa do vento e o plano de rotação, enquanto o ângulo de alinhamento relaciona o plano que contém o vetor velocidade incidente e o plano de rotação.

4.1.3 Coeficiente de Arrasto e Sustentação (C_D e C_L)

Os coeficientes de arrasto e sustentação representam as forças aerodinâmicas adimensionalizadas. O coeficiente de arrasto é utilizado para quantificar a força de resistência de uma superfície ao ar ou a um fluido qualquer. O formato da seção transversal e a rugosidade da superfície são fatores que influenciam no coeficiente de arrasto de um objeto.

O coeficiente de sustentação é utilizado para quantificar a capacidade de sustentação de um aerofólio qualquer quando exposto a velocidade do ar.

Para cada perfil aerodinâmico existe um gráfico relacionando o ângulo de ataque do vento com os coeficientes de arrasto e sustentação. O modelo NACA 4415, por exemplo, um dos mais utilizados nos aerogeradores modernos (HAU, 2005), apresenta as curvas ilustradas na Figura 4.4 (HAU, 2005):

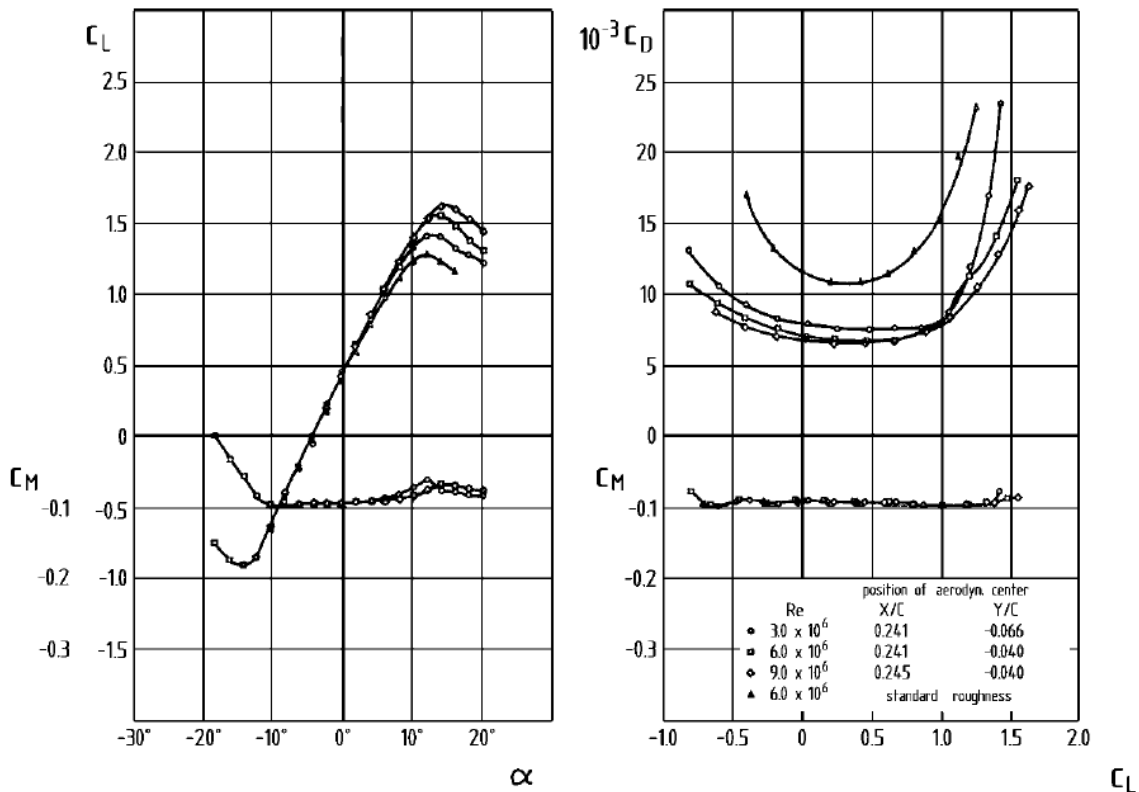


Figura 4.4 – Coeficientes do perfil modelo NACA 4415

4.1.4 Componentes das Forças

Numa análise dinâmica são importantes as forças responsáveis pela pressão aerodinâmica e pelo torque do rotor. A primeira (dT) é perpendicular ao plano de rotação e a segunda está contida no plano de rotação (dF), conforme apresentado na Figura 4.5 (FREITAS, 2008).

Como o vento relativo atua nas pás fazendo um ângulo ϕ com o plano de rotação, pode-se reescrever a resultante das forças de arrasto e sustentação em termos de suas componentes dT e dF como:

$$dF = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (4.13)$$

$$dT = -dL \cos \phi - dD \sin \phi \quad (4.14)$$

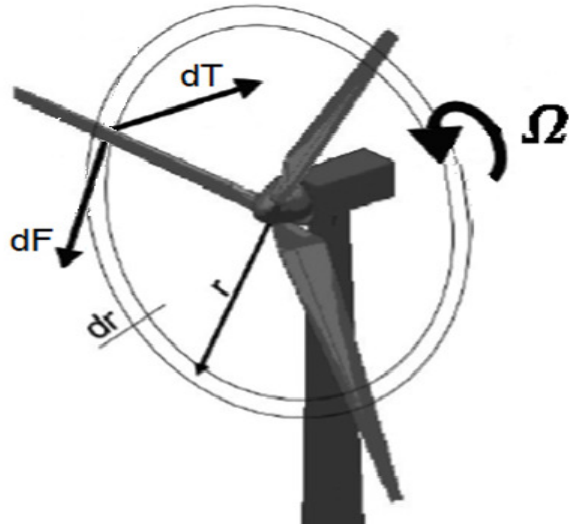


Figura 4.5 - Forças atuantes nas pás

4.2 Forças Generalizadas

A determinação das Forças Generalizadas foi feita a partir de algumas simplificações do modelo. Além das que já foram mencionadas no item 3.1, outras foram feitas e serão listadas a seguir:

- O ângulo de torção (θ) presente nas pás foi definido como nulo.
- Foi considerado que a velocidade do vento incidente é constante e igual ao valor na altura do centro do rotor.
- Os coeficientes de arrasto e sustentação foram determinados para um ângulo constante.

Determinadas as simplificações a serem usadas no modelo, foi possível determinar as forças generalizadas de cada grau de liberdade a partir das equações definidas no Capítulo 0.

O vetor velocidade do vento incidente, considerando o desalinhamento δ , a inclinação da torre e a variação da velocidade do vento com a altura, pode ser definido por:

$$\mathbf{V}_i = \begin{Bmatrix} V_Z \sin \delta \\ V_Z \cos \delta \cos \theta_c \\ V_Z \sin \theta_c \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

Sendo $V_z = V_0 \left(\frac{z}{H}\right)^p$, a velocidade do vento em uma altura z .

Porém, com as simplificações do modelo, o vetor velocidade do vento incidente resume-se ao vetor definido na equação (4.7).

A velocidade absoluta do rotor é definida pela derivada do vetor posição \mathbf{a} (Equação (3.16)) em relação ao tempo e pode ser escrita pelas expressões (4.9), (4.10) e (4.11).

O vetor velocidade de relativa do vento \mathbf{V}_{rel} escrito no sistema inercial de coordenadas pode ser obtido pela diferença da velocidade do vento incidente e a velocidade absoluta do rotor. Para representar no eixo de coordenadas girantes é necessário multiplicá-lo pelas transpostas das matrizes de rotação, como segue na equação:

$$\mathbf{V}_{rel} = [\mathbf{R}_\zeta^t \mathbf{R}_\beta^t \mathbf{R}_\psi^t] \{\mathbf{V}_i - \dot{\mathbf{a}}\} \quad (4.16)$$

O vetor velocidade relativa do vento pode ser escrito em função de suas componentes: contida no plano paralelo ao plano de rotação (V_t), perpendicular ao plano de rotação (V_p) e longitudinal à pá (V_l). Dessa maneira o vetor \mathbf{V}_{rel} , definido na equação (4.16), também pode ser escrito em função de suas componentes no sistema referencial girante, por:

$$\mathbf{V}_{rel} = \begin{Bmatrix} V_t \\ V_p \\ V_l \end{Bmatrix} \quad (4.17)$$

Para a análise das forças de sustentação e de arrasto interessam principalmente as componentes V_t e V_p , que definem o vetor \mathbf{W} , representado na Figura 4.6 e cuja intensidade é definida na equação (4.18):

$$W = \sqrt{V_t^2 + V_p^2} \quad (4.18)$$

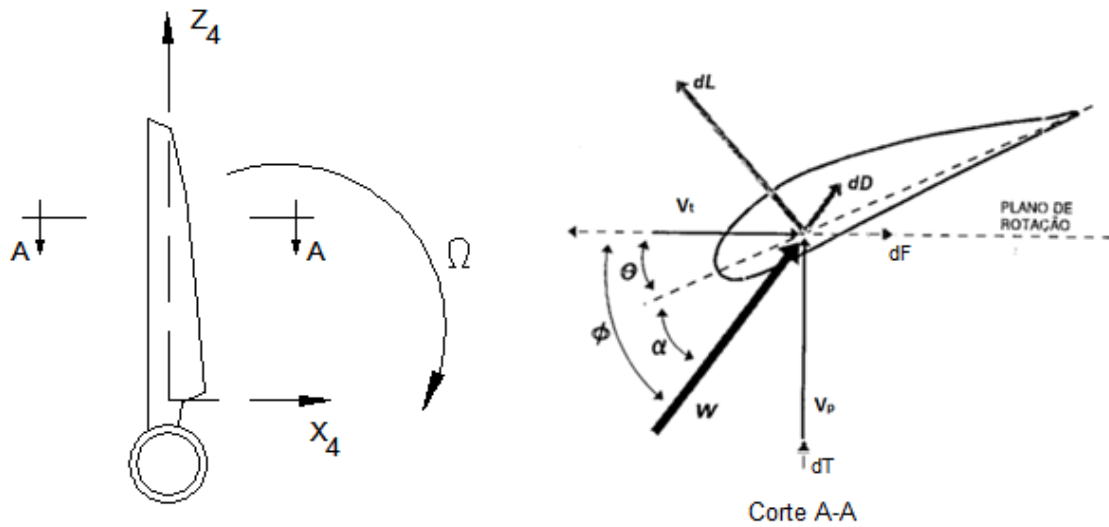


Figura 4.6 - Elemento da pá

Portanto é possível reescrever as forças de sustentação e de arrasto (equação (4.1) e equação (4.2)) pelas seguintes equações:

$$dL = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) W^2 dr \quad (4.19)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) W^2 dr \quad (4.20)$$

A Figura 4.6 demonstra que o ângulo de fluxo (ϕ) pode ser representado pela relação da velocidade relativa do vento e suas componentes V_t e V_p :

$$\sin \phi = \frac{V_p}{W} \quad \text{e} \quad \cos \phi = \frac{V_t}{W} \quad (4.21)$$

Substituindo essas relações na equação (4.13) e na equação (4.14), é possível obter as expressões das forças responsáveis pelo torque (dF) e pressão aerodinâmica nas pás (dT)

$$dF = + dL \frac{V_p}{W} - dD \frac{V_t}{W} \quad (4.22)$$

$$dT = - dL \frac{V_t}{W} - dD \frac{V_p}{W} \quad (4.23)$$

Substituindo as equações (4.19) e (4.20) nas equações (4.22) e (4.23), respectivamente, obtêm-se as seguintes expressões:

$$dF = + \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) W V_p dr - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) W V_t dr \quad (4.24)$$

$$dT = - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) W V_t dr - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) W V_p dr \quad (4.25)$$

Como o ângulo de ataque e o ângulo de fluxo são muito pequenos, é possível considerar que a componente transversal (V_t) é muito maior que a componente perpendicular (V_p). Isso implica que a relação das suas potências é ainda maior e conseqüentemente W se aproxima muito da componente V_t . Considerando essa aproximação $W \cong V_t$ é possível reescrever a componente da força aerodinâmica responsável pelo torque das pás e a pressão aerodinâmica pelas equações abaixo:

$$dF = + \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) V_t V_p dr - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) V_t^2 dr \quad (4.26)$$

$$dT = - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) V_t^2 dr - \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) V_t V_p dr \quad (4.27)$$

Definidas as equações das forças em relação às componentes da velocidade relativa do vento, através da combinação da equação (4.16) com a equação (4.17), são determinados os valores de cada uma das componentes do vetor velocidade relativa, escritos da seguinte forma:

$$V_t = -\cos \beta \Omega r - \cos \zeta \Omega E - \dot{\zeta} r + \sin \beta \sin \zeta V_z + \sin \beta \sin \zeta \dot{v} \quad (4.28)$$

$$V_p = -\cos \beta V_z - \cos \beta \dot{v} - \sin \beta \sin \beta \Omega r - \dot{\beta} \cos \zeta r \quad (4.29)$$

4.2.1 Força Generalizada em Beta

O grau de liberdade β é referente à rotação da pá dentro do plano de rotação da turbina. Por se tratar de uma rotação a força generalizada em relação a ele (Q_β) é um momento, ou seja, para defini-la é necessário relacionar a pressão aerodinâmica de cada elemento infinitesimal da pá, com sua distância ao eixo da nacele.

$$Q_\beta = \int_0^R dT \cdot r \, dr \quad (4.30)$$

O termo da integral foi determinado através de uma simplificação, que considera os ângulos β e ζ iguais a zero, por se tratarem de ângulos muito pequenos. Dessa forma é possível escrever:

$$dT = -\frac{1}{2} \rho c (\Omega E + \dot{\zeta} r + \Omega r) (C_L \Omega E + C_L \dot{\zeta} r + C_L \Omega r + C_D V_0 + C_D \dot{v} + C_D \dot{\beta} r) \quad (4.31)$$

Para determinar a força generalizada em Beta, é necessário substituir a equação (4.31) na equação (4.30). Sobre o resultado, foram descartados todos os termos que apresentaram potências da excentricidade E. Por se tratar de um valor muito baixo em relação ao comprimento da pá, suas potências são valores ainda menores que podem ser desconsiderados sem influenciar o resultado de maneira significativa. O resultado da integral é:

$$Q_\beta = -\frac{1}{24} \rho c R^2 [C_D (+4\Omega R \dot{v} + 3\Omega R^2 \dot{\beta} + 3R^2 \dot{\beta} \dot{\zeta} + 4\Omega V_z R + 6\Omega V_z E + 4\Omega \dot{\beta} R E + 4\dot{\zeta} \dot{v} R + 4R\Omega V_z + 6\Omega \dot{v} E) - C_L (+3\dot{\zeta}^2 R^2 + 8\dot{\zeta} \Omega R E + 8\Omega^2 R E + 6\dot{\zeta} \Omega R^2 + 3\Omega^2 R^2)] \quad (4.32)$$

Amortecimento estrutural em beta

Além do amortecimento aerodinâmico, presente na equação (4.32), as pás apresentam um amortecimento estrutural, que geralmente é considerado proporcional a massa ou a rigidez da estrutura e é representado pelo coeficiente de amortecimento c_β , definida pela equação (4.33):

$$c_\beta = 2\xi_\beta I_B \omega_\beta \quad (4.33)$$

Onde ξ é a taxa de amortecimento da pá em relação ao grau de liberdade beta; I_B é o momento de inércia da pá e ω_β é a frequência natural da pá.

4.2.2 Força Generalizada em Zeta

A força generalizada em relação ζ (Q_ζ) também é um momento e para defini-la relaciona-se a força de torque de cada elemento infinitesimal da pá, com sua distância ao eixo da nacele.

$$Q_\zeta = \int_0^R dF \cdot r \, dr \quad (4.34)$$

O termo dessa integral foi determinado através das mesmas simplificações, ou seja, igualando ângulos β e ζ a zero. Dessa forma, é possível escrever:

$$dF = -\frac{1}{2}\rho c(+\Omega E + \dot{\zeta}r + \Omega r)(-C_L V_Z - C_L \dot{v} - C_L \dot{\beta}r + C_D \Omega E + C_D \dot{\zeta}r + C_D \Omega r) \quad (4.35)$$

Para determinar a Força Generalizada em Zeta, é necessário substituir a equação (4.35) na equação (4.34) e fazer o descarte das potências das excentricidades, mesma simplificação utilizada para determinação da força generalizada do grau de liberdade beta. Dessa forma, o resultado da integral é:

$$Q_\zeta = -\frac{1}{24}\rho c R^2 [C_D(+8\dot{\zeta}\Omega RE + 8\Omega^2 RE + 6\dot{\zeta}\Omega R^2 + 3\Omega^2 R^2 + 3\dot{\zeta}^2 R^2) + C_L(-4\Omega\dot{\beta}RE - 3\Omega\dot{\beta}R^2 - 3\dot{\beta}\dot{\zeta}R^2 - 4\dot{\zeta}V_Z R - 4\dot{\zeta}\dot{v}R - 4\Omega V_Z R - 6\Omega E V_Z - 4\Omega\dot{v}R)] \quad (4.36)$$

Amortecimento estrutural em zeta

A equação (4.37) apresenta o coeficiente de amortecimento estrutural c_ζ , definido pela equação:

$$c_\zeta = 2\xi_\zeta I_B \omega_\zeta \quad (4.37)$$

Onde ξ_ζ é a taxa de amortecimento da pá em relação ao grau de liberdade zeta; I_B e ω_ζ são, respectivamente, o momento de inércia e a frequência natural da pá referente ao movimento dentro do plano de rotação.

4.2.3 Força Generalizada em v

O grau de liberdade v representa o movimento de translação da torre. Dessa forma, a força generalizada (Q_v) desse grau de liberdade não é momento e sim uma força. Essa força é determinada pela soma da resultante da pressão aerodinâmica nas três pás transferidas para estrutura (Q_p) com a força do vento que atua diretamente na torre (Q_a), conforme a equação

$$Q_v = Q_p + Q_a \quad (4.38)$$

Como o grau de liberdade é referente à translação da torre na direção do eixo perpendicular ao plano de rotação das pás, o efeito das forças de torque das pás não interfere nessa força generalizada.

Força devido à pressão das pás

$$Q_p = \int_0^R dT \, dr \quad (4.39)$$

O termo dT da equação (4.39) está escrito na equação (4.31). Calculando a integral definida na equação (4.39) e utilizando as mesmas simplificações consideradas para os outros dois graus de liberdade, é possível determinar a força na torre causada por uma das pás.

$$Q_p = -\frac{1}{12} \rho c R [C_D (+3\dot{\zeta} V_Z R + 6\Omega E \dot{v} + 3\Omega R \dot{v} + 2R^2 \Omega \dot{\beta} + 3RE \Omega \dot{\beta} + 2R^2 \dot{\beta} \dot{\zeta} + 3R \dot{\zeta} \dot{v} + 3R \Omega V_Z + 6\Omega E V_Z) + C_L (4R^2 \Omega \dot{\zeta} + 6R \Omega^2 E + 6R \Omega E \dot{\zeta} + 2R^2 \dot{\zeta}^2 + 2R^2 \Omega^2)] \quad (4.40)$$

Como as pás têm as mesmas características, a reação total na torre equivale a um somatório das contribuições das três pás, obtida na equação (4.40).

Forças Aerodinâmicas na Torre

Além das parcelas de força causadas pelas pás na estrutura, também há uma provocada pela ação do vento direto na estrutura. A determinação dessa força é feita através de uma relação que leva em consideração a área da estrutura que está exposta ao vento; o coeficiente de arrasto da mesma; velocidade do vento, tanto a média como a flutuação; além da massa específica do ar. Como a velocidade flutuante se altera ao longo do tempo, essa força também sofre uma variação. Portanto podemos escrever:

$$F(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot Ca \cdot U^2(t) \quad (4.41)$$

Sendo: $U(t) = (\bar{U} + u)$

ρ é a massa específica do ar;

A é a área de exposição ao vento total da estrutura;

Ca é o coeficiente de arrasto;

\bar{U} é a velocidade média do vento;

u é a velocidade flutuante do vento.

Para a torre discretizada em elementos de pórtico plano (Figura 4.7) calcula-se o vetor de forças nodais a partir da equação (4.41), considerando a variação da velocidade média do vento ao longo da altura de acordo com a lei potencial (vide equação (4.5)). Para torres de pequeno porte a velocidade flutuante pode ser considerada com correlação total. A Figura 4.7 também ilustra a forma modal da estrutura, representada pelo autovetor ϕ . Para determinar a força generalizada do grau de liberdade v devido às forças aerodinâmicas na torre (Q_a) é necessário fazer o produto do vetor ϕ^T pelo vetor de forças nodais \mathbf{F}_j , que representa a modo de vibrar da estrutura, conforme apresentado na equação (4.42):

$$Q_a = \phi^T \mathbf{F}_j \quad (4.42)$$

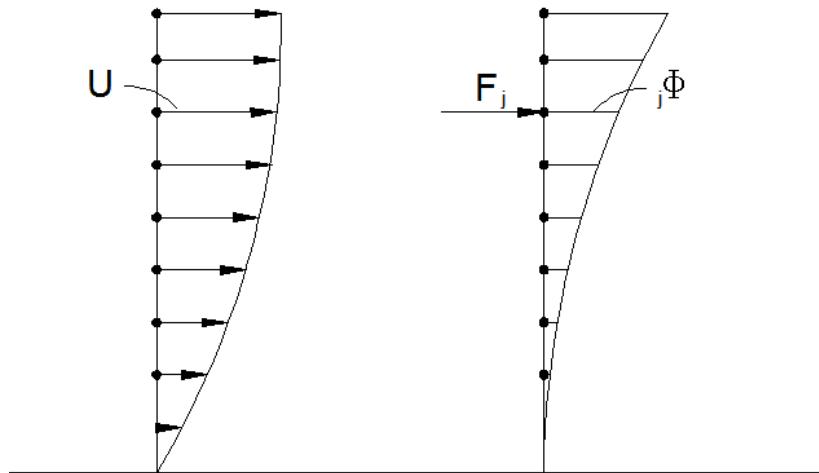


Figura 4.7 - Representação da forma modal

Amortecimento estrutural da torre

A equação (4.43) apresenta o coeficiente de amortecimento estrutural c_T da torre, definida pela equação:

$$c_T = 2\xi_T m_M \omega_T \quad (4.43)$$

Onde ξ_T é a taxa de amortecimento da torre; m_M e ω_T são respectivamente a massa modal e a frequência natural da estrutura, referentes ao grau de liberdade v .

5 Análise dinâmica de aerogerador

A análise dinâmica de um aerogerador foi feita através dos resultados do programa de computador desenvolvido ao longo desse trabalho. Para validação do mesmo foram feitas comparações desses resultados teórico-numéricos com os experimentais (BATTISTA, 2009) obtidos em ensaios realizados em um aerogerador de pequeno porte (Figura 5.1) instalado na cidade de Cotenda, no Paraná. A seguir serão apresentadas as características da estrutura e do carregamento e em seguida os resultados experimentais e teóricos.



Figura 5.1 - Torre no Paraná [BATTISTA, 2009]

5.1 Estrutura

O aerogerador analisado é formado por uma torre tubular metálica, de base rotulada, estaiada, com 15 metros de altura, diâmetro externo de 165 mm e 5,5 mm de espessura da parede. Quatro conjuntos de três estais, distribuídos em dois planos perpendiculares estabilizam a torre. Em cada conjunto há estais fixados na torre a 3, 9 e 12 metros de altura em relação à base e no solo a dez metros de distância do eixo da torre (Figura 5.2). Os estais são compostos por cabos de aço, sendo os do nível mais baixo de 4,7mm de diâmetro e os dos outros dois níveis de 6,35mm de diâmetro. Eles apresentam pré-tensões da ordem de 20% da tensão de ruptura dos estais, instaladas manualmente por meio de dispositivos mecânicos.

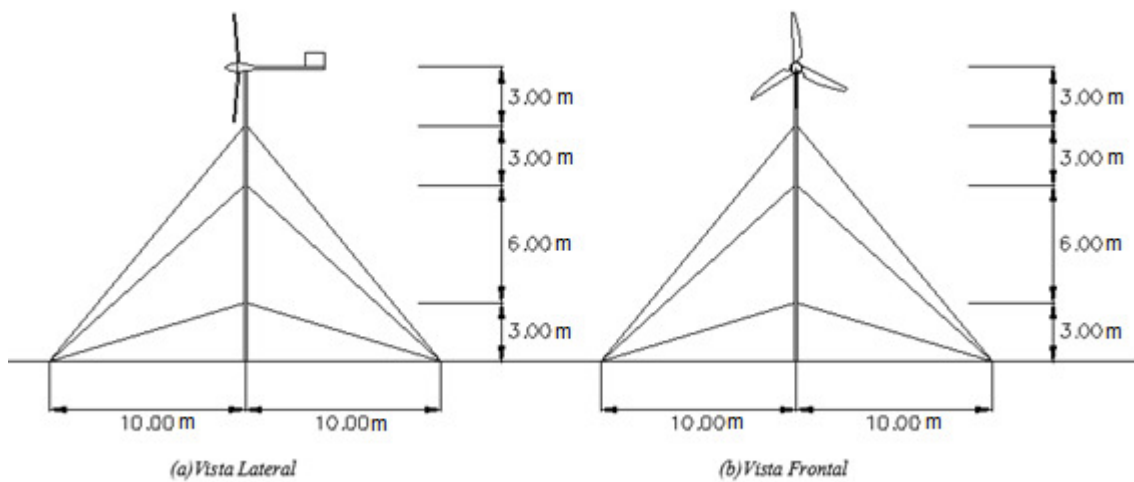


Figura 5.2 - Ilustração da Torre

A turbina instalada na torre é composta por três pás com 2,57m de raio e 18 cm de excentricidade em relação ao cubo da nacelle, formando um diâmetro de 5,55m conforme mostrado na Figura 5.3. A corda da pá foi considerada como constante com 0,1984m, baseado no modelo apresentado por BATTISTA (2009). A uma velocidade de vento de 12 m/s a velocidade de rotação do rotor atinge 240 rpm. A turbina apresenta controle de velocidade, que faz com que ela trave automaticamente e pare de funcionar sob ação de vento com velocidades altas, evitando problemas estruturais. A massa do conjunto da nacelle e da hélice é igual a 160kg. (ENERSUD, 2012)



Figura 5.3 – Turbina [ENERSUD, 2012]

A Tabela 5.1 apresenta as principais características do aerogerador analisado.

Tabela 5.1 - Características do aerogerador

Altura da torre	15 m
Diâmetro da torre	0.165 m
Espessura da parede	5.5 mm
Número de pás	3
Diâmetro do Rotor	5.55 m
Velocidade Nominal	12 m/s
Cor da pá	0.2 m
Rotação a 12 m/s	240 rpm
Potência a 12 m/s	6000 Watt
Massa do conjunto Nacele/pás	160 kg

De acordo com a Tabela 5.1, a velocidade angular das pás sob ação de um vento de 12m/s é de 240 rpm, ou 25 rad/s. Sabendo que o raio do aerogerador é de 2.775m e substituindo esses valores na equação (2.1) é possível determinar a relação velocidade de ponta da pá do aerogerador analisado, conforme apresentado na equação (5.1):

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_z} = 5,38 \quad (5.1)$$

O valor definido encontra-se próximo ao valor sugerido por HAU (2005).

5.2 Resultados Experimentais

Foram realizados dois tipos de ensaios experimentais do aerogerador. Inicialmente foram realizados ensaios de vibrações livres das pás (BATTISTA, 2009) no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ a partir dos quais foram obtidas as frequências naturais e as taxas de amortecimento das pás utilizadas nas equações de movimento e força generalizadas. Numa segunda etapa foram realizados ensaios de vibração livre e sob ação do vento da turbina completa já instalada. Estes últimos ensaios forneceram as frequências naturais da torre utilizadas como dados na solução da equação de movimento da torre (Equação (3.37)), bem como valores de aceleração no topo da torre sob ação do vento que foram utilizados para calibrar o modelo teórico numérico desenvolvido.

5.2.1 Vibrações Livres das Pás

No laboratório (Figura 5.4), as pás foram submetidas a impactos verticais e os sinais dos acelerômetros mostrados na Figura 5.5 foram adquiridos utilizando um *software* especializado. Desta forma, foram determinadas as frequências naturais das pás, além da identificação das suas formas modais de vibração e taxas de amortecimento modal. Aplicando-se impactos nas pás em duas direções: paralela e perpendicular à corda da pá, associados respectivamente aos movimentos de *lag* e *flap*.

A seguir serão apresentados os sinais experimentais para determinação da frequência natural do movimento flap. À medida que a pá sofre impactos, surgem os picos de aceleração e instantaneamente uma desaceleração devida ao amortecimento da pá. Essas acelerações foram obtidas através de cinco conjuntos de acelerômetros (Figura 5.5) instalados na pá.

Os sinais de aceleração da pá obtidos pelos acelerômetros foram enviados para um condicionador de sinais e armazenados em microcomputadores. Dessa forma, foi possível a utilização de *softwares* especializados, que através do algoritmo da Transformação Rápida de Fourier, apresentaram os auto-espectros das respostas em frequência, representados na Figura 5.6.



Figura 5.4 - Ensaio no Laboratório [BATTISTA, 2009]

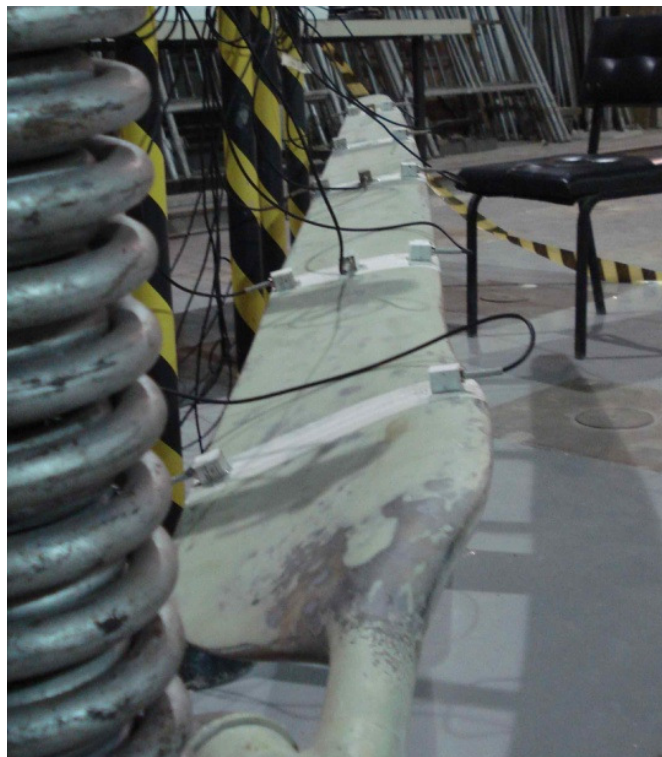


Figura 5.5 - Acelerômetros na pá [BATTISTA, 2009]

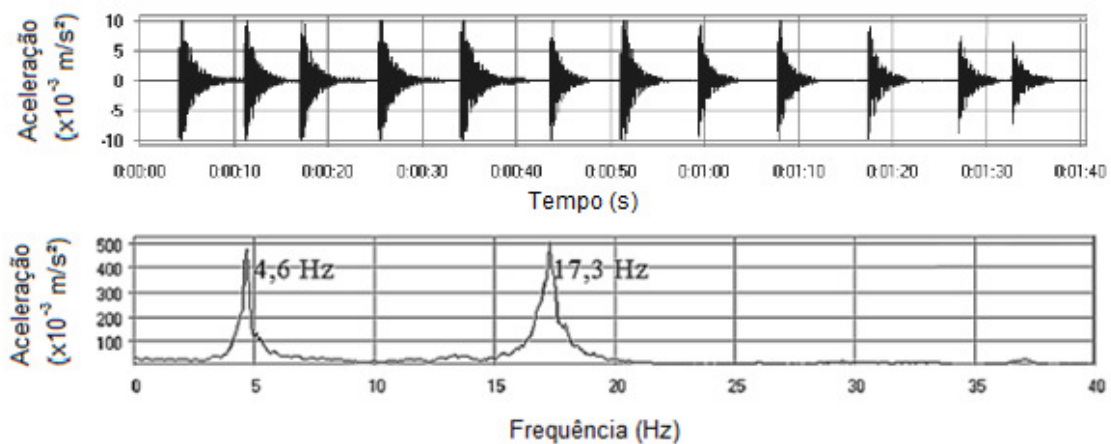


Figura 5.6 - Auto-espectros da aceleração [BATTISTA, 2009]

Nota-se que os cinco conjuntos de acelerômetros apresentam picos próximos a 4,6 Hz e 17,3 Hz, que podem ser consideradas a primeira e segunda frequência natural da pá do movimento Flap.

O mesmo procedimento foi feito para obtenção das frequências naturais da pá do movimento lag. Os resultados apresentaram os picos da primeira frequência próximos aos valores de 11,9 Hz e 35,6 Hz.

Outro resultado obtido no ensaio foi o valor de amortecimento das pás em cada um de seus movimentos, flap e lag. A Tabela 5.2 mostra que o amortecimento na direção perpendicular à corda da pá é menor do que o da direção paralela.

Tabela 5.2 - Propriedades dinâmicas dos primeiros modos de vibração da pá

[BATTISTA, 2009]

	Frequência Natural (Hz)		Taxa de Amortecimento (%)
	1º Modo	2º Modo	
Flap	4,6	17,3	1,8
Lag	11,9	35,6	2,2

No modelo matemático, foram utilizados o primeiro e segundo modos de vibrar na direção perpendicular à corda e o primeiro na direção paralela à corda da pá. Não foram encontrados no ensaio modos de vibrar e frequências naturais relativas ao movimento de torção da pá.

5.2.2 Ensaio de Vibração Livre da Torre

O ensaio de vibração livre da torre foi feito em campo, seguindo o mesmo método utilizado no ensaio das pás, o de produzir impactos na estrutura e medir a resposta. Foram instalados acelerômetros no topo da estrutura em direções ortogonais (N-S e L-O) que transmitiam as respostas para o microcomputador. Não foi registrada a posição das direções N-S e L-O dos acelerômetros em relação aos planos de estaiamento.

A Figura 5.7 apresenta o resultado de aceleração ao longo do tempo de ensaio, com alguns picos que representam os impactos provocados na estrutura.

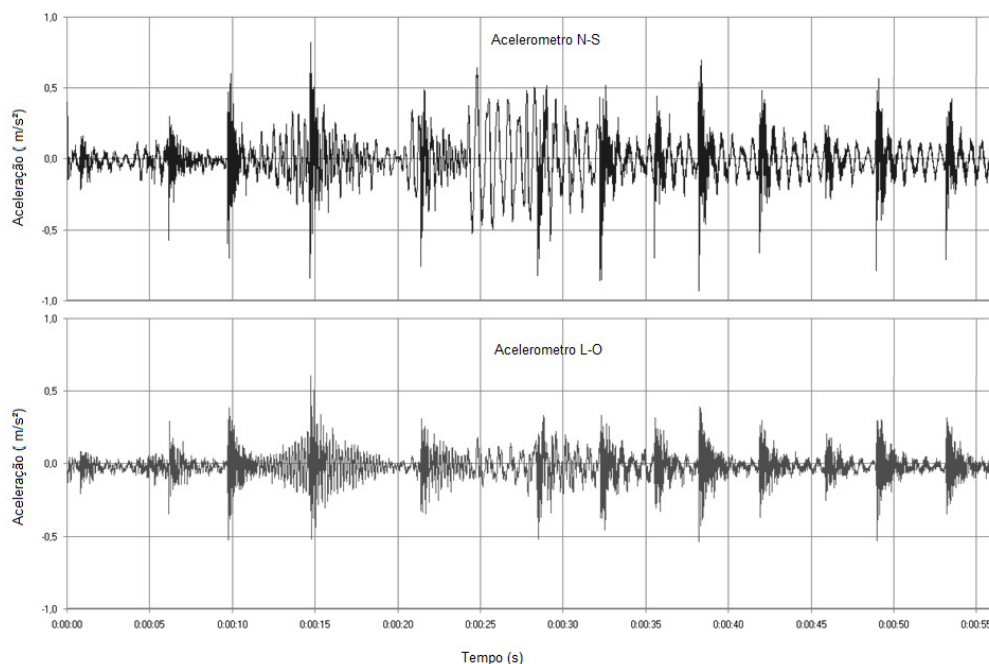


Figura 5.7 - Aceleração x Tempo - Vibrações Livres da Torre [BATTISTA, 2009]

A partir desses sinais foi possível gerar o autoespectro da aceleração da estrutura e obter as suas frequências naturais, como está mostrado na Figura 5.8.

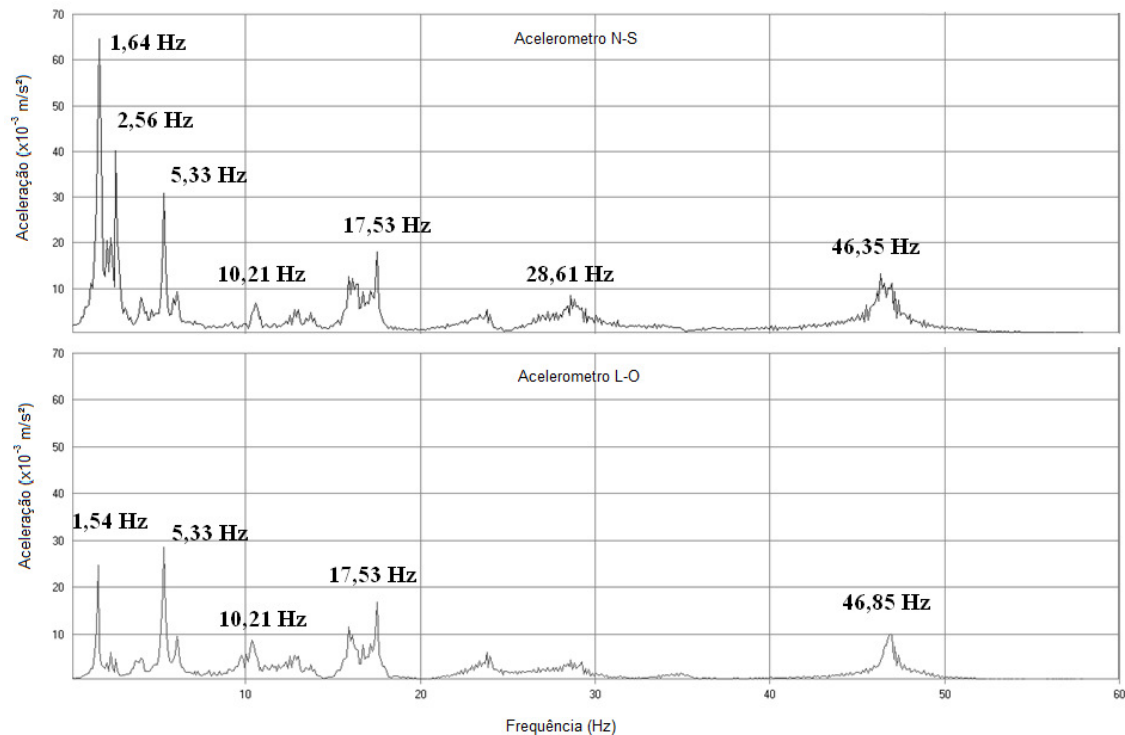


Figura 5.8 - Autoespectro da aceleração [BATTISTA, 2009]

Através dos resultados e de um software especializado foi possível determinar a taxa de amortecimento da estrutura de aproximadamente 1% para o primeiro modo.

5.2.3 Estrutura sob ação do vento

A seguir serão apresentados os resultados experimentais obtidos para a torre instalada e sob ação do vento. Para a obtenção da aceleração ao longo do tempo foram utilizados os mesmos acelerômetros instalados no ensaio de vibração livre. As medições de velocidade e direção do vento foram feitas por um anemômetro instalado em um mastro de três metros de altura a uma distância aproximada de 50m em relação à torre.

A Figura 5.9 apresenta as respostas de aceleração da estrutura e direção e velocidade do vento. Pode-se observar que a velocidade do vento durante as medições experimentais apresentou valores muito baixos, com uma média em torno de 2,5 km/h (0,7 m/s), bem abaixo da velocidade mínima para início de operação do aerogerador, igual a 2,2 m/s. Pode-se observar também que a direção do vento não apresenta grande variação, mantendo-se em torno de 180°.

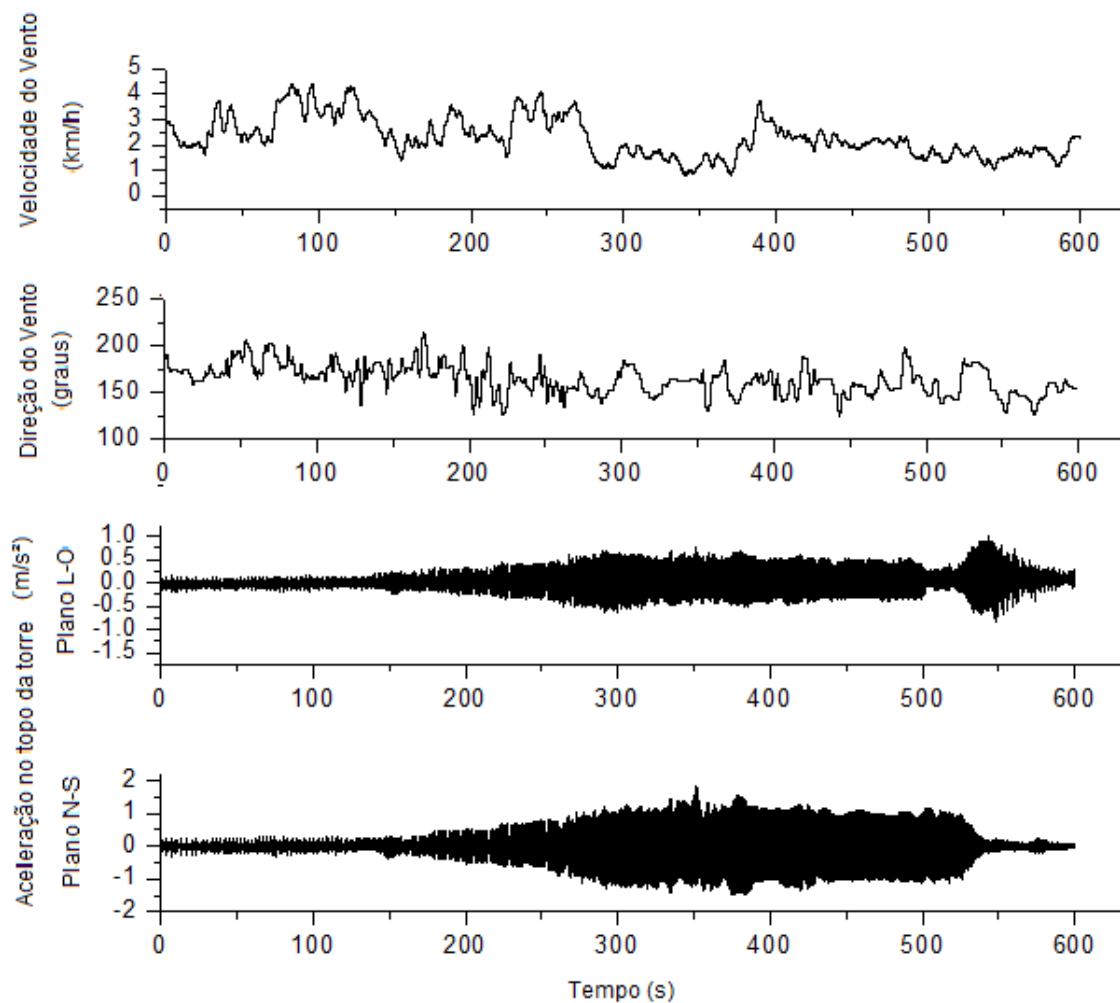


Figura 5.9 - Resposta da torre no tempo sob ação do vento [BATTISTA, 2009]

A Figura 5.10 apresenta o autoespectro da aceleração no topo da torre para estrutura sob ação do vento. Observa-se neste espectro um pico em frequência próxima à do primeiro modo de vibração da torre (1,74 Hz) e também uma grande concentração de energia entre as frequências de 10Hz e 17Hz.

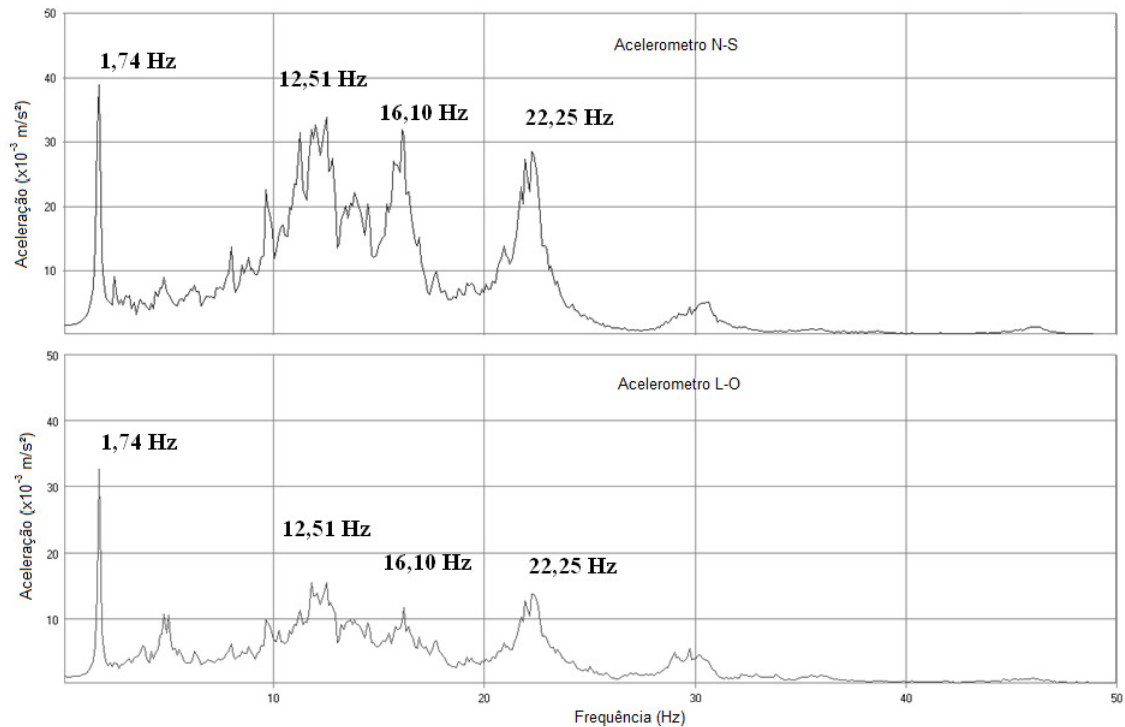


Figura 5.10 - Autoespectro da aceleração no topo da torre [BATTISTA, 2009]

5.3 Modelo numérico-computacional da estrutura

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos em modelos numérico-computacionais, para obtenção dos resultados de vibração livre da torre e da resposta no tempo e do autoespectro da aceleração da estrutura sob ação do vento.

5.3.1 Modelo da estrutura

Para a obtenção dos resultados de vibrações livres, foi feito um modelo da estrutura no programa de análise estrutural (SAP2000). O modelo discretizado em elementos finitos utilizado para representar a estrutura é composto por elementos de pórtico espacial representando a torre tubular, os elementos de treliça espacial representando os estais e uma massa de 160kg concentrada no topo, representando a nacelle e as pás da turbina.

Os estais foram pré-tracionados com aproximadamente 20% da tensão de ruptura dos estais, que representam aquelas instaladas manualmente por dispositivos mecânicos. A Figura 5.11 apresenta o modelo numérico da torre estaiada e do aerogerador utilizado:

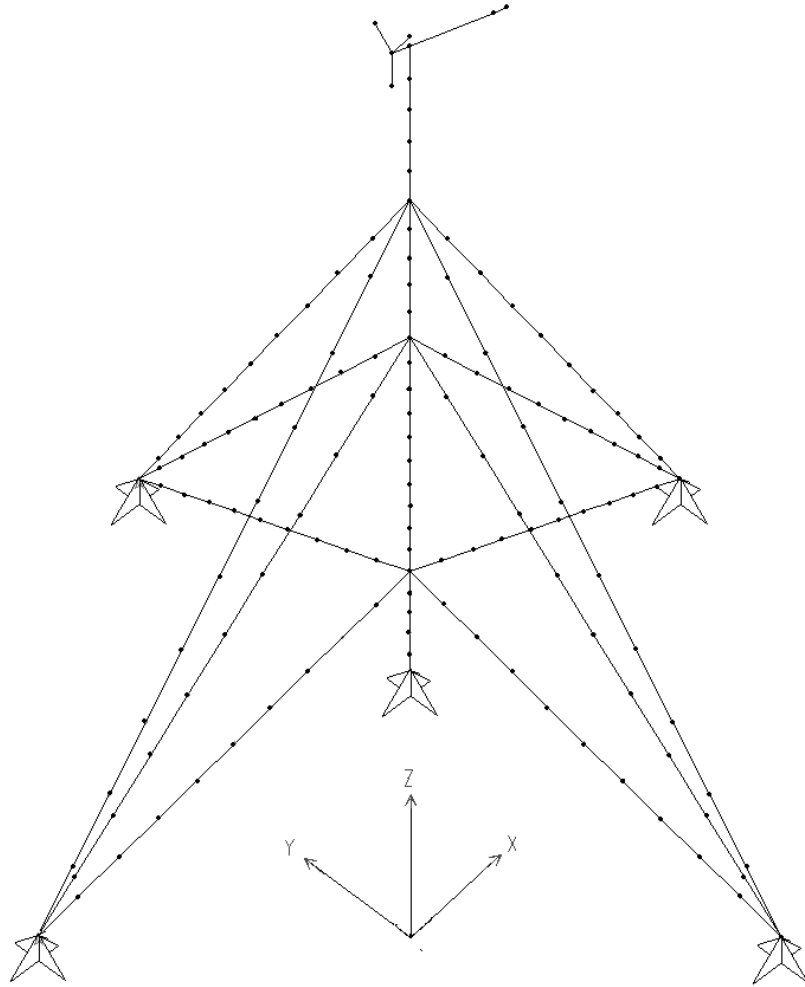


Figura 5.11 – Modelo Numérico da Estrutura

5.3.2 Resultados de Vibrações Livres

A resposta modal do modelo numérico apresenta os modos de vibrar da estrutura e suas frequências naturais. A Figura 5.12 apresenta os quatro primeiros modos de vibrar da estrutura e suas frequências naturais associadas.

Optou-se por trabalhar com os quatro primeiros modos de vibração da torre devido a sua quarta frequência natural apresentar valor próximo ao da segunda frequência natural da pá (17 Hz).

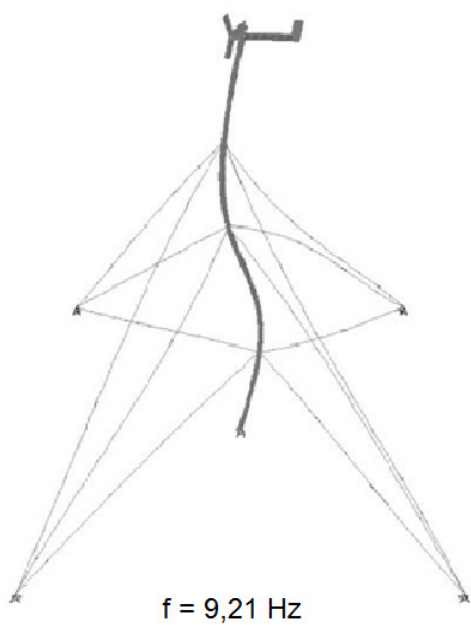
Primeiro Modo de Vibrar



Segundo Modo de Vibrar



Terceiro Modo de Vibrar



Quarto Modo de Vibrar

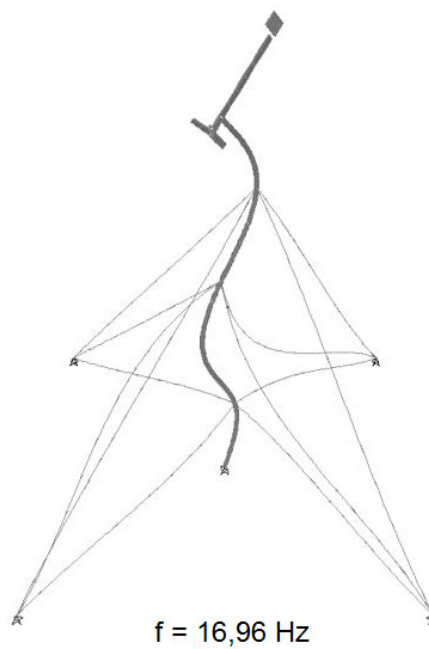


Figura 5.12 – Quatro primeiros modos de vibrar da estrutura

5.3.3 Comparação Teórico-Experimental

A Tabela 5.3 apresenta a correlação dos resultados teóricos obtidos pelo modelo numérico computacional e os experimentais, para as quatro primeiras frequências de vibração livre do aerogerador.

Tabela 5.3 - Correlação dos resultados teóricos e experimentais

	Teórico (Hz)	Experimental (Hz)	Teórico/Experimental
1º Modo	1,76	1,64	1,07
2º Modo	5,72	5,33	1,07
3º Modo	9,21	10,21	0,90
4º Modo	16,96	17,53	0,97

5.4 Modelo analítico do sistema torre-aerogerador sob ação do vento

Utilizando o modelo analítico descrito nos capítulos 3 e 0, foi desenvolvido um programa ao longo desse trabalho, utilizando a linguagem de programação (FORTRAN), para obtenção de resultados dinâmicos da estrutura sob ação do vento. Definidos os dados de entrada (características da estrutura e do vento), o programa utiliza o método de Runge Kutta. (PRESS, TEUKOLSKY, *et al.*, 1992) para resolução de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem. Dessa forma, é possível determinar os deslocamentos, velocidades e acelerações dos graus de liberdades considerados em cada instante de tempo.

5.4.1 Dados do Modelo

Para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação das pás, é necessário utilizar o gráfico referente ao aerofólio das pás. De acordo com ENERSUD (2012), as pás do modelo estudado, apresentam aerofólios do tipo MH. Eles variam entre os modelos MH102 a MH108 ao longo do comprimento da pá. Como no presente modelo, as pás foram definidas com seção constante, os coeficientes de arrasto e sustentação foram obtidos dos gráficos da Figura 5.13 (HEPPERLE, 2008) para o perfil MH102:

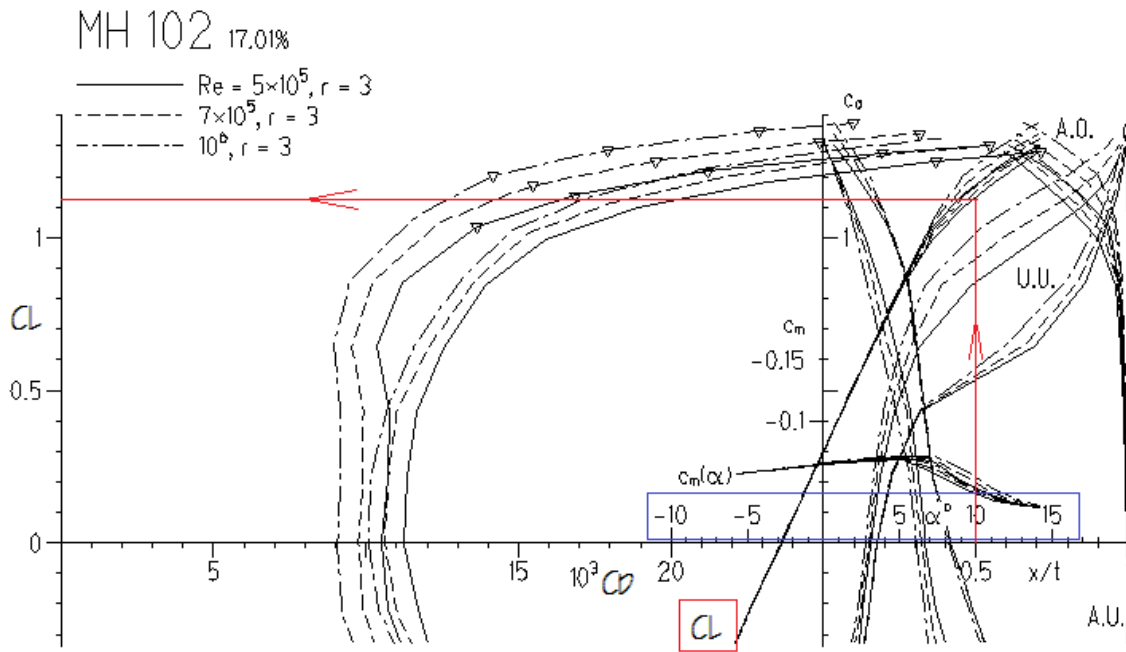


Figura 5.13 - Aerofólio MH 102 - C_L [HEPPERLE, 2008]

Para determinação dos coeficientes, primeiro é definido um ângulo de ataque, escolhido nesse trabalho igual a 10° , conforme WENZEL (2009) e que tem seus valores representados acima do eixo horizontal (destacado com um retângulo na Figura 5.13). A partir desse ângulo é traçada uma reta na vertical até coincidir com a curva do coeficiente de sustentação C_L (destacada com um quadrado na Figura 5.13). A partir da interseção da curva do coeficiente de sustentação e da reta vertical, traça-se uma reta horizontal para esquerda obtendo o valor do coeficiente $C_L=1,12$.

Definido o coeficiente de sustentação, através de um procedimento análogo, conforme apresentado na Figura 5.14 (HEPPERLE, 2008) é possível definir o coeficiente de arrasto $C_D=0.01288$.

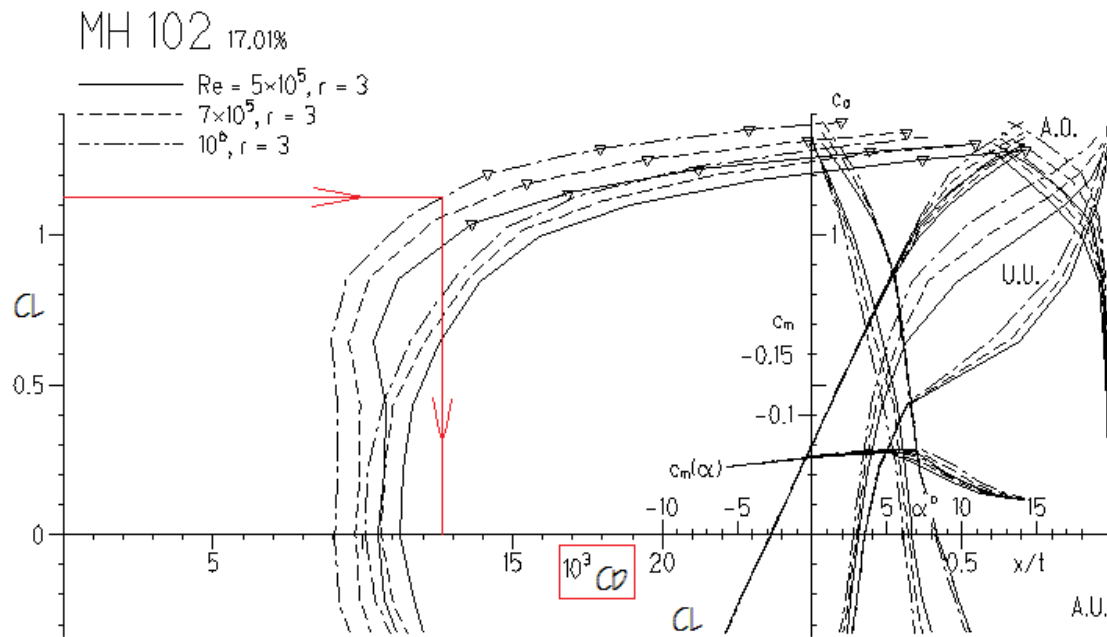


Figura 5.14 – Aerofólio MH 102 - C_D [HEPPERLE, 2008]

As demais características utilizadas no modelo analítico estão apresentadas na Tabela 5.4, Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

Tabela 5.4 - Características das pás

Raio da pá (R)	2.57m
Excentricidade da pá (E)	0.18 m
Corda da pá (c)	0.1984 m
Frequência Natural β (1° Modo)	4,6 Hz
Frequência Natural β (2° Modo)	17,3 Hz
Frequência Natural ζ (1° Modo)	11,9 Hz
Frequência Natural ζ (2° Modo)	35,6 Hz
Taxa de amortecimento (ξ_β)	0.018
Taxa de amortecimento (ξ_ζ)	0.022
Coefficiente de Arrasto	0.01288
Coefficiente de Sustentação	1.12

Tabela 5.5 - Características da Estrutura

Altura (h)	15 m
Diâmetro externo da torre (d)	0.165m
Coefficiente de arrasto (Ca)	1.2
Frequência Natural (1° Modo)	1.74 Hz
Frequência Natural (2° Modo)	5,72 Hz
Frequência Natural (3° Modo)	9,21 Hz
Frequência Natural (4° Modo)	16,9 Hz
Massa Modal (1° Modo)	248.35 kg
Massa Modal (2° Modo)	228.93 kg
Massa Modal (3° Modo)	236.22 kg
Massa Modal (4° Modo)	118.05 kg
Taxa de amortecimento	0.01

Tabela 5.6 - Parâmetros Considerados

Massa específica do ar	1.225 kg/m ³
Relação Velocidade de Ponta	5.48
Categoria de Rugosidade	II

5.4.2 Resultado para velocidade de vento variável no tempo

É possível perceber na Figura 5.9 que a velocidade de vento era muito pequena durante as medições experimentais, abaixo da velocidade considerada necessária para produção de energia ($v_{\min}=2,2\text{m/s}$). Porém, para validação dos resultados teóricos de aceleração, essa análise é válida.

Para a determinação da velocidade do vento no modelo teórico, foi feita a correção da velocidade do vento medido em uma altura de 3 metros, para a altura de instalação da turbina. Essa correção é feita pela equação da Lei Potencial (Equação (4.5) representada abaixo:

$$V(z) = V(3) \cdot \left(\frac{z}{3}\right)^p \quad (5.2)$$

Onde, $V(z)$ é a velocidade desejada a uma altura (z) qualquer; $V(3)$ é a velocidade do vento medida a 3 metros de altura; e p é o expoente definido em função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo de medição, mostrado na Tabela 5.7 (BLESSMANN, 1995). Neste trabalho o valor de p foi definido como igual a 0.15 ($t=600s$ e Categoria II).

Tabela 5.7 - Parâmetros de correção do vento

Categoria	t(s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600
I	b	1.100	1.110	1.120	1.130	1.140	1.150	1.160	1.170	1.190	1.210	1.230
	p	0.060	0.066	0.070	0.075	0.075	0.080	0.085	0.085	0.090	0.095	0.095
II	b	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	p	0.085	0.090	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125	0.135	0.145	0.150
	F_r	1.000	0.980	0.950	0.930	0.900	0.870	0.840	0.820	0.770	0.720	0.690
III	b	0.940	0.940	0.930	0.920	0.920	0.910	0.900	0.900	0.890	0.870	0.860
	p	0.100	0.105	0.115	0.125	0.130	0.140	0.145	0.150	0.160	0.175	0.185

Nesse trabalho, foi utilizada a velocidade do vento medida experimentalmente para o cálculo das equações (4.32), (4.36), (4.40) e (4.41) para determinar as forças atuantes no sistema, assim como no cálculo da velocidade de rotação das pás (Ω), descrito na equação (5.3):

$$\Omega = \frac{\lambda V_z}{r} \quad (5.3)$$

Onde V_z é a velocidade aproximada em cada instante de tempo, R é o raio da pá e λ é a relação da velocidade de ponta, determinada na equação (5.1).

Através do anemômetro foi possível também fazer o monitoramento da direção do vento no instante da medição. A Figura 5.9 apresenta também a direção do vento ao longo do tempo, através do ângulo formado entre a direção Norte e a direção do vento, representado na Figura 5.15.

É possível observar que o ângulo apresenta pequenas variações, mas se mantém próximo a 180 graus, ou seja, sempre próximo à direção perpendicular ao plano L-O. Foi considerado no trabalho, para desenvolvimento das equações de movimento e força,

que esse ângulo é perpendicular ao plano de rotação, nesse caso, o plano de rotação estaria contido no plano L-O.

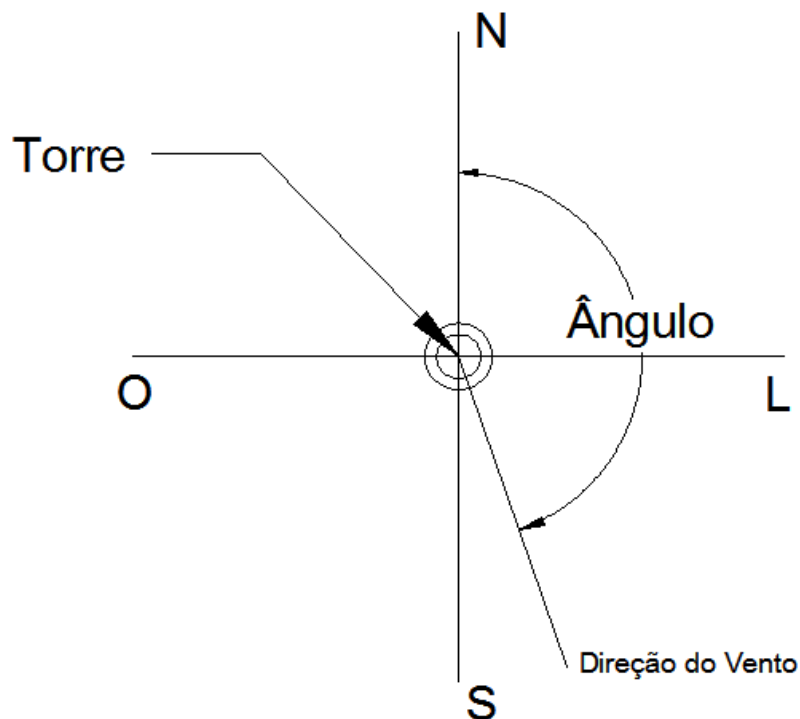


Figura 5.15 - Ângulo e direção do Vento

Aceleração do topo da torre ao longo do tempo

As medições experimentais foram feitas com acelerômetros posicionados no topo da torre em dois planos ortogonais, denominados Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O). Admitiu-se na análise, que o plano de rotação das pás é paralelo a um desses planos e, por falta dessa informação no relatório apresentado por BATTISTA (2009), foi feita uma comparação dos resultados obtidos com os resultados dos dois planos de estais.

A Figura 5.10 apresenta os autoespectros das acelerações no topo da estrutura sob ação do vento, para os planos de estais Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O), obtidos a partir dos sinais da aceleração apresentados na Figura 5.9. É possível observar, que os autoespectros apresentam pico de energia concentrada em 1,74 Hz bem como uma concentração de energia entre 11Hz e 23Hz.

Observando as frequências naturais da estrutura e das pás, apresentadas na Tabela 5.8, verificou-se a possibilidade de haver ressonância entre o quarto modo de vibrar da torre (16,9 Hz) e o segundo modo de vibrar da pá em relação ao grau de liberdade β (17,3 Hz).

Tabela 5.8 - Frequências Naturais da Pá e da Torre

Torre	Pá β	Pá ζ	Rotação do rotor (Ω)
			0,26 ciclos/s ($v = 0,87$ m/s)
			$3 \times 0,26 = 0,78$ ciclos/s
1,74 Hz			$6 \times 0,26 = 1,56$ ciclos/s
	4,6 Hz		4 ciclos/s ($v = 12$ m/s)
5,7 Hz			
9,21 Hz			
		11,9 Hz	
16,9 Hz	17,3 Hz		
		35,6 Hz	

Além das ressonâncias devidas à coincidência de frequências naturais da estrutura, acontecem também devidas à coincidência de frequências naturais da estrutura e frequências de rotação das pás.

A Figura 5.16 representa o diagrama de Campbell da estrutura analisada nesse trabalho. Esse diagrama apresenta a frequência natural da torre, e as frequências naturais de flexão da pá, tanto para *flap* como para *lag*. Apesar de estarem apresentadas por retas horizontais, estas deveriam apresentar pequenas inclinações, que representam as pequenas variações na frequência natural da pá conforme a velocidade de rotação. Também é apresentada no diagrama, a frequência de rotação das pás caracterizada pela reta inclinada (1/rev) e seus primeiros seis múltiplos. Estas retas representam os raios harmônicos. Podem ocorrer problemas de ressonância quando um raio harmônico coincide com uma das retas de frequência natural da estrutura. (PEREIRA, 1993)

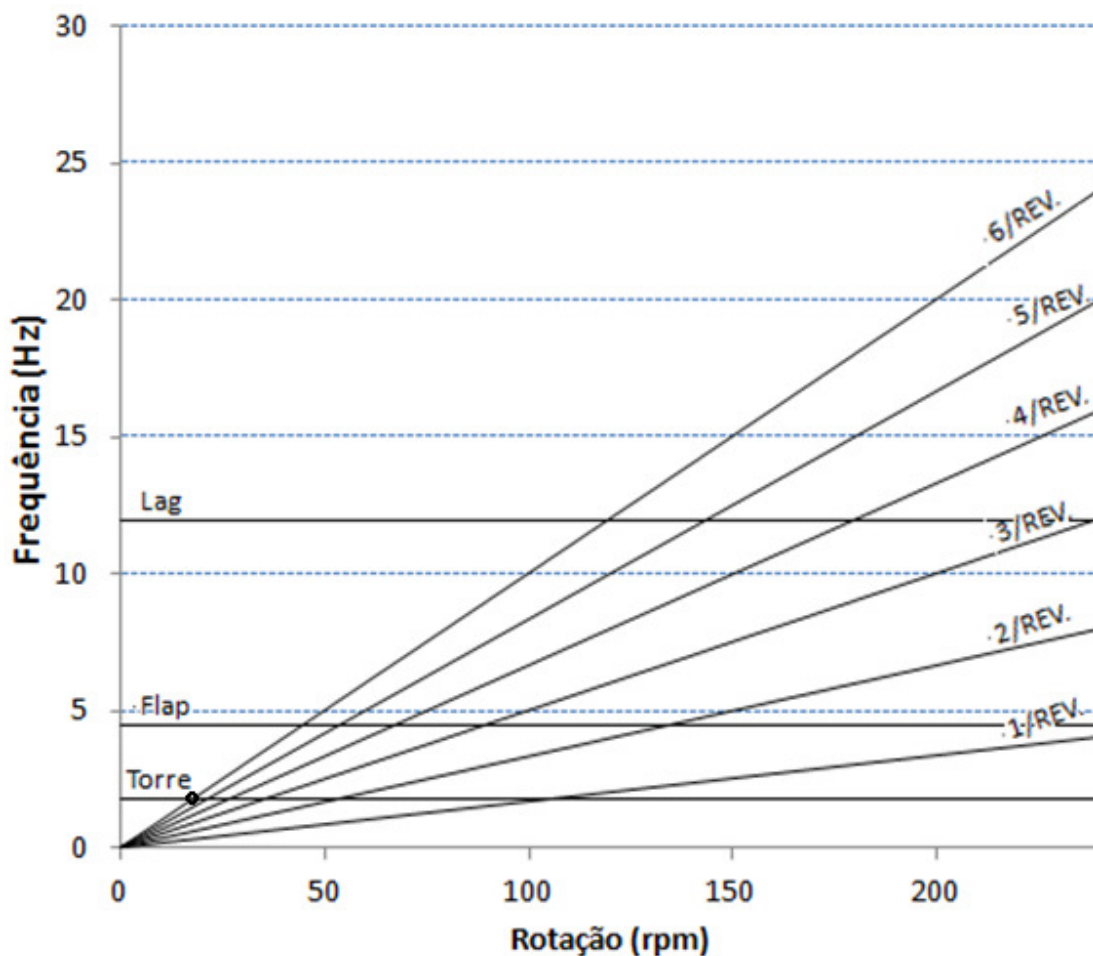


Figura 5.16 - Diagrama de Campbell da turbina analisada

Resultados na faixa de frequência entre 15Hz e 20 Hz

Foi utilizado um filtro passa faixa entre as frequências de 15Hz e 20Hz nos sinais experimentais da aceleração da estrutura ao longo do tempo, para os dois planos de estais. A Figura 5.17 e a Figura 5.18 apresentam a aceleração do topo da estrutura obtida pelos acelerômetros do plano L-O e N-S, respectivamente. Pode-se observar nestas figuras que as acelerações nos dois planos perpendiculares são bastante similares apresentando valores um pouco inferiores na direção L-O. Observa-se que estes sinais são caracterizados por diversos picos de aceleração com valores próximos entre si, principalmente na direção N-S.

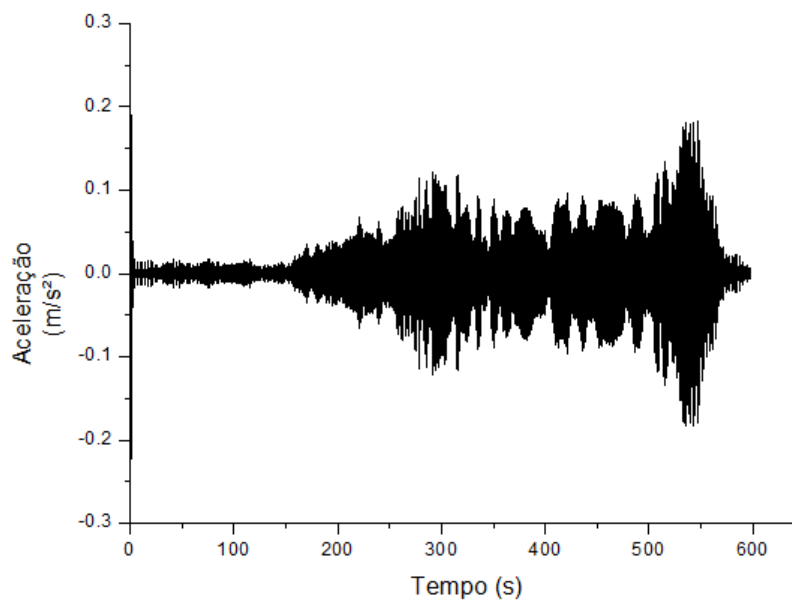


Figura 5.17 - Aceleração no topo da torre – Filtro passa faixa 15-20Hz - Acelerômetro L-O

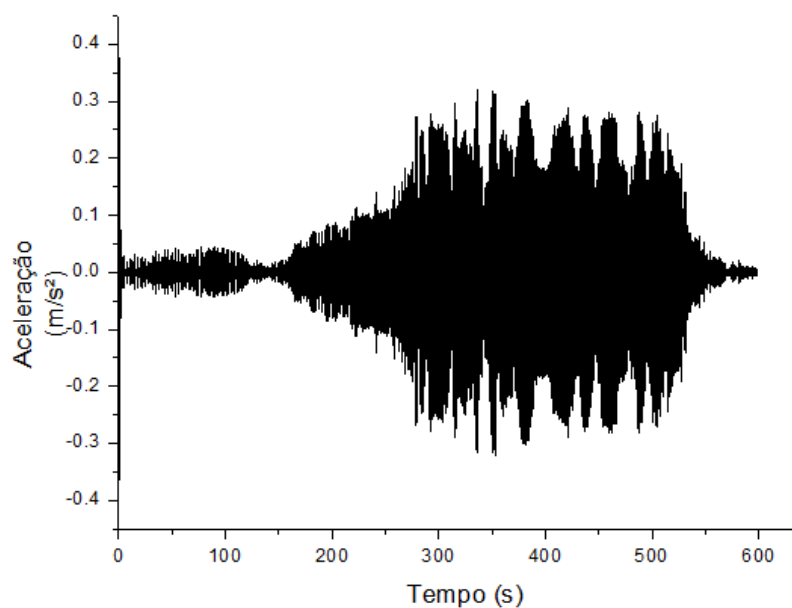


Figura 5.18 - Aceleração no topo da torre - Passa Faixa 15-20Hz - Acelerômetro N-S

Para simular as acelerações da torre nessa faixa de frequência, utilizou-se o modelo analítico considerando o quarto modo de vibração da estrutura ($f = 16,9$ Hz), o segundo modo de vibração da pá referente ao grau de liberdade β ($f = 17,3$ Hz) e o primeiro modo de vibração natural referente ao grau de liberdade ζ da pá ($f = 11,9$ Hz).

A Figura 5.19 apresenta a aceleração no tempo obtida com o modelo analítico onde pode-se observar uma boa concordância com os resultados experimentais com os valores máximos teóricos situando-se entre os máximos valores experimentais referentes aos dois planos perpendiculares.

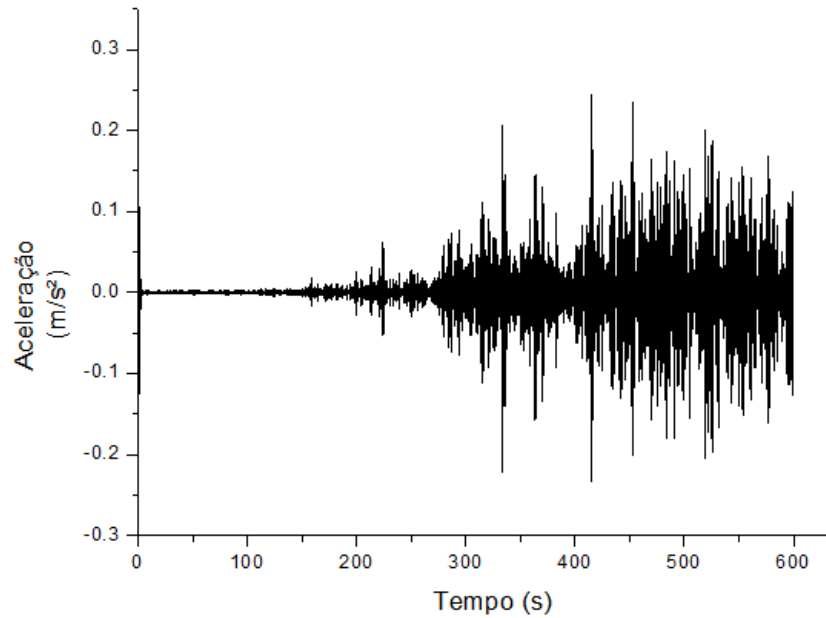


Figura 5.19 - Aceleração no topo da torre - Modelo analítico

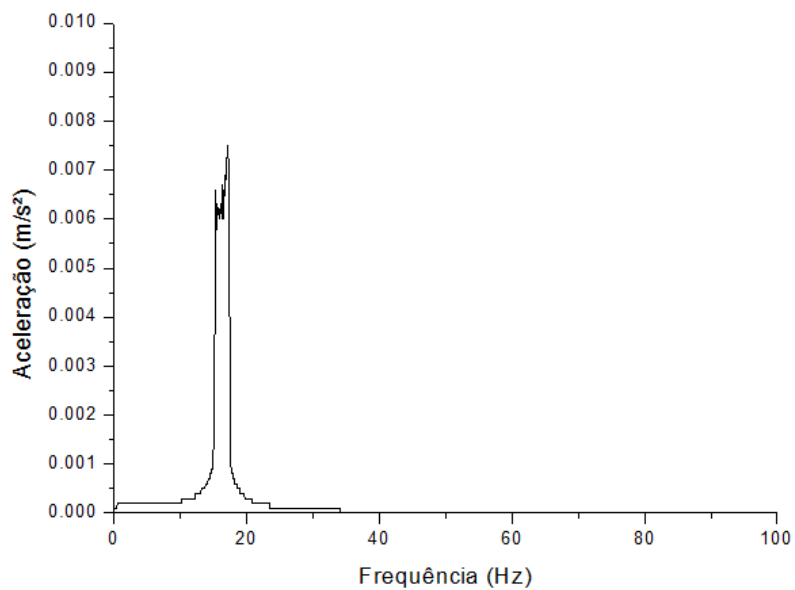


Figura 5.20 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – L-O – Passa Faixa

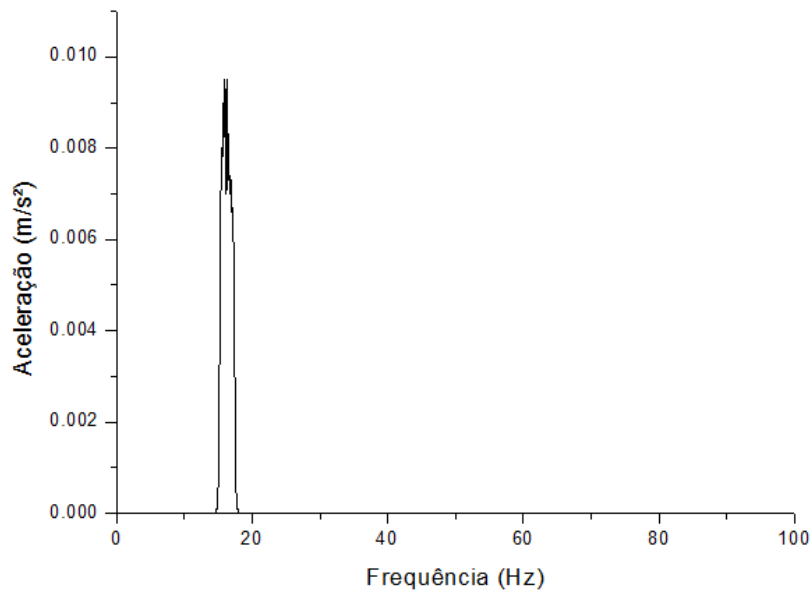


Figura 5.21 - Autoespectro da aceleração no topo da torre - N-S - Passa Faixa

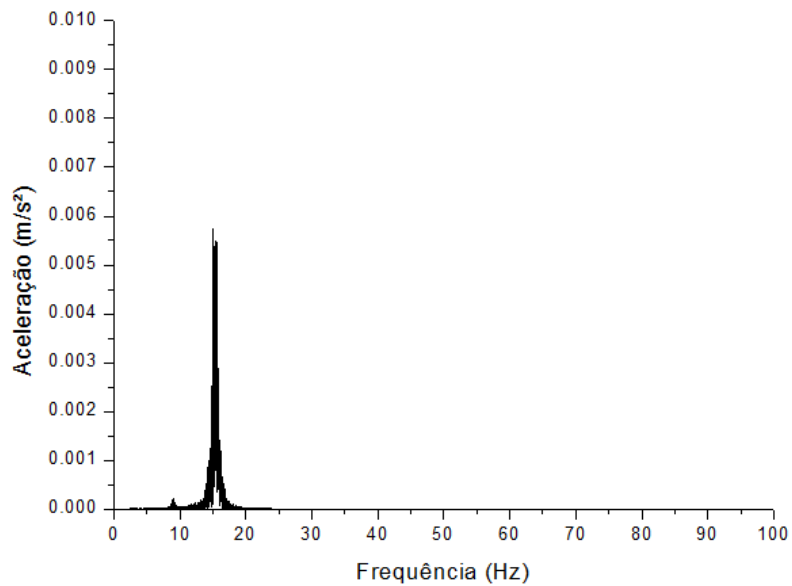


Figura 5.22 - Autoespectro da aceleração no topo da torre - Teórico - Altas frequências

A boa correlação entre os resultados teóricos e experimentais apresentados na Figura 5.17, na Figura 5.18 e na Figura 5.19 valida o modelo desenvolvido para a faixa de frequências entre 15 Hz e 20 Hz.

Com objetivo de avaliar a importância dos termos não-lineares nas equações de movimento e das forças, foram obtidos os resultados da aceleração ao longo do tempo apresentados na Figura 5.23 considerando apenas os termos lineares das equações de movimento (3.27), (3.32), (3.37), (4.32), (4.36) e (4.40), reescritas respectivamente pelas equações (5.5), (5.6), (5.7), (5.8) e (5.9) apresentadas a seguir:

Equação de movimento beta linearizada

$$I_B(\ddot{\beta} + \Omega^2\beta) + F_B(\dot{v} + g\beta \sin \psi + \Omega^2 E\beta) + k_\beta\beta = Q_\beta - c\dot{\beta} \quad (5.4)$$

Equação de movimento zeta linearizada

$$I_B(\ddot{\zeta}) + F_B(\Omega^2 E\zeta + g \sin \psi + g \cos \psi \zeta) = Q_\zeta - c\dot{\zeta} \quad (5.5)$$

Equação de movimento v linearizada

$$m_m\ddot{v} + F_B(\ddot{\beta} - \ddot{\zeta}) + k_v v = Q_v - c\dot{v} \quad (5.6)$$

Força generalizada beta linearizada

$$Q_\beta = -\frac{1}{24}\rho cR^2[C_D(+4\Omega R\dot{v} + 3\Omega R^2\dot{\beta} + 4\Omega V_Z R + 6\Omega V_Z E + 4\Omega\dot{\beta}RE + 4R\Omega V_Z + 6\Omega\dot{v}E) - C_L(+8\dot{\zeta}\Omega RE + 8\Omega^2 RE + 3\Omega^2 R^2)] \quad (5.7)$$

Força generalizada zeta linearizada

$$Q_\zeta = -\frac{1}{24}\rho cR^2[C_D(+8\dot{\zeta}\Omega RE + 8\Omega^2 RE + 6\dot{\zeta}\Omega R^2 + 3\Omega^2 R^2) + C_L(-4\Omega\dot{\beta}RE - 3\Omega\dot{\beta}R^2 - 4\dot{\zeta}V_Z R - 4\Omega V_Z R - 6\Omega E V_Z - 4\Omega\dot{v}R)] \quad (5.8)$$

Força generalizada v linearizada

$$Q_v = -\frac{1}{12}\rho cR[C_D(+3\dot{\zeta}V_Z R + 6\Omega E\dot{v} + 3\Omega R\dot{v} + 2R^2\Omega\dot{\beta} + 3RE\Omega\dot{\beta} + 3R\Omega V_Z + 6\Omega E V_Z) + C_L(4R^2\Omega\dot{\zeta} + 6R\Omega^2 E + 6R\Omega E\dot{\zeta} + 2R^2\Omega^2)] \quad (5.9)$$

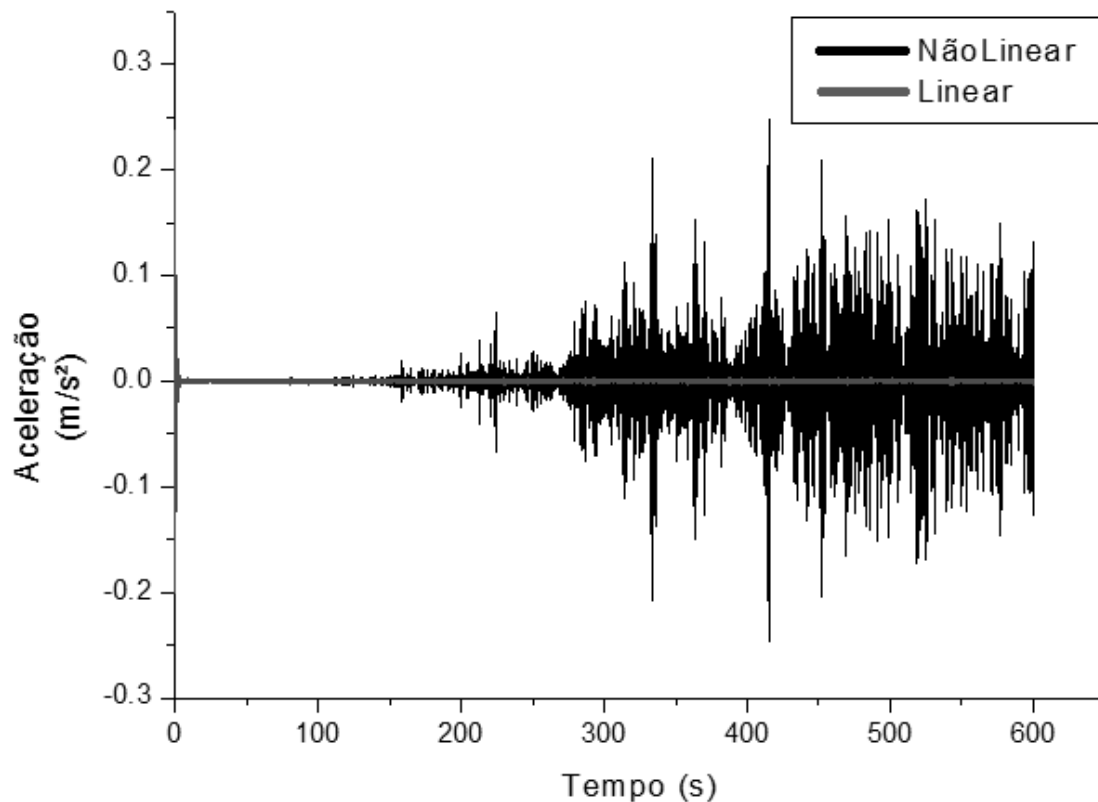


Figura 5.23 - Comparação entre resultados com termos lineares e não-lineares

Analisando a Figura 5.23 é possível observar a diferença de amplitudes entre os resultados obtidos considerando apenas os termos lineares e os resultados obtidos considerando os termos não-lineares nas equações, verificando a importância dessa consideração.

Resultados para frequência inferior a 6Hz

Normalmente as ações de vento apresentam frequências baixas e por esse motivo excitam as frequências mais baixas da estrutura. Para representar a aceleração do topo da torre referente às frequências mais baixas, foi utilizado um filtro passa baixa considerando as frequências abaixo de 6 Hz da resposta experimental de aceleração (Figura 5.9) apresentado na figura 5.24. Pode-se observar que o gráfico desta figura apresenta valores máximos da mesma ordem de grandeza dos sinais de aceleração na faixa de 15 Hz a 20 Hz (Figura 5.17 e Figura 5.18), mas com

características diferentes, apresentando picos espaçados e de valores muito diversos entre si.

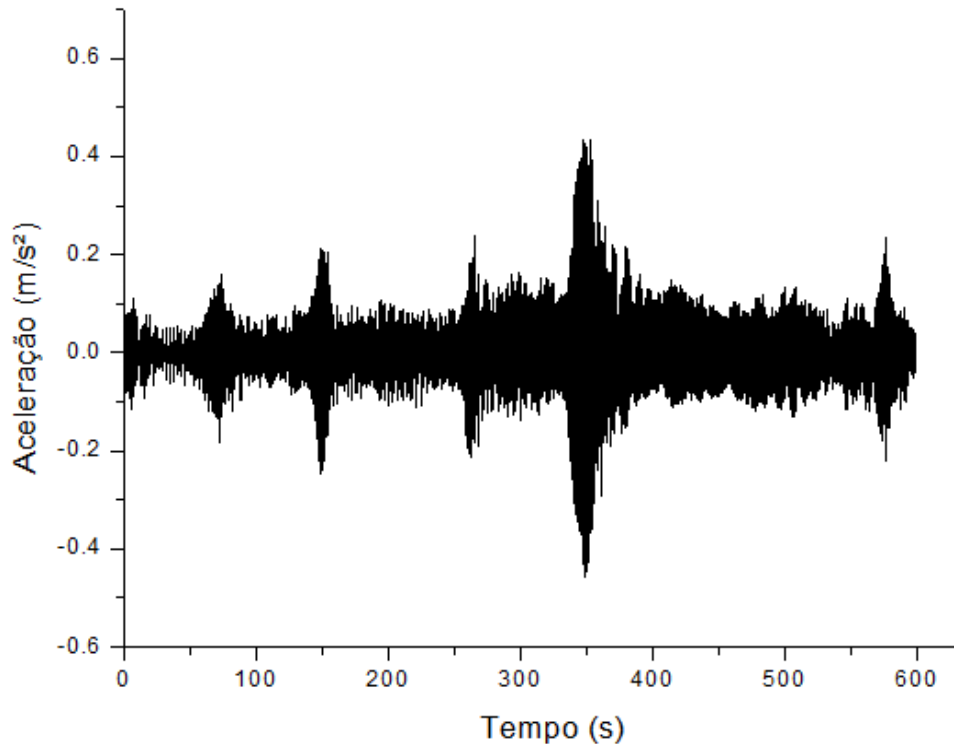


Figura 5.24 - Aceleração experimental no topo da torre - Filtro Passa Baixa (6 Hz) – N-S

Para reproduzir essa aceleração do topo da estrutura no modelo analítico foram utilizadas as primeiras frequências da torre ($f = 1,76$ Hz) e das pás ($f = 4,6$ Hz para β e $f=11,9$ Hz para o modo ζ), sendo apresentada na Figura 5.25:

A Figura 5.26 apresenta comparação entre as respostas obtidas no modelo analítico e as respostas experimentais obtidas com a utilização do filtro passa baixa de valores abaixo de 6Hz. A Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29, apresentam os espectros para baixa frequência dos sinais de aceleração experimental e teórico, respectivamente.

Observa-se na Figura 5.26 que a resposta experimental utilizando o filtro passa baixa apresenta amplitudes muito maiores do que as da resposta teórica. Acredita-se que algumas das simplificações consideradas no trabalho possam ser responsáveis por essa diferença entre resultados. Por exemplo, a hipótese de velocidade constante em toda

área do rotor. De acordo com HAU (2002) as forças aerodinâmicas variando segundo o perfil vertical de velocidades de vento produzem forças de excitação na torre na frequência de rotação multiplicada pelo número de pás, no nosso caso 3Ω . Esta força poderia ocasionar vibrações também na frequência de um super harmônico de 3Ω . Na Tabela 5.8 observa-se que a frequência natural do primeiro modo da torre coincide aproximadamente com 6Ω . (Vide Figura 5.16)

Na Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 pode-se observar que enquanto as respostas experimentais nos dois planos apresentam apenas um pico de energia próximo à frequência de 1,76 Hz a resposta teórica apresenta frequências acopladas, com picos de energia próximos as frequências 1,76 e 4,6 Hz. Assim como a resposta da aceleração ao longo do tempo, os autoespectros obtidos no modelo teórico também apresentam amplitudes muito mais baixas do que os obtidos experimentalmente.

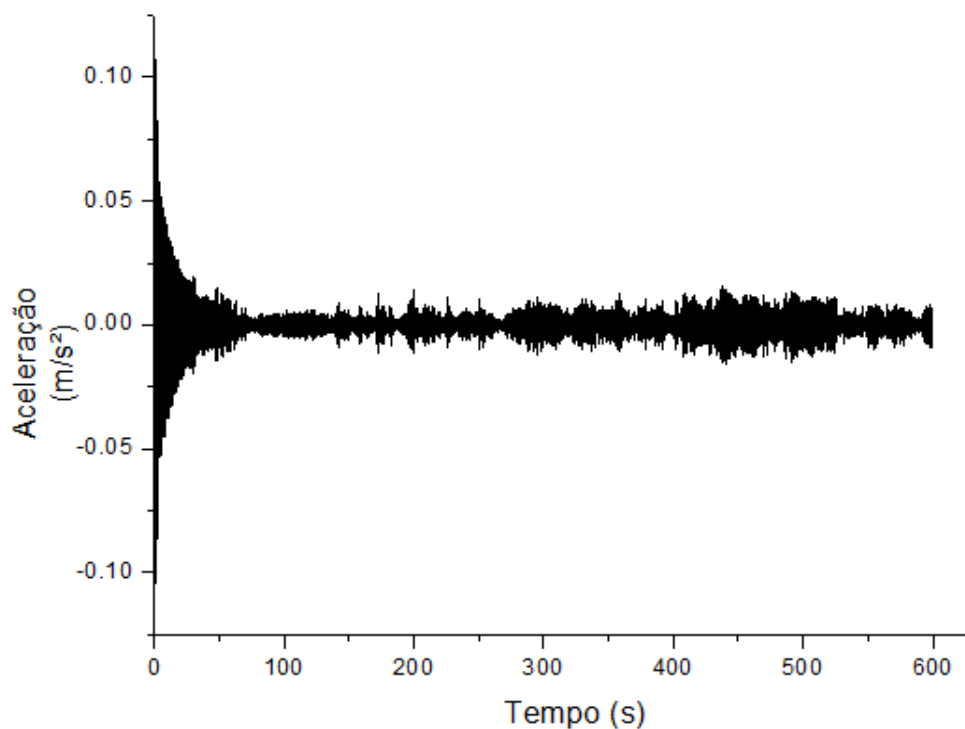


Figura 5.25 – Aceleração teórica no topo da estrutura – Baixas Frequências (1,74 Hz)

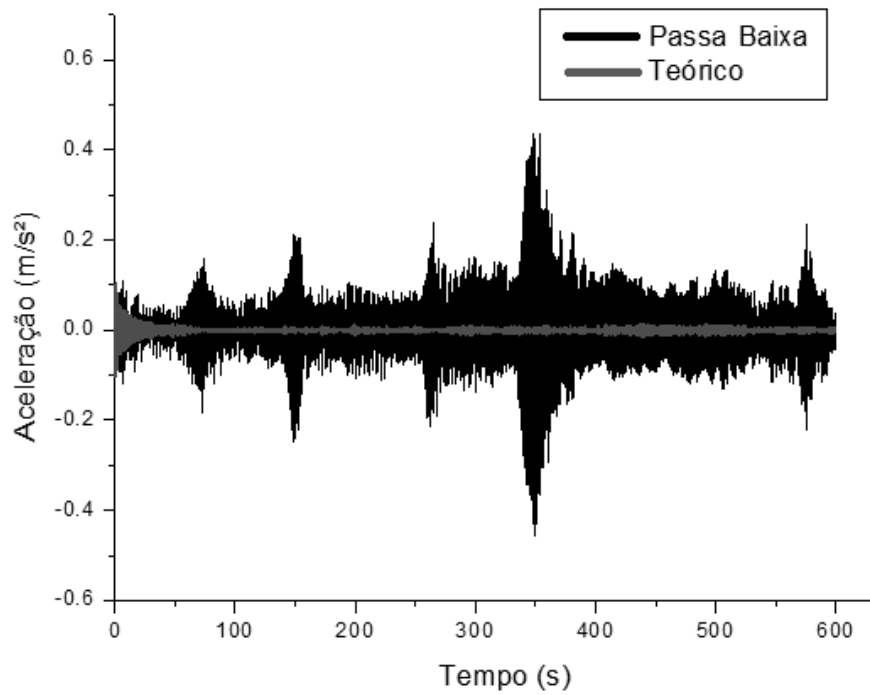


Figura 5.26 - Comparação Teórico-Experimental da aceleração no topo da torre para baixas frequências

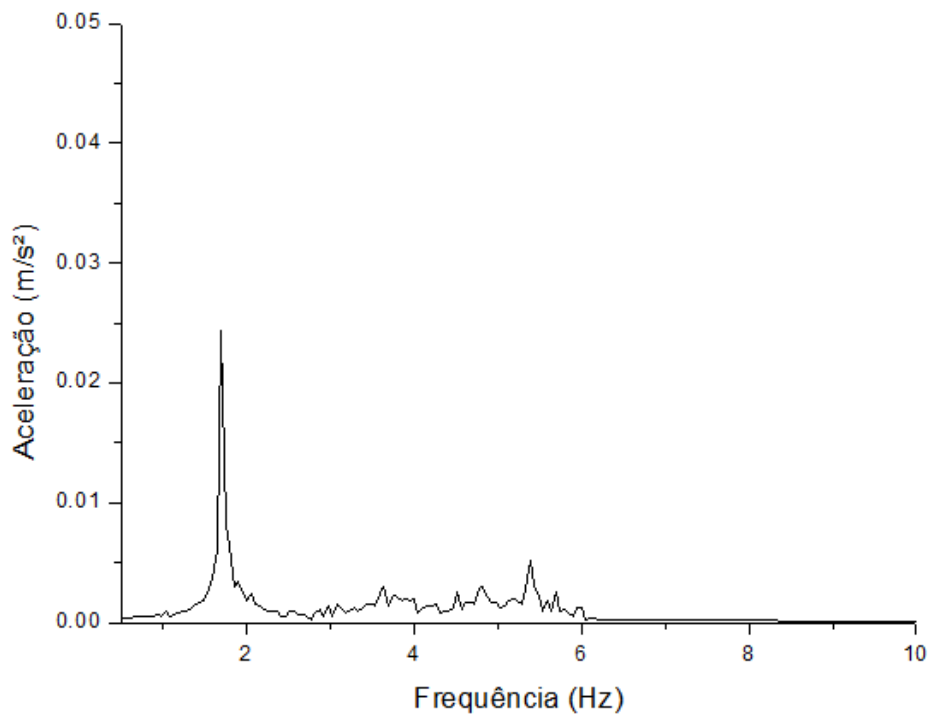


Figura 5.27 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – N-S – Filtro Passa Baixa (6Hz)

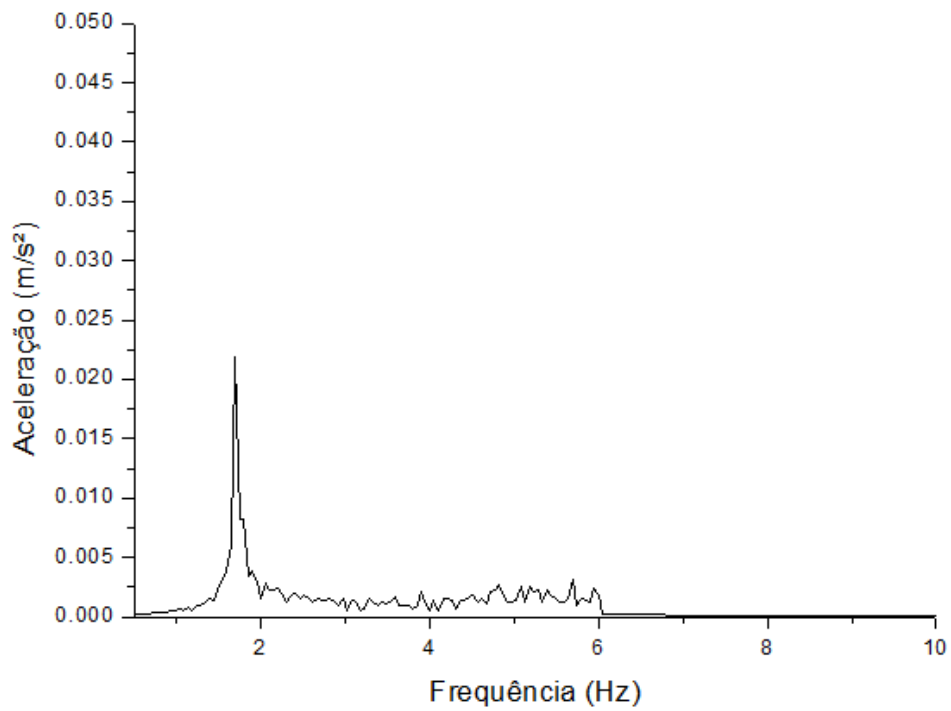


Figura 5.28 - Autoespectro da aceleração no topo da estrutura – L-O – Filtro Passa Baixa (6Hz)

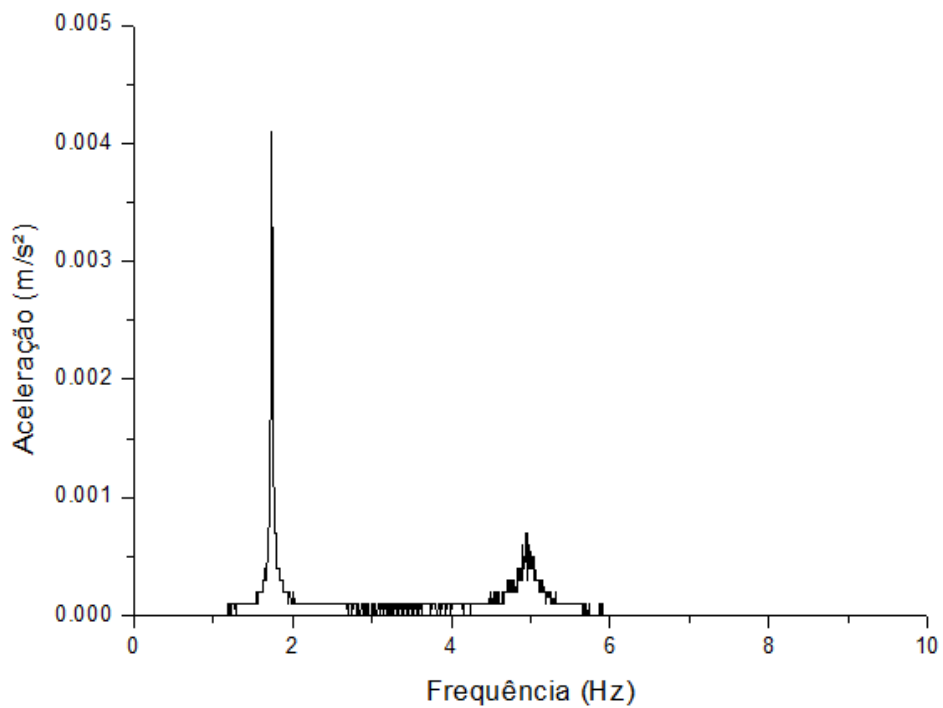


Figura 5.29 - Autoespectro da aceleração teórica no topo da estrutura – Baixa Frequência (1,74 Hz)

5.4.3 Resultados para velocidade de vento constante

Como a velocidade de vento medida experimentalmente apresentou valores muito pequenos e os resultados deixaram algumas incertezas, foram feitas algumas análises da estrutura sob ação de ventos com velocidade constante, igual à velocidade nominal do aerogerador, ou seja, de 12 m/s.

Potência do rotor

Foi feita uma análise de comparação dos valores obtidos pelo programa desenvolvido por esse trabalho e a potência nominal do modelo do aerogerador utilizado com exemplo. A potência pode ser definida pela equação (2.4), reproduzida a seguir:

$$P = \omega T$$

O torque das pás é obtido a partir da equação (5.10):

$$T = Q_{\zeta} + F_{\zeta} \cdot E \quad (5.10)$$

Sendo Q_{ζ} o momento definido na equação (4.36), F_{ζ} a força resultante na raiz da pá, conforme ilustra a Figura 5.30 e E a excentricidade dessa força em relação ao cubo do rotor. A força é definida pela equação (5.11):

$$F_{\zeta} = \int_0^R dF_{\zeta} \cdot dr \quad (5.11)$$

Sendo dF definida na equação (4.35). Dessa forma é possível reescrever a força F_{ζ} como apresentado na equação (5.12):

$$F_{\zeta} = \frac{1}{12} R \rho c [C_D (-2R^2 \dot{\zeta}^2 - 2R^2 \Omega^2 - 4R^2 \Omega \dot{\zeta} - 6R \Omega E \dot{\zeta} - 6R \Omega^2 E) + C_L (+2R^2 \Omega \dot{\beta} + 3R \Omega E \dot{\beta} + 2R^2 \dot{\beta} \dot{\zeta} + 3R \Omega V_Z + 3R \Omega \dot{v} + 3R \dot{\zeta} V_Z + 3R \dot{\zeta} \dot{v} + 6 \Omega E V_Z + 6 \Omega E \dot{v})] \quad (5.12)$$

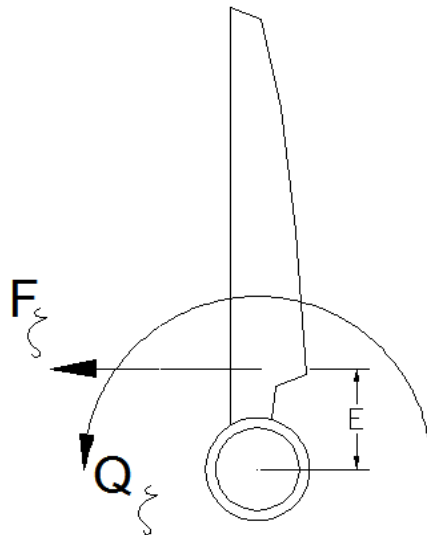


Figura 5.30 - Componentes do Torque da pá

A Figura 5.31 apresenta a resposta do torque de uma pá ao longo do tempo. É possível observar que, após o período de resposta transiente, o torque apresenta uma resposta quase constante ao longo do tempo de aproximadamente:

$$T = 211 Nm$$

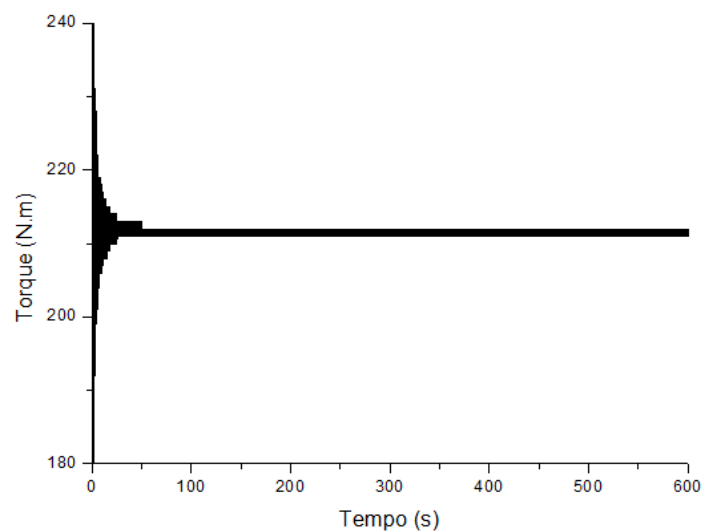


Figura 5.31 - Torque da pá ao longo do tempo

Considerando um vento constante de 12 m/s é possível determinar a velocidade de rotação das pás (Ω) através da equação (2.1), sendo o raio do rotor (R) igual a 2,75 e a relação de velocidade de ponta (λ) igual a 5,38, chegando a um valor:

$$\Omega = 25 \text{ rad/s}$$

Substituindo os valores de T e Ω na equação (2.4) e multiplicando por três (número de pás) é obtido o valor de potência ideal do aerogerador, sem perdas:

$$P = 15825 \text{ Watts}$$

O cálculo de potência disponível no vento (P_v na equação (2.2)) fornece para este caso o seguinte valor:

$$P_v = \frac{1}{2} \times 1,225 \times \pi \times 2,75^2 \times 12^3 = 25145 \text{ Watts}$$

Considerando $\rho = 1,225$; $A = \pi \times 2,75^2$ e $V_0 = 12$.

Comparando-se P_v com a potência P obtida, verifica-se que esta potência corresponde a 63% de P_v , percentual de aproveitamento coerente com valores da literatura que equivalem a 59% (GASH, 2002) (Ver também item 2.4)

De acordo com o fornecedor do aerogerador estudado (ENERSUD, 2012), a potência nominal do modelo é igual a 6000 Watts, que quando comparada a potência obtida, equivale a 38% de P, percentual de aproveitamento coerente com os valores da literatura 40% (GALIZIA, 2004). (Ver também item 2.4)

O mesmo procedimento foi feito para velocidades de vento de 2, 4, 6, 8 e 10 m/s e com as potências obtidas foi determinada a curva de potência do aerogerador, apresentada na Figura 5.32. O resultado é bastante satisfatório quando comparado a curva de potência fornecida pelo fabricante e apresentada na Figura 5.33.

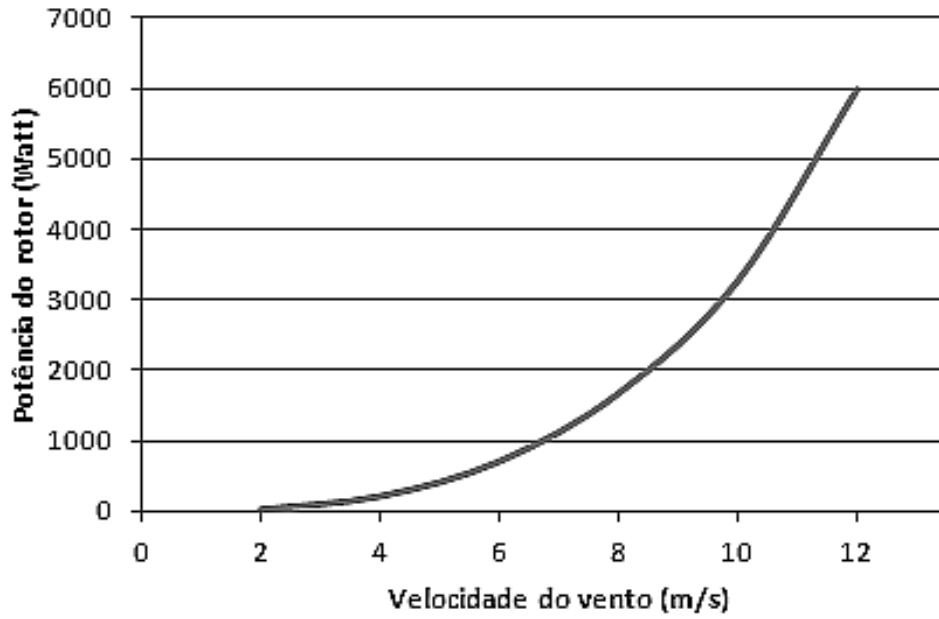


Figura 5.32 - Curva de potência obtida no modelo teórico

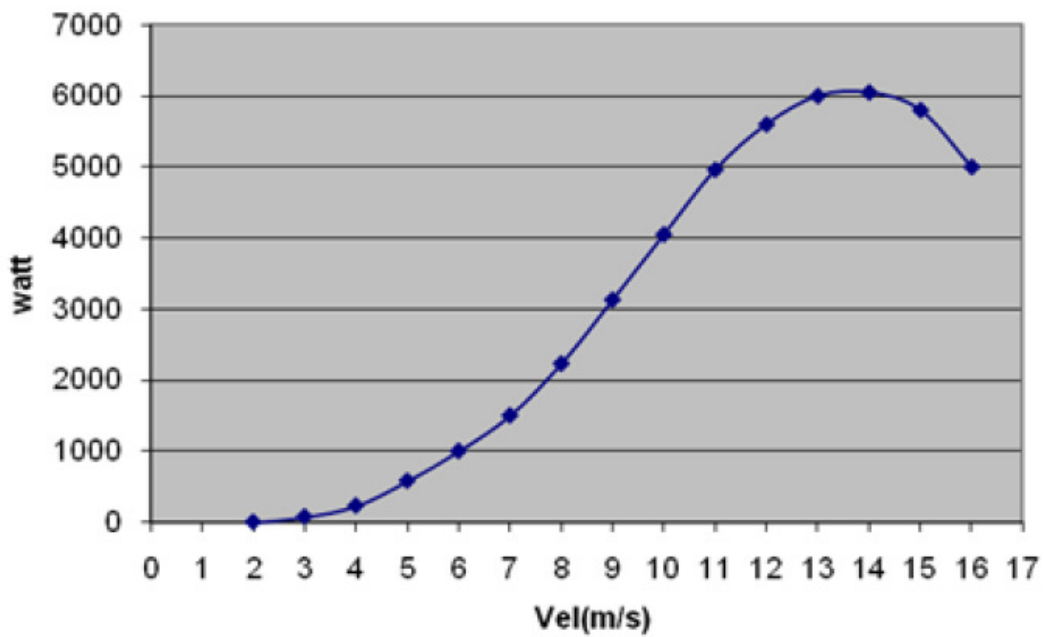


Figura 5.33 - Curva de potência fornecida pelo fabricante [ENERSUD,2012]

Ângulo de ataque

O ângulo de fluxo está relacionado com as componentes da velocidade do vento e a velocidade relativa. Portanto, para determinar seu valor, primeiro é necessário calcular as componentes V_t e V_p ao longo do tempo, a partir das equações (4.28 e (4.29), respectivamente, e posteriormente, a velocidade relativa através da equação (4.18). Depois disso, através da equação (4.21), é possível determinar o ângulo de fluxo em cada instante de tempo, apresentado na Figura 5.34:

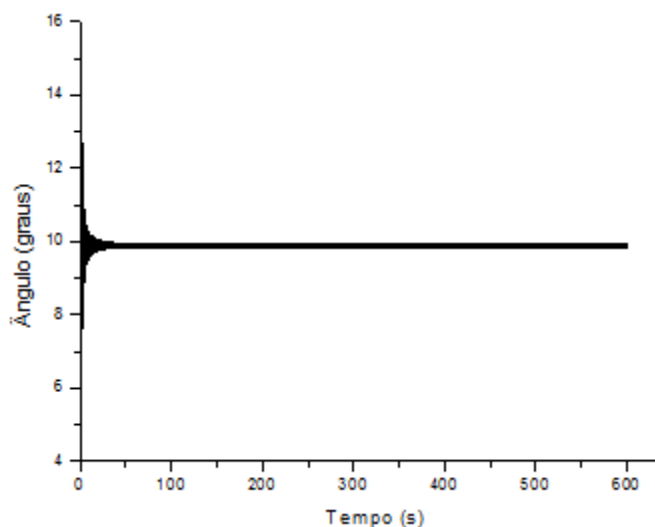


Figura 5.34 - Ângulo de fluxo ao longo do tempo

O ângulo de fluxo oscila com valores próximos de $9,8^\circ$. Por simplificação, o ângulo de torção da pá foi considerado nulo. Dessa forma, os ângulos de fluxo e ataque são iguais, e apresentam valores coerentes com o ângulo de 10° definido para determinação dos coeficientes de sustentação e arrasto.

Aceleração das pás

A Figura 5.35 e a Figura 5.36 apresentam os sinais de aceleração das pás ao longo do tempo, em relação aos graus de liberdade β e ζ , respectivamente, em um intervalo de tempo de 5 segundos, quando já apresentam respostas em regime. Observa-se que ambos os graus de liberdade apresentam pequenas amplitudes, porém o grau de liberdade ζ apresenta uma amplitude um pouco maior. A Figura 5.37 e Figura 5.38 apresentam os autoespectros desses sinais de aceleração. Observa-se que ambos os

graus de liberdade apresentam pico de energia concentrado próximo à frequência de 3,9 Hz, frequência de rotação das pás sob ação do vento de 12 m/s.

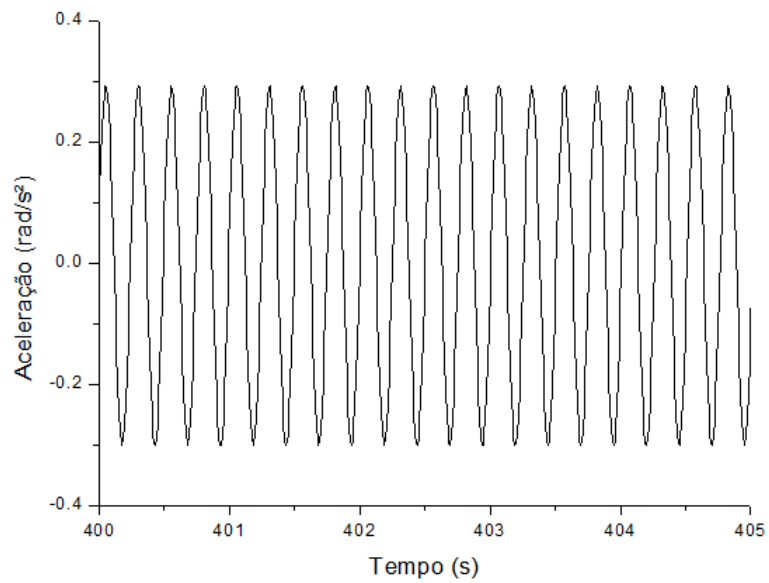


Figura 5.35 - Aceleração Beta - Vento Constante 12m/s

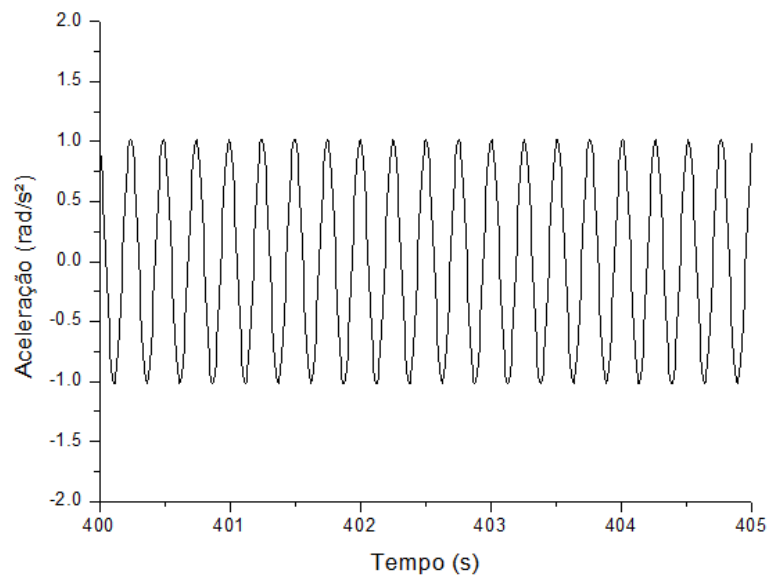


Figura 5.36 - Aceleração Zeta - Vento Constante - 12 m/s

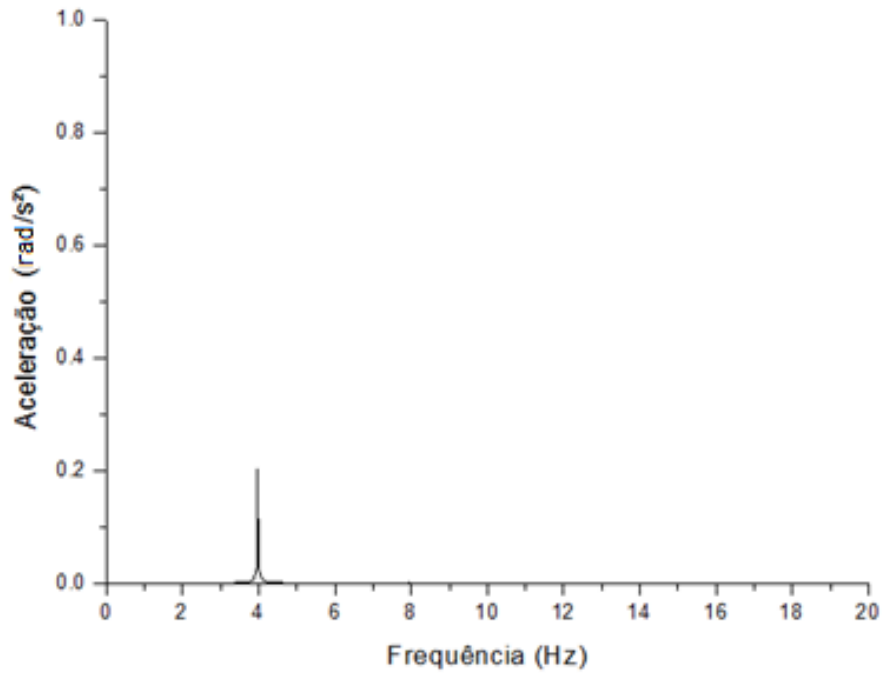


Figura 5.37 - Autoespectro da aceleração Beta

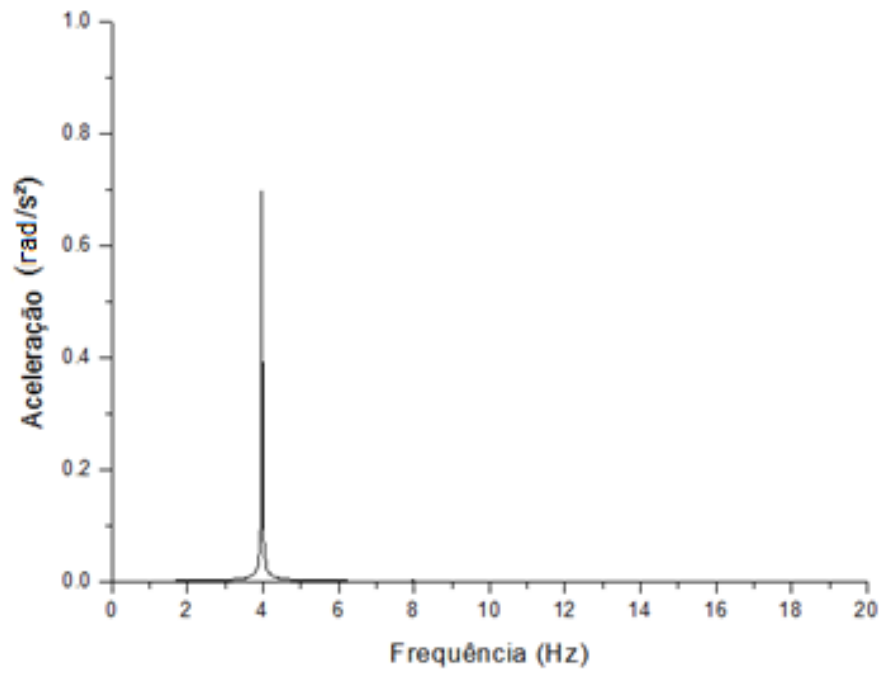


Figura 5.38 - Autoespectro da aceleração Zeta

Momentos na raiz da pá

O gráfico da Figura 5.39 apresenta os valores dos Momentos referentes aos dois graus de liberdade da pá, de acordo com a velocidade do vento. É possível observar que a curva referente ao grau de liberdade β (flap) é mais acentuada e isso se deve ao fato de momento em *flap* estar diretamente relacionado com a força centrífuga. Essa força, que é proporcional a Ω^2 , aumenta e provoca um considerável aumento do momento na raiz da pá em flap. O momento na raiz da pá em Lag, porém, não sofre uma grande influência desse aumento da força centrífuga, por isso não apresenta uma curva tão acentuada. (PEREIRA, 1993)

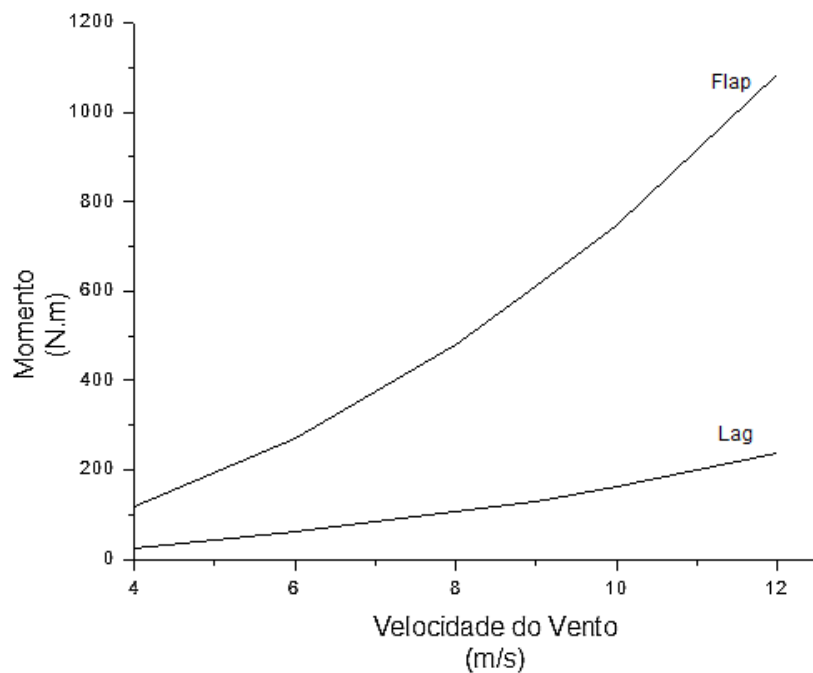


Figura 5.39 - Momentos de Flap e Lag x Velocidade do Vento

6 Conclusão e Continuidade do Trabalho

6.1 Conclusão

Como principal objetivo, este trabalho se propôs a desenvolver um modelo teórico-numérico das equações de movimento linearizadas do modelo mecânico do sistema pás-nacele-torre de uma turbina eólica. O modelo discreto considerou um modo de translação da torre e dois modos de flexão de cada pá. A validação do modelo foi realizada através de dados experimentais locais de vento e de resposta dinâmica de uma torre eólica estaiada tubular, instalada na cidade de Cotenda, no Paraná.

A análise da resposta em aceleração no topo da torre sob ressonância entre o segundo modo de vibrar da pá, referente ao grau de liberdade β e o quarto modo de vibração da torre, ambos com frequências naturais próximas a 17 Hz mostrou uma boa correlação entre os resultados do modelo teórico e experimentais, apresentando respostas de aceleração ao longo do tempo com amplitudes muito próximas e autoespectros com picos de energia em frequências próximas.

Os resultados teóricos da aceleração no topo da estrutura em frequências mais baixas não apresentaram os picos de aceleração presentes nos sinais experimentais obtidos através do filtro passa baixa de 6 Hz. Uma hipótese para essa diferença de resultados decorre das simplificações do modelo como, por exemplo, a consideração de velocidade constante em toda área do rotor.

Na análise da resposta das pás sob ação de vento constante no modelo analítico observou-se que ambos os graus de liberdade da pá apresentaram aceleração constantes ao longo de tempo e um autoespectro com picos de energia próximos à frequência de rotação das pás. A curva de potência obtida através do modelo analítico considerando-se percentuais típicos de perda apresentou uma boa concordância com a curva experimental fornecida pelo fabricante.

6.2 Continuidade do Trabalho

Linearizações foram consideradas no desenvolvimento das equações de movimento do sistema pás-nacele-torre. O autor sugere que em trabalhos futuros sejam considerados os termos não lineares para aferição da influência destes termos na resposta dinâmica da turbina eólica.

Esse trabalho considerou apenas os graus de liberdade de translação da torre o que torna as equações de movimento e de força aerodinâmica simplificadas. O autor sugere que sejam feitas equações com mais graus de liberdade da estrutura da torre tornando o modelo mais representativo do comportamento dessas estruturas.

Este trabalho também apresentou uma simplificação no que se diz respeito à discretização da pá, que foi considerada com corda constante e com o mesmo coeficiente de sustentação e arrasto em todo seu comprimento. O autor sugere que seja feita uma integração numérica para obtenção das forças aerodinâmicas, considerando as diferentes cordas e coeficientes ao longo do comprimento da pá.

As respostas apresentadas por esse trabalho não apresentam os efeitos dinâmicos na estrutura causados pela vibração dos estais. O autor sugere que sejam acrescentadas as forças e os graus de liberdade referentes aos cabos.

O autor sugere que sejam feitos ensaios experimentais para medições das acelerações e deslocamentos da estrutura de um aerogerador sob ação de ventos mais fortes para uma melhor aferição do modelo teórico. Recomenda-se também uma maior exploração das taxas de amortecimento determinadas através dos resultados experimentais obtendo-se valores referentes a dois modos de vibração.

7 Referências Bibliográficas

ABDALA, V., 2010. Disponível em: < <http://www1.folha.uol.com.br/folha/ambiente/ult10007u689283.shtml>. > Acesso em: 20/02/2012

ADEGAS, F. D., *Análise, Simulação e implementação de um conversor de baixa potência com MPPT e PFC para aerogeradores em sistema isolados*. Tese de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2006

AMARANTE, O. A. C., BROWER, M., ZACK J., SÁ, A. L.. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, Ministério de Minas e Energia - Brasília, Brasil. 2001. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/atlas_eolico_brasil/atlas.htm

BATTISTA, R. *Aeroelasticidade e controle dinâmico estrutural de turbinas eólicas de eixo horizontal*. Relatório Técnico, projeto CNPq. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2009

BIERBOOMS, W. *A Dynamic Model of a Flexible Rotor – description of the mathematical model*, Report IW89.034R, Delf University of Technology, Holanda. 1990

BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. 1ed. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995.

BNDES. Disponível em: < <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=parques-eolicos-brasil> >. Acesso em: 20/02/2012

CHOPRA, I. e DUGUNDJI, J. 1979, *Non-linear Dynamic Response of a Wind Turbine Blade*, Journal of Sound and Vibration, vol 63(2), pg. 265-286

CLOUGH, R.W., JOSEPH, P.. *Dynamics of Structures*. International Edition. California, EUA. McGrawHill. 1982

DUTRA, R. *Tutorial de Energia Eólica – Princípios e Tecnologias*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.htm. Acesso em: 17/01/2012

EGGLESTON, D. M. e STODDARD, F. S. *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., EUA. 1987

ENERGIA, P. *Estado e Potencial da Energia Eólica no Brasil*. Disponível em: < <http://www.portal-energia.com/estado-e-potencial-da-energia-eolica-no-brasil/> > Acesso em: 07/05/2011

ENERSUD. Disponível em < <http://enersud.com.br> > Acessado entre Março de 2011 e Fevereiro de 2012.

ERENO, D.. *A Força dos ventos*. Revista *Pesquisa FAPESP*, edição número 177. 2010.

FEITOSA, E. A. N. *Parametric Resonance Horizontal Axis Wind Turbine*, Ph. D Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, University of Southampton, Inglaterra. 1989.

FIGUEREDO, C. M., *Tecnologia de los pequeños aerogeneradores*. Disponível em: < <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia39/HTML/articulo03.htm> > Acesso em: 15/01/2012

FREITAS, A. W.. *Controlo de passo de aerogeradores de baixa Potência*. Dissertação de Mestrado. FEUP. Porto, Portugal. 2008.

GALIZIA, F. R. C.. *Geração de Energia a partir de fonte eólica com geradores assíncronos conectados a conversor estático duplo*. Tese de Mestrado. Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2004.

GASH, R.; TWELW, J. *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Solarpraxis AG. 2002.

HANSEN, M.O.L., *Aerodynamics of Wind Turbines*. 2nd edition. London, England. Earthscan. 2008

HAU, E.. *Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2nd edition. Munich, Germany. Springer. 2005

HEPPERLE, M., 2008. Site <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/index.htm>. Acessado 21/02/2012

LEITE, G. N. P., ARAUJO, A. M.. *Modelagem Dinâmica de conversão eólico-mecânica em turbinas eólicas de eixo horizontal*. UFPE. Recife, PE. 2007.

LIMA, S. de SOUZA, SANTOS S. H. C. *Análise Dinâmica das Estruturas*. Rio de Janeiro, RJ. Editora Ciência Moderna Ltda. 2008

LU, X.; McELROY, M.B.; KIVILUOMA, J. *Global potencial for wind-generated electricity*. PNAS. v.106, n. 27, p. 10.933-38. 22 jun. 2009.

NATUREZA. Disponível em < <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/02/capacidade-instalada-de-energia-eolica-cresce-21-no-mundo-em-2011.html> > Acesso em: 01/03/2012.

PEREIRA L. A.. *Análise Aeroelástica de turbinas eólicas de eixo horizontal*, Tese de mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 1993.

PRESS, W. et al. *Numerical Recipes in Fortran 77*. Segunda. ed. New York: Cambridge University Press, v. I, 1992.

REIS, M. M.. *Sistema Eólico de pequeno porte para interligação à rede elétrica*. Tese de mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2008.

SANT'ANNA, E. Disponível em: < <http://g1.globo.com/Noticias/Ciencia/0,,MUL1367045-5603,00-leilao+em+dezembro+busca+impulsionar+geracao+de+energia+por+ventos+no+brasi.html> > Acesso em 13/03/2011

SAP2000, *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures*. Versão 10.0.5

WENZEL, G. M.. *Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2007.