#### ANÁLISE AEROELÁSTICA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

#### Alexandre de Lemos Pereira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE POS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por

Prof. Ronaldo C. Batlista, Ph.D. Prog. de Eng. Civil - COPPE/UFRJ

(Presidente)

Prof. Everaldo A. do N. Feitosa, Ph.D.

" 1. h N.V

Depto. de Eng. Mecânica - UFPE

Prof. Paulo Batista conçalves, D.Sc.

Depto. de Eng. Civil - PUC/RJ

Rio de Janeiro, RJ - Brasil Junho de 1993

#### PEREIRA, ALEXANDRE DE LEMOS

Análise Aeroelástica deTurbinas Eólicas de Eixo Horizontal, (Rio de Janeiro) 1993.

XIX, 158p., 29.7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,

Engenharia Civil/estruturas, 1993)

Tese - Universidade Federal do Rio de

Janeiro, COPPE.

- 1. Energia Eólica
- 2. Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal
- 4. Dinâmica Estrutural
- 5. Análise Aeroelástica
- I.COPPE/UFRJ II.Título (série)

A meus amados pais

Delson e Jeanette
e a Rafa (in memorium)

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores Ronaldo e Everaldo pela tão valiosa ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais, que são a causa disto tudo, pelo constante apoio e incentivo.

Um agradecimento especial aos colegas e amigos mestrandos e doutorandos pela amizade e companherismo.

Aos amigos Paulo Armando, Nilton e Otávio pelo alegre convívio neste período.

E a todos os professores, funcionários e colegas que de uma forma ou de outra colaboraram para execução deste trabalho.

#### VALEU !!

"The most beautiful experience we can have is the mysterious. It is the fundamental emotion that stands at the cradle of true art and true science."

Einstein

"Et il faundra mourir sans avoir tué le vent."

Henry de Montherlant

RESUMO DA TESE SUBMETIDA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

ANÁLISE AEROELÁSTICA DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

Alexandre de Lemos Pereira

Junho, 1993

Orientadores : Prof. Ronaldo C. Batista e

Prof. Everaldo A. do N. Feitosa

Programa : Engenharia Civil

O vento, matéria-prima da energia eólica, é descrito junto com os principais fenômenos atmosféricos envolvidos. Aspectos da turbulência e do tratamento estatístico das medições de vento também são abordados.

As principais forças aerodinâmicas e mecânicas atuantes em turbinas eólicas de eixo horizontal são comentadas qualitativamente.

Para realizar a análise aeroelástica dois modelos matemáticos são propostos: modelos analíticos e modelos em elementos finitos. Para utilizar o método de elementos finitos é

nescessário desenvolver um artifício matemático que elimina o problema da rotação relativa entre o rotor e a torre.

As equações lagrangeanas não-lineares de movimento de um modelo mecânico de pá com dois graus de liberdade (flap e lag) são obtidas com o auxílio de álgebra simbólica. As forças aerodinâmicas generalizadas, incluindo a rigidez e o amortecimento aerodinâmicos, são calculadas com a teoria do elemento de pá e alguns efeitos aerodinâmicos como gradiente vertical de velocidades de vento, sombra da torre, ângulo de cone e desalinhamento do eixo do rotor são considerados.

O modelo analítico investigado neste trabalho foi modelado com os dados geométricos e estruturais do rotor da turbina eólica em operação na ilha de Fernando de Noronha. O comportamento dinâmico do rotor é apresentado com ênfase para a resposta dinâmica devido às cargas determinísticas. Também é feita uma análise, no domínio do tempo, de rajadas discretas de vento. Por fim, simulações de vento turbulento (velocidade X tempo) são utilizadas para a obtenção da resposta dinâmica da pá devido às cargas estocásticas.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)

#### AEROELASTIC ANALYSIS OF HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINES

Alexandre de Lemos Pereira

June, 1993

Thesis Supervisors: Prof. Ronaldo C. Batista and

Prof. Everaldo A. do N. Feitosa

Department : Civil Engineering

The wind and the main atmospheric phenomena which generate it are described. Some aspects of turbulence and the statistical measurements of the wind flow are discussed.

The horizontal-axis wind turbines are submitted to a variety of important aerodynamic and inertial loads. These forces are qualitatively commented.

Two mathematical models are proposed to carry out an aeroelastic analysis: analytical models and finite element

models. The relative rotation between rotor and tower is treated in a special way to allow the use of the finite element method.

A typical wind turbine blade is modelled with two degrees of freedom, namely flap and lag. The non-linear lagrangean equations of motion of the system are derived using symbolic algebra. The generalised aerodynamic forces are calculated by blade element theory and some special effects as wind shear, tower shadow, conning and yaw misalignment are included.

Geometrical and structural characteristics of the rotor in operation on the island of Fernando de Noronha are used in the analytical model. The dynamic behavior of the rotor is studied with emphasis on the dynamic response due to deterministic loads and the results are shown. Discrete gusts are investigated and transient response in the time domain is presented. Simulations of turbulent wind are used to determine the dynamic response of the rotor due to stochastic loads.

# LISTA DE SÍMBOLOS

a	<b>→</b>	Fator de interferência axial.
a'	<del></del>	Fator de interferência tangencial.
N	$\longrightarrow$	Número de pás do rotor.
c	<del></del>	Corda da pá.
C <sub>L</sub> (α)		Coeficiente de Sustentação (Lift).
C <sub>D</sub> (α)	$\longrightarrow$	Coeficiente de Arrasto (Drag).
D	<del></del>	Força de Arrasto (Drag).
е	<b>→</b>	Parâmetro adimensional que define a posição da articulação da pá (excentricidade).
E	<b></b> →	Distância da articulação ao centro de rotação (E=eR).
F	$\longrightarrow$	Força aerodinâmica (direção do plano de rotação).
F <sub>b</sub>		Momento estático da pá.
g	<b></b> →	Aceleração da gravidade.
ı		Momento de inércia de massa da pá.

Constante elástica de flexão na direção de flap.

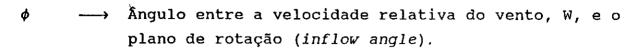
K <sub>ζ</sub>	<b>→</b>	Constante elástica de flexão na direção de lag.
L	<del>&gt;</del>	Força de Sustentação (Lift).
M <sub>b</sub>	<b>→</b>	Massa total da pá.
<b>0</b> β	<b></b> →	Força generalizada em $eta.$
Φ <sub>ζ</sub>	<b>→</b>	Força generalizada em ζ.
r <sub>cg</sub>		Posição radial do centro de gravidade da pá.
R	<b>→</b>	Raio do rotor.
T		Força aerodinâmica (perpendicular ao plano de rotação)
V <sub>p</sub>		Componente de W perpendicular ao plano de rotação.
$v_{_{\mathbf{t}}}$	<b></b> →	Componente de W paralela ao plano de rotação.
v_	<b></b> →	Velocidade do vento não-perturbado (laminar).

# Letras gregas

- $\alpha \longrightarrow \text{ Angulo de ataque da pá.}$
- $\beta \longrightarrow \text{Coordenada generalizada } flap.$

Velocidade relativa do vento.

- δ Ângulo entre a direcão do vento não-perturbado e a direção do eixo do rotor (yaw angle).
- θ Ângulo de posicionamento, medido a partir do plano de rotação até a direção da corda da pá.



- $\psi$   $\longrightarrow$  Ângulo de azimute ( $\psi$  = 0 $^{\circ}$  posição vertical para baixo).
- λ Razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento (tip speed ratio).
- $ho \longrightarrow ext{Vetor posição de um ponto arbitrário na pá.}$
- $ho_{
  m ar} \quad \longrightarrow \quad {
  m Massa \ especifica \ do \ ar.}$
- $\omega_{\mathcal{B}} \longrightarrow ext{Frequência natural de flexão na direção de } flap.$
- $\omega_{\zeta} \longrightarrow$  Frequência natural de flexão na direção de lag.
- $\Omega \longrightarrow Velocidade angular do rotor.$
- $\zeta \longrightarrow ext{Coordenada generalizada lag.}$

#### abreviações

TEEH --- Turbina Eólica de Eixo Horizontal.

### GLOSSÁRIO

Neste trabalho tentou-se, tanto quanto possível, introduzir palavras da língua portuguesa para designar os termos (em inglês) usados internacionalmente nos textos sobre turbinas eólicas de eixo horizontal. Alguns deles, por serem muito concisos e auto-explicativos foram mantidos em inglês. Em seguida serão definidos os principais termos técnicos deste trabalho.

Arrasto ≡ draq

Força aerodinâmica que atua num aerofólio na mesma direção da velocidade relativa do vento .

Azimute = azimuth

Angulo que define a posição da pá no plano de rotação, medido a partir da vertical abaixo do centro de rotação.

xiv

Downwind

Designação de turbinas eólicas com a seguinte característica: o rotor é posicionado atrás da torre em relação ao sentido de incidência do vento.

Excentricidade = off-set

Distância do centro de rotação até a articulação onde se localizam as molas do modelo mecânico de uma pá (ver Fig. 5.1).

Flap

Movimento da pá na direção perpendicular à corda da pá.

Giro ≡ yaw

Movimento de giro feito pelo conjunto nacele/rotor com a finalidade de posicionar o rotor perpendicularmente em relação à direção do vento incidente.

Lag

Movimento da pá na direção paralela à corda da pá.

Nacele ≡ nacelle

Compartimento localizado no topo da torre de uma turbina eólica de eixo horizontal que abriga o gerador, o multiplicador de velocidades, o freio mecânico e os eixos (ver Figura 1.1).

Sombra da torre ≡ tower shadow

Diminuição da velocidade do vento que atinge as pás de uma turbina eólica decorrente da obstrução do fluxo de vento pela torre.

Stall

Efeito aerodinâmico não-linear caracterizado pela ocorrência de vórtices ao redor de um aerofólio alterando a resultante das forças aerodinâmicas.

Sustentação ≡ lift

Força aerodinâmica que atua num aerofólio na direção perpendicular à velocidade relativado vento. Em condições normais de operação, ela é muito maior que a força de arrasto.

Turbina eólica de eixo horizontal ≡ horizontal-axis wind turbine

Máquina que capta energia do vento e produz eletricidade. Os principais componentes estruturais são : torre, nacele e rotor (ver Figura 1.1).

# Upwind

Designação de turbinas eólicas com a seguinte característica: o rotor é posicionado na frente da torre em relação ao sentido de incidência do vento.

# ÍNDICE

Re	esumo	vi
ΑÌ	bstract	viii
L	ista de Símbolos	Х
G.	lossário	xiii
1	INTRODUÇÃO	1
2	CARACTERIZAÇÃO DO VENTO	7
	2.1 Introdução	7
	2.2 Movimentos atmosféricos	8
	2.3 Radiação solar	9
	2.4 Rotação da terra	10
	2.5 Modelo atmosférico tricelular	11
	2.6 Efeitos topográficos	13
	2.6.1 Gradiente de velocidade de vento	13
	2.6.2 Brisas marítimas e terrestres	15
	2.6.3 Ventos anabáticos e catabáticos	16
	2.7 Caracterização do vento	17
	2.8 Turbulência	20
	2 0 Deiede de vente	2.2

3	FORÇAS	<b>ATUANTES</b>	EM	TURBINAS	EÓLICAS
---	--------	-----------------	----	----------	---------

DE EIXO HORIZONTAL	25
<b>3.1</b> Introdução	25
3.2 Forças aerodinâmicas	29
3.2.1 Teoria do elemento de pá	29
3.2.2 Gradiente vertical de velocidade de vento	34
3.2.3 Sombra da torre	36
3.2.4 Desalinhamento do eixo do rotor	38
3.2.5 Inclinação do eixo do rotor	39
3.2.6 Cargas aerodinâmicas combinadas	40
3.3 Forças inerciais (mecânicas)	41
3.3.1 Forças gravitacionais	41
3.3.2 Ângulo de cone	43
3.3.3 Forças giroscópicas	44
3.3.4 Forças de Coriolis	45
3.3.5 Forças transientes	46
3.3.6 Condições especiais (anormais)	46
3.4 Turbulência	48
4 MODELAGEM DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL	51
<b>4.1</b> Introdução	51
4.2 Modelos para análise	53
4.3 Modelo analítico	56
4.4 Elementos finitos	60
4.5 Solução das equações de movimento	65

5 MODELO MATEMÁTICO DO ROTOR.....

67

	<b>5.1</b> Introdução	67
	5.2 Modelo mecânico	68
	5.3 Sistemas de coordenadas	71
	5.4 Equações de movimento de uma pá	74
	5.5 Linearização das equações	82
6	ANÁLISE AERODINÂMICA DO ROTOR	85
	6.1 Introdução	85
	6.2 Forças aerodinâmicas	86
	6.3 Forças generalizadas	98
7	ANÁLISE AEROELÁSTICA DE UMA PÁ	101
	<b>7.1</b> Introdução	101
	7.2 Frequências naturais	104
	7.3 Respostas dinâmicas em regime	113
	7.4 Respostas transientes	121
	7.5 Respostas dinâmicas devido à turbulência	129
8	conclusões	142
R	eferências	146
Al	NEXO - CARACTERÍSTICAS DA TURBINA EÓLICA	
	DE FERNANDO DE NORONHA	154

# CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

# A energia eólica

O vento constitui uma imensa fonte de energia natural a partir da qual é possível produzir atualmente grandes quantidades de energia elétrica. Além de ser uma fonte inesgotável de energia, a energia eólica esta longe de ser causadora de problemas ambientais. As novas turbinas eólicas não causam poluição sonora e não ocupam grandes extensões de terreno. Da área total de uma fazenda eólica apenas cerca de 1% é ocupada pelas turbinas deixando a área praticamente livre para continuar sendo usada para a agricultura, pecuária ou para permanecer como habitat natural.

Com os desenvolvimentos tecnológicos dos últimos anos a energia eólica se tornou economicamente competitiva com as formas mais baratas de produção de eletricidade existentes. Na Califórnia (EUA), o custo da eletricidade produzida pelo vento atualmente está em torno de 7 cents/kWh para velocidades médias de vento de 7 m/s. No Nordeste do Brasil, que possui maior potencial eólico que a Califórnia, estima-se que o custo da

energia possa ficar entre 5 e 7 cents/kWh. Além disso, o uso da energia eólica tem um papel importante na economia de combustíveis fósseis que são caros e limitados. As consequências diretas são : a diminuição da dependência destes combustíveis, o aumento da segurança no suprimento de energia e a possibilidade de utilização dos combustíveis fósseis (principalmente o petróleo) para outros fins.

Existem mais de 20.000 turbinas eólicas em operação no mundo, produzindo mais de 2 bilhões de kWh anualmente. A energia eólica já é, hoje, a fonte de 2% de eletricidade da Dinamarca (com 3.000 turbinas e uma capacidade instalada de 360 MW) e 1% do estado da Califórnia (que tem mais de 15.000 turbinas em operação). O continente europeu planeja ter, até o ano 2030, 100.000 MW de capacidade instalada de fonte eólica, o que equivale a 10% de toda a energia consumida na Europa.

#### Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal - TEEHs

Turbinas eólicas de eixo horizontal, como ilustra a Figura 1.1, são muito semelhantes, estruturalmente falando, aos helicópteros. Ambos são constituídos por componentes estruturais (torre/rotor e fuselagem/rotor) que possuem rotação relativa entre si. É esta importante característica que as distingue das demais estruturas de engenharia. Por isso, os primeiros projetos de turbinas eólicas foram baseados nos estudos sobre

helicópteros. Porém, devido às características especiais das turbinas - altura da torre, perfil aerodinâmico das pás, rotação do rotor, giro da nacele, etc. - verificou-se a necessidade de uma análise específica para este tipo de estrutura.

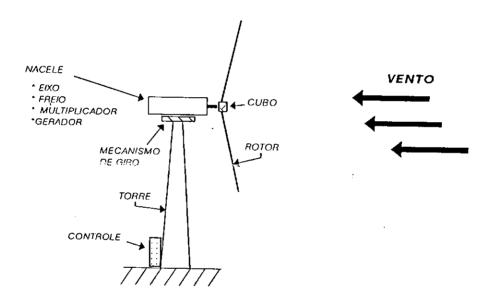


Figura 1.1 - Turbina Eólica de Eixo Horizontal

Uma turbina eólica é composta de vários elementos que interagem entre si e, nos últimos anos, com a utilização de componentes mais flexíveis, o comportamento dinâmico estrutural e a capacidade de prevê-lo se tornaram fundamentais. As grandes amplitudes de vibração consequentes da maior flexibilidade dos componentes das turbinas podem provocar grandes forças inerciais e, em alguns casos, instabilidades.

As principais forças externas são as cargas aerodinâmicas atuantes no rotor. Porém, em turbinas eólicas off-shore as forças originadas pelas correntes marítimas e ondas que atingem diretamente a torre também são importantes.

O vento, matéria-prima da energia eólica, é resultado da combinação de vários fenômenos atmosféricos e da interação com o relevo. Uma descrição das principais causas dos movimentos atmosféricos é feita no capítulo 2. O fluxo de vento possui uma componente aleatória (turbulenta) que só pode ser caracterizada através de métodos estatísticos. A vibração das pás devido à turbulência "espacial" é um fenômeno muito complicado e a modelagem deste vento turbulento é considerada uma das etapas mais difíceis da análise.

As forças que atuam numa turbina eólica podem ser separadas em dois grandes grupos : forças determinísticas (aerodinâmica, inercial e estrutural) e forças estocásticas (turbulência). Estas forças excitam dinamicamente o sistema numa frequência e intensidade que dependem das características do fluxo de vento e da estrutura. Ao final do capítulo 3, onde estas forças são discutidas de forma qualitativa, tem-se uma idéia do "ambiente" aeroelástico e aerodinâmico em que operam as turbinas eólicas.

Para se estudar a dinâmica estrutural de TEEHs, um modelo matemático pode ser feito utilizando-se modelos analíticos ou o método de elementos finitos. A principal complicação para o

modelo estrutural surge em função da rotação relativa entre o rotor e a torre. É esta característica (rotação relativa entre componentes estruturais) que inviabiliza o uso das técnicas comuns de elementos finitos. O procedimento que permite o uso desta técnica é ilustrado no capítulo 4. Também são discutidas as características especiais (termos periódicos, Coriolis, etc.) das equações de movimento do sistema torre/rotor e as vantagens e desvantagens de se usar modelos analíticos ou o método de elementos finitos.

Nos capítulos 5 e 6 são desenvolvidas as equações de movimento de uma pá com dois graus de liberdade. A pá é modelada como uma barra rígida articulada com molas que permitem o movimento de corpo rígido (rotação) em flap e lag. As equações lagrangeanas não-lineares de movimento são obtidas através do princípio de Hamilton (capítulo 5) e as forças aerodinâmicas generalizadas são calculadas pela teoria do elemento de pá (capítulo 6). Todo o desenvolvimento algébrico das equações é com um software de álgebra simbólica. As forças generalizadas são compostas de um vetor de forças aerodinâmicas e das matrizes de amortecimento e rigidez aerodinâmica. Os efeitos do gradiente vertical de velocidade de vento (wind shear) e do desalinhamento do eixo do rotor em relação à direção do vento misalignment) incluídos são na análise aerodinâmica, entretanto, os efeitos dinâmicos não-lineares de "dynamic inflow" não são considerados.

No capítulo 7 as equações linearizadas da pá e as forças generalizadas (também linearizadas) são utilizadas para investigar o comportamento dinâmico de uma pá de turbina eólica. Os dados geométricos e estruturais de uma pá LM 8.5VX ~ que corresponde à pá usada na turbina eólica em operação na ilha de Fernando de Noronha foram usados. Registros de vento (velocidade média, rajadas, direções predominantes, etc.) local onde a turbina está instalada serviram de referência para o cálculo das forças aerodinâmicas. A resposta dinâmica em regime é estudada para várias condições de vento e a resposta transiente é obtida para algumas situações especiais como, partida de máquina e paradas de emergência. Também é feito um estudo preliminar da influência de rajadas de vento discretas na resposta dinâmica da pá. As rajadas são modeladas por três funções diferentes : tipo degrau, tipo rampa e um-menos-cosseno.

A resposta dinâmica devido às cargas estocásticas é obtida através de simulações do vento turbulento. Sinais de velocidade do vento X tempo são gerados a partir de espectros de vento e utilizados para o cálculo das forças aerodinâmicas turbulentas.

# CAPÍTULO 2

# CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

# 2.1 Introdução

Para que um projetista seja capaz de entender e prever o comportamento dinâmico de uma turbina eólica é essencial que ele tenha algum conhecimento a respeito da estrutura e características do vento. Este conhecimento faz-se necessário, também, se as turbinas e as estruturas que as suportam são projetadas para resistirem às cargas impostas com segurança e a um custo economicamente viável.

O desenvolvimento de componentes sofisticados, como as pás do rotor, o mecanismo de giro e o sistema de controle, só podem ser otimizados se forem conhecidas características do vento no local, tais como: o nível de turbulência, o gradiente de velocidades de vento, as frequências de ocorrências em cada direção (rosa dos ventos), etc. Mas, o comportamento e estrutura dos ventos variam de local para local dependendo das condições climáticas da região, aspectos topográficos, características da superfície e vários outros fatores [11].

Neste capítulo são descritos os principais fenômenos que

Neste capítulo são descritos os principais fenômenos que ocorrem em nossa atmosfera, responsáveis pelos movimentos atmosféricos e alguns métodos (estatísticos) utilizados para se caracterizar o vento numa região, visando o aproveitamento do potencial eólico.

#### 2.2 Movimentos atmosféricos

Os movimentos atmosféricos variam desde os movimentos aleatórios de moléculas individuais até a circulação zonal que envolve toda a atmosfera (ver Tabela 2.1). Em meteorologia, estes movimentos são agrupados em três escalas de comprimento [38]: microescala, mesoescala e escala sinótica. A microescala inclui movimentos com dimensões menores ou iguais a 20 Km e escalas de tempo menores que 1 hora. A escala sinótica compreende movimentos com dimensões características maiores ou iguais a 500 Km e períodos de 2 dias ou mais. A mesoescala é intermediária entre as duas anteriores.

Tabela 2.1 - Movimentos atmosféricos

NOXE	T E N P O	COMPRIMENTO	EXEMPLO
CIRCULAÇÃO	SEMANAS /	DE 1000 Km	VENTOS COMERCIAIS
GERAL	ANOS	A 40000 Km	(TRADE WINDS)
ESCALA	DIAS /	DE 100 Km	F U R A C ÕES
SINÓTICA	SEMANAS	A 5000 Km	
MESOESCALA	HINUTOS /	DE 1 Km	TEMPESTADES,
	BAID	A 100 Km	BRISAS MARÍTIMAS
MICROESCALA	SEGUNDOS / MINUTOS	< 20 Km	TURBULÊNCIA, RAJADAS

A circulação atmosférica tem sua origem em dois fenômenos principais : <u>radiação</u> <u>solar</u> e <u>rotação</u> <u>da terra</u>.

## 2.3 Radiação solar

Da energia emitida constantemente pelo sol, cerca de metade da radiação incidente é absorvida pela superfície da Terra. Um pouco mais que a metade dela é dispersada na atmosfera por causa das nuvens, poeira, vapor d'agua, etc.

A radiação devolvida pela superfície terrestre é chamada de <u>radiação</u> <u>terrestre</u> e acontece de 3 maneiras distintas:

- 1. Por reflexão que depende do tipo da superfície. Por exemplo, a neve é muito refletora, isto é, tem baixíssima capacidade de absorção enquanto que a água possui alta absorção de energia solar na superfície.
- 2. Por condução ocorre significativamente apenas numa fina camada de ar que adere à superfície (cerca de 1 mm de espessura).
- 3. Por convecção que envolve a troca vertical de massas de ar. Esta troca pode ocorrer naturalmente por diferença de densidade de uma massa de ar em relação à sua vizinhança ou pode ser de forma forçada, por exemplo quando o vento passa por um terreno bastante rugoso.

Este processo de aquecimento do ar atmosférico que depende de inúmeros fatores como o mês do ano, hora do dia, latitude, condições climáticas, etc. origina continuamente

gradientes de pressão horizontal e vertical por toda a atmosfera. Estas forças são as responsáveis por manterem o ar em movimento.

#### 2.4 Rotação da terra

A inércia tende a empurrar as massas de ar frio perto da superfície da Terra para o oeste, enquanto que o ar quente na camada superior da atmosfera é desviado para o leste. Isto causa um movimento das massas de ar em torno das áreas de baixa pressão no sentido horário no hemisfério sul e anti-horário no hemisfério norte.

Outro efeito da rotação da Terra é a força de CORIOLIS, que age sobre toda partícula que se move sobre a superfície terrestre. Para entendermos os efeitos da força de *Coriolis* usaremos o seguinte exemplo : A Figura 2.1 mostra uma partícula de ar se movendo em linha reta do pólo norte até um ponto P' situado em um paralelo. Na realidade a partícula atingirá o ponto P e para um observador na Terra a partícula foi desviada para oeste de uma distância  $\overline{P'P}$ . Se o movimento tivesse ocorrido no hemisfério sul o desvio teria sido para leste.

A força de Coriolis é expressa por

$$C = 2 \Omega v sen \phi (2.1)$$

onde  $\Omega$  é a velocidade de rotação da Terra (7,29·10 $^{-5}$  rad/s), v é a velocidade da partícula (vento) e  $\phi$  é a latitude.

A força de *Coriolis* atua em todas as partículas móveis exceto naquelas que estão sobre a linha do equador. No entanto, seu valor é, em geral, desprezível a não ser para o caso de partículas com grandes velocidades.

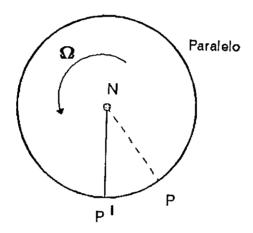


Figura 2.1 - Movimento aparente de uma partícula devido à rotação da Terra.

### 2.5 Modelo atmosférico tricelular

Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de sua órbita ao redor do sol há um desigual aquecimento no planeta.

Na linha do Equador e perto dela existe uma contínua faixa de baixa pressão (doldrums) que está relacionada ao maior aquecimento solar. Em cada hemisfério, existem três células individuais (Figura 2.2) : a célula tropical, a temperada e a

polar. A interface entre elas não é bem definida havendo uma certa interferência de uma na outra. Os famosos ventos comerciais (trade winds) são originados nas células tropicais, entre as regiões de alta pressão (latitude 30°) e a região de baixa pressão do Equador. No hemisfério Norte estes ventos sopram do nordeste e no hemisfério Sul sopram do sudeste. Nas células temperadas os ventos sopram em direções contrárias aos ventos comerciais. Este modelo de circulação tricelular recebe, também, a influência dos efeitos sazonais e geográficos.

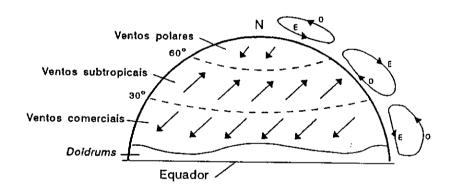


Figura 2.2 - Modelo tricelular da atmosfera.

Os efeitos sazonais consistem de variações na posição e intensidade das faixas de pressão, que são causadas pela mudança da posição da Terra em relação ao Sol durante o ano. Os efeitos geográficos são causados pela diferença nas propriedades físicas, e pela distribuição desigual de água e terra no planeta. Também existem perturbações atmosféricas criadas por massas de ar frio que se movem, de vez em quando,

dos pólos para o Equador.

Alguns fatores influenciam apenas localmente a circulação do ar e são de grande importância para a avaliação do potencial eólico de uma região. Em seguida alguns destes fatores serão comentados.

# 2.6 Efeitos topográficos

## 2.6.1 Gradiente de velocidade do vento

outro fenômeno que causa grande Um influência circulação do ar na camada da atmosfera, entre a superfície e a atmosfera livre, é o gradiente vertical de velocidade do vento (wind shear). A superfície da Terra exerce uma força horizontal (devido à rugosidade do terreno, obstáculos e outras características topográficas) que tende a retardar o fluxo de vento. Esta força de fricção diminui com a altura até atingir uma região onde o vento flui livremente ao longo das isóbaras, chamada de atmosfera livre (em torno de 3000 m). Além de diminuir a velocidade do vento, a força de fricção exercida pelo solo é, também, uma das causas da existência turbulência no fluxo de vento.

A variação da velocidade de vento com a altura pode ser bem representada por uma lei logarítmica [24 e 38] ou pela seguinte lei exponencial:

$$V = v_o \cdot \left(\frac{h}{H}_o\right)^p \qquad (2.2)$$

onde v é a velocidade do vento medida a uma altura H (geralmente 10 m) acima do solo, V é a velocidade do vento a uma altura h, e p é uma constante cujo valor varia de 0.10 a 0.40 dependendo das condições topográficas do lugar. A Figura 2.3 mostra a variação da velocidade do vento em relação à altura para diferentes tipos de terrenos.

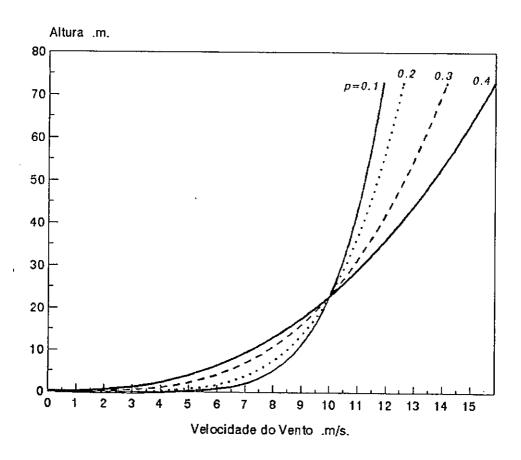


Figura 2.3 - Variação da velocidade do vento com a altura (efeito da rugosidade do solo).

A lei exponencial (2.2) foi utilizada com os seguintes dados :  $v_o = 10$  m/s e  $H_o = 23$  m . Terrenos planos e pouco

rugosos (expoente p pequeno) apresentam um pequeno gradiente de velocidades. Enquanto que terrenos muito rugosos (p = 0.3 e 0.4) apresentam grande variação da velocidade com a altura e mais turbulência. A Figura 2.3 mostra curvas de gradientes de velocidade de vento típicas de terrenos planos. Porém, terrenos acidentados e com obstáculos (naturais ou artificiais) podem provocar variações verticais de velocidade bastante irregulares como a mostrada na Figura 2.4.

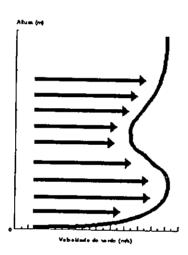


Figura 2.4 - Gradiente vertical de velocidade de vento irregular (terrenos acidentados).

## 2.6.2 Brisas marítimas e terrestres

Estes ventos são originados por diferenças de pressão localizadas em áreas costeiras. Ocorre sempre que há uma diferença de temperatura considerável entre a terra e a massa de água adjacente.

Como o calor específico do solo é bem menor que o da água a temperatura do ar se eleva mais rápido sobre o continente do que sobre o mar. O ar quente, então, se expande, fica mais leve e sobe forçando o ar frio e mais pesado que está sobre o mar a tomar seu lugar. Este fluxo é chamado de brisa marítima. À noite este fluxo se inverte uma vez que o solo se resfria mais rápido que o mar, gerando a brisa terrestre.

# 2.6.3 Ventos anabáticos e catabáticos

Uma diferença de pressão acontece comumente em sistemas de montanhas e vales. Durante o dia o ar aquecido nas encostas das montanhas sobe e o ar frio acima dele toma seu lugar (Figura 2.5), gerando os ventos anabáticos. Durante a noite a direção do fluxo é invertida (ventos catabáticos) e o ar frio que desce das montanhas fica estagnado nos vales.

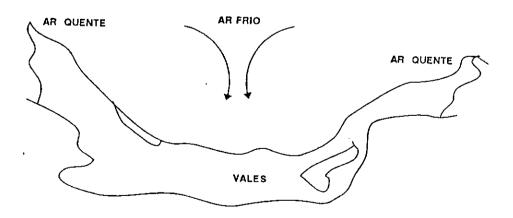


Figura 2.5 - Ventos Anabáticos.

# 2.7 Caracterização do vento

As variações da velocidade do vento são totalmente aleatórias e, é natural que se tente caracterizar este comportamento utilizando parâmetros estatísticos obtidos de medidas da velocidade do vento.

A escolha do melhor local para a instalação de turbinas eólicas, a quantidade de energia elétrica que será gerada anualmente por uma turbina eólica, o projeto estrutural de componentes da turbina, e, o projeto do sistema de controle são fortemente dependentes de uma caracterização precisa do vento em uma região.

As medidas das variações da velocidade de vento no tempo podem ser divididas em 4 tipos conforme em :

- 1. INTRA-ANUAL
- 2. ANUAL
- 3. DIÁRIA
- 4. CURTA (turbulência e rajadas de vento)
- 1. Variação de velocidade de vento INTRA-ANUAL

Para obter a velocidade média anual de um determinado local os metereologistas consideram prudente coletar dados por 10 anos ou mais, a fim de poderem incluir a ocorrência de todos os ciclos anuais.

#### 2. Variação de velocidade de vento média ANUAL

A velocidade de vento média anual é um fator importante a ser conhecido para a escolha de um local adequado para instalação de turbinas eólicas. Este valor indica o potencial eólico (expresso em Watts/m²) de um local. Locais com velocidades médias anuais entre 5 e 6 m/s são considerados atrativos para geração de eletricidade através do vento.

A variação da velocidade do vento registrada durante o ano é fortemente influenciada pela circulação geral dos ventos na superfície da Terra. Esta variação indica quais os períodos em que as turbinas eólicas estarão gerando mais energia e quais os períodos de baixa geração de eletricidade. Estes dados servem, por exemplo, para se fazer a programação de paradas para manutenção.

Segundo dados coletados pelo Grupo de Energia Eólica da UFPE, na ilha de Fernando de Noronha, o período em que os ventos são mais fortes, no Nordeste do Brasil, é entre os meses de agosto e novembro (quando a média mensal fica em torno de 8.5 m/s) enquanto que nos meses de fevereiro, março e abril ocorrem os valores mínimos. As Tabelas 2.2 exemplificam esta variação. No mês de outubro/91 a velocidade média do vento foi de 8.66 m/s e a direção predominante foi SSE (42.2%); neste período não houve calmaria. A tabela do mês de março/92 apresenta o valor 5.77 m/s para a velocidade média do vento no período; a direção predominante foi SE (28.95%) e houve 1.03% de calmaria.

Tabelas 2.2 - Distribuição de velocidades e frequências de incidência de ventos nos meses de outubro/91 e março/92 na ilha de Fernando de Noronha.

OCTOBER, 1991 WIND SPEED (m/s) AND DIRECTION FREQUENCIES

DIRECTION	0-2.5	2.5-5	5-7.5	7.5-10	10-12.5	)12.5	TOTAL	HEAN
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	000000000000000000000000000000000000000	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0		0.00 0.00 0.00 0.27 15.19 22.85 31.42 0.00 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0	9.999 9.999 9.999 9.999 9.999 9.999 9.999 9.999	00000000000000000000000000000000000000	90000000000000000000000000000000000000
CALX TOTAL	0.00	0.27	13.71	72.72	13.31	6.00	0.00	8.66

WIND SPEED (m/s) AND DIRECTION FREQUENCIES

DIRECTION	0-2.5	2.5-5	5-7.5	7.5-10	10-12.5	)12.5	TOTAL	HEAN
N NEE ESE SSI II	0.41 0.00 0.41 0.21	0.00 0.21 1.23 2.67 2.87 5.75 8.42	0.00 0.00 0.21 1.85 11.79 10.68 6.78 1.65 0.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.21 11.55 4.11 1.00 0.00	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.0	9.999999999999999999999999999999999999	1.64 5.13 28.95 26.49 22.18 4.72 3.90 0.21	4.56 2.10 2.90 3.59 4.66 6.93 6.48 5.420 4.75 2.00 2.00 4.98
CALH							1.03	
TOTAL	10.88	24.85	36.34	23.20	3.70	9.00		5.77

### 3. Variação de velocidade de vento DIÁRIA

As variações de velocidade de vento diárias são causadas por aquecimento diferenciado da superfície da Terra. Esta variação tem, geralmente, como característica a elevação da velocidade do vento durante o dia.

Estas variações de velocidade afetam de forma significativa a função das turbinas eólicas de suprir o pico de carga da rede elétrica. Por exemplo, para a maioria dos locais os ventos durante o dia são mais fortes que durante a noite e, se o pico de carga (normal + adicional) ocorre durante o dia, então o suprimento normal pode ser fornecido pelo sistema existente e o adicional pelas turbinas eólicas.

### 4. Variação de velocidade de vento CURTA

Para o uso de energia eólica existem, basicamente dois intervalos de medição do vento : 10 minutos e 1 segundo.

O primeiro reune os valores médios dos dados coletados a cada segundo durante o intervalo. Estes valores podem ser empregados para estimar a performance de uma turbina eólica e a energia que pode ser gerada. Por outro lado, intervalos pequenos como 1 s fornecem dados importantes sobre a turbulência do vento.

#### 2.8 Turbulência

A Turbulência é caracterizada pela constante variação da velocidade e direção do vento em torno de um valor médio. O

gráfico da Figura 2.6 mostra um registro de vento turbulento processado pelo Grupo de Energia Eólica da UFPE com os dados coletados por um anemógrafo computadorizado instalado na ilha de Fernando de Noronha. A velocidade do vento é dada em milhas por hora (1 mph = 0,447 m/s) e a turbulência é descrita por um parâmetro estatístico chamado de intensidade de turbulência. Este parâmetro é a razão entre o desvio padrão dos valores de velocidade de vento e o valor médio destes valores.

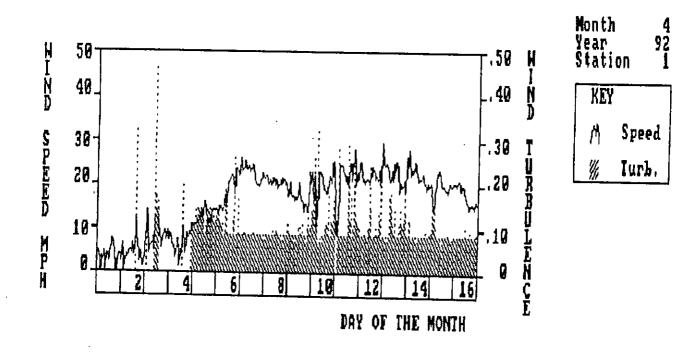


Figura 2.6 - Registros de vento turbulento [12].

Como já foi mencionado antes, a turbulência é causada, principalmente, por gradientes de pressão (horizontal e vertical) na atmosfera e pela interferência do solo

(rugosidade) no fluxo de vento. As características turbulentas do vento são, também, dinâmicas, isto é, estão mudando constantemente. Por isso, a caracterização do fluxo turbulento em um determinado local não pode ser extrapolada para um outro local mais à frente na direção do fluxo.

A intensidade e frequência contida no vento turbulento são influenciados fortemente pela estabilidade atmosférica. A estabilidade atmosférica está relacionada com a variação vertical da temperatura do ar. Instabilidade atmosférica ocorre geralmente nas manhãs e tardes de dias ensolarados quando a temperatura do solo é maior que a do ar acima dele.

A turbulência tem dois efeitos adversos :

- 1. Decréscimo da potência eólica disponível.
- 2. Vibrações e ação desigual do vento na turbina eólica que pode causar danos nos componentes estruturais da turbina (principalmente fadiga dos materiais).

Como regra geral, ao se escolher um local para instalação de turbinas eólicas deve-se evitar tanto quanto possível regiões de turbulência. Pois, minimizando a turbulência nas pás do rotor e na estrutura da torre aumenta-se a vida útil dos componentes da turbina e ao mesmo tempo maximiza-se a potência extraída do vento.

Existe um outro fenômeno que está associado à turbulência chamado de <u>rajada de vento</u>.

## 2.9 Rajada de vento

Uma rajada de vento é um evento distinto dentro da estrutura turbulenta do vento e é definida por uma variação da velocidade do vento com uma certa amplitude e duração. Em simulações no tempo diversos tipos de funções são usadas para representar as rajadas de vento discretas.

A análise de rajadas de vento é importante para verificação da resistência estrutural de uma turbina eólica. Por exemplo, rajadas extremas - a maior rajada de vento que o sistema provavelmente encontrará ao longo de sua vida útil - são usadas para determinar os limites de resistência das pás e de toda a estrutura.

Vários modelos de rajadas de vento existem [7,16 e 31] e medidas experimentais continuam sendo feitas para validar e/ou corrigir tais modelos.

A turbulência discutida até aqui refere-se à variação horizontal velocidade média do vento. da Dados do fluxo horizontal podem ser obtidos através de um único anemógrafo posicionado à uma certa altura [12]. Porém, a descrição da turbulência medida desta forma não representa completamente a situação real. A turbulência "vista" por uma pá girando é uma turbulência espacial (ver Figura 2.7). Uma estimativa quantitativa da turbulência espacial pode ser feita através de funções de correlação espacial e de coerencia a partir dos dados de vento coletados por dois anemógrafos instalados num mesmo local.

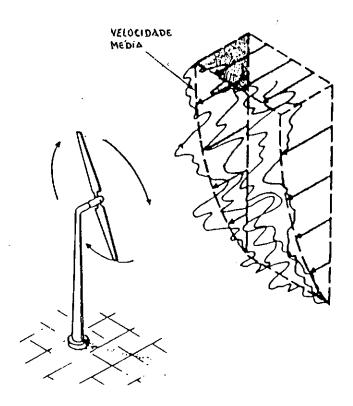


Figura 2.7 - Fluxo de vento turbulento "visto" por uma turbina eólica.

Detalhes da turbulência espacial, caracterização do vento turbulento e técnicas experimentais de medição são discutidas com detalhes por Rohatgi [38].

## CAPÍTULO 3

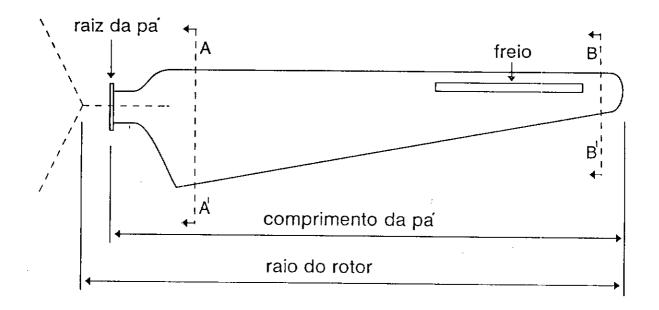
## FORÇAS ATUANTES EM TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

### 3.1 Introdução

Um dos aspectos que mais desafiam os projetistas de turbinas eólicas em especial as de eixo horizontal, TEEHs, é a especificação das cargas de projeto. Isto se deve ao fato de as turbinas eólicas estarem sujeitas à uma grande quantidade de diferentes tipos de forças. A grande maioria destas forças são de origem aerodinâmica e atuam no rotor da turbina o que torna o projeto das pás do rotor muito importante.

A Figura 3.1 mostra uma pá típica e define sua geometria. Duas seções transversais, uma perto da raiz da pá (AA') e outra perto da ponta da pá (BB') são usadas para mostrar o ângulo de torção da pá. A corda de uma seção transversal é a distância que une a borda de ataque à parte traseira da pá. Assume-se que a direção da corda na ponta da pá é coincidente com a direção de rotação; assim, o ângulo que mede a torção da seção AA' é definido a partir do plano de rotação até a corda da seção.

É interessante notar que o ambiente de uma turbina



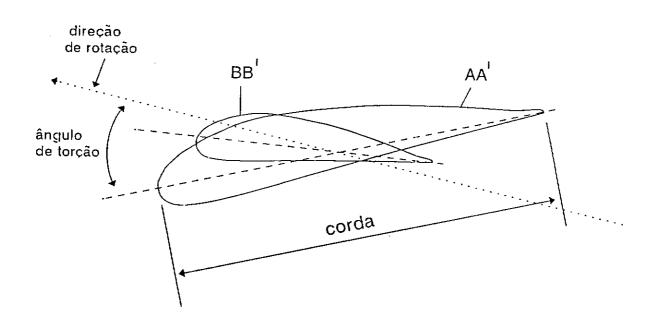


Figura 3.1 - Características geométricas de uma pá.

eólica, ou seja, a interação vento/estrutura é muito mais complexa que a que ocorre em um avião ou em uma plataforma de petróleo off-shore.

A característica turbulenta (ou estocástica) do vento provoca importantes cargas dinâmicas que, geralmente, são maiores que as esperadas [21]. E como a turbulência e outras condições extremas do vento não podem, ainda, ser perfeitamente descritas matematicamente a especificação do carregamento dinâmico de uma turbina eólica permanece bastante aproximada [10].

Várias são as razões da dificuldade de se expressar matematicamente as forças aerodinâmicas de projeto [26]; entre elas pode-se citar :

- 1. O fluxo de vento turbulento que atinge a turbina é totalmente estocástico.
- 2. As frequências de excitação do vento turbulento estão espalhadas em uma larga faixa de frequências que incluem, inclusive, as frequências naturais da estrutura.
- 3. A rotação do rotor induz uma excitação paramétrica na estrutura das pás.
- 4. Efeitos aerodinâmicos não-lineares como o stall e o vento cruzado afetam de forma significativa as cargas dinâmicas nas pás e estão ocorrendo constantemente durante operação.

5. O sistema de controle interage dinamicamente com a estrutura provocando grandes forças transientes. Estas forças surgem principalmente em operações de frenagem, controle aerodinâmico ativo e controle de torque eletromagnético.

Características dos ventos de uma região, tais como a variação da velocidade altura COM а predominância е regularidade da incidência do vento, são de grande importância no das forças aerodinâmicas. Da mesma forma. características estruturais da turbina eólica definem condições especiais de carregamento. Algumas destas características são : o tipo da turbina (upwind - o vento atinge o rotor antes da torre; ou downwind - o vento passa pela torre antes de atingir o rotor), o ângulo de inclinação do eixo do rotor (tilt angle), o tipo e velocidade do mecanismo de giro (yaw motion) e a configuração do sistema de controle.

A seguir, serão feitas descrições das principais forças que atuam em TEEHs e comentários a respeito da importância, causas e consequências destas forças, com o intuito de melhor esclarecer o "ambiente" aeroelástico e aerodinâmico em que são projetadas tais máquinas.

As forças que atuam em uma turbina eólica podem ser divididas em dois grandes grupos : forças determinísticas e forças estocásticas (turbulentas). As forças determinísticas podem ser de origem aerodinâmica ou inercial.

## 3.2 Forças aerodinâmicas

## 3.2.1 Teoria do elemento de pá

As principais forças e momentos aerodinâmicos que atuam no rotor de uma turbina eólica podem ser calculados através da teoria desenvolvida por Glauert conhecida como Teoria do Elemento de Pá (Momentum Vortex Blade Element Theory).

Esta teoria [10,32 e 38] não considera a periodicidade do fluxo de vento causada pelo rotor com um número finito de pás. Pois, ela se baseia na afirmação de que pequenas seções radiais das pás podem ser analisadas independentemente; uma premissa que é verdadeira apenas para rotores com um número infinito de pás.

A partir desta consideração a pá é dividida em pequenos elementos radiais que tem as mesmas propriedades aerodinâmicas como se a pá tivesse comprimento infinito, com a mesma corda e perfil. O procedimento é calcular as forças em cada elemento infinitesimal de pá e, em seguida, integrar ao longo do comprimento da pá a fim de se obter as expressões finais do torque e da pressão aerodinâmica. Usando-se os coeficientes C<sub>L</sub> e C<sub>D</sub> medidos experimentalmente em túneis de vento (aproximações 2D) as forças de sustentação (Lift), L, e arrasto (Drag), D, podem ser expressas por

$$dL = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) W^2 dr \qquad (3.1)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_D(\alpha) W^2 dr$$
 (3.2)

A Figura 3.2 mostra uma seção transversal da pá de uma turbina eólica, vista da ponta para a raiz.

A velocidade relativa do vento, W, varia com a posição radial r e é composta de uma componente axial u(r) e uma componente rotacional  $r\Omega$  + w(r). O termo  $r\Omega$  representa a velocidade da pá devido à rotação do rotor, e o termo  $r\Omega a'$  representa o movimento do ar devido à rotação.

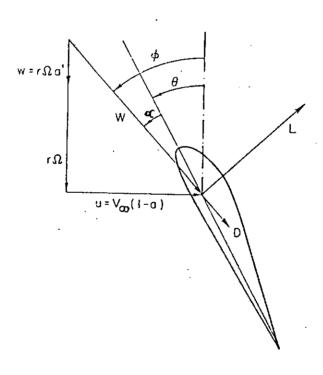


Figura 3.2 - Elemento de pá.

Na Fig. 3.2, as componentes u(r) e w(r) da velocidade relativa estão escritas em função de a e a', que são os fatores de interferência (ou indução) axial e tangencial, respectivamente. Eles são definidos na teoria do disco atuador de

Rankine-Froud [10, 17 e 32]. Esta teoria fornece uma relação entre as forças atuantes no rotor e as velocidades de vento resultantes e, determina a eficiência ideal para um rotor.

Para valores altos (maiores que 3) da razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento (tip speed ratio),  $\lambda$ , o fator de interferência axial, a, se aproxima do valor  $\frac{1}{3}$  enquanto que a' se aproxima de zero. Portanto, nas atuais turbinas eólicas de grande porte (que apresentam  $\lambda$  » 1) a velocidade do vento que passa pelo rotor axialmente é aproximadamente  $\frac{2}{3}$  da velocidade do vento não-perturbado à frente do rotor.

Segundo a Figura 3.2, o ângulo  $\phi$  é definido como o ângulo entre a velocidade relativa W e o plano de rotação, que é perpendicular ao plano do papel. Também estão representados na figura o ângulo de ataque,  $\alpha$ , medido da direção da corda da pá à direção da velocidade relativa e o ângulo de posicionamento,  $\theta$ , medido a partir do plano de rotação até a direção da corda da pá.

Para aerofólios (asas, pás, velas, etc) a convenção é que a força de arrasto, D, é medida na direção do fluxo de vento relativo que atinge o aerofóliio e a força de sustentação, L, é medida perpendicularmente à direção do vento relativo. O ponto de ação da resultante das forças de sustentação e arrasto é chamado de centro aerodinâmico do aerofólio. Neste ponto, o momento aerodinâmico (para velocidade de vento constante) não muda com o ângulo de ataque, α. Uma aproximação usual é tomar o momento

aerodinâmico aplicado a 1/4 da corda a partir da borda de ataque [10].

A força que atua na direcão do plano de rotacão, F, é a responsável pelo movimento de rotação do rotor, e conforme a mesma Figura 3.2 pode ser expressa por

$$dF = dL sen \phi - dD cos \phi \qquad (3.3)$$

e o torque no elemento de pá por

$$dQ = (dL sen \phi - dD cos \phi) r$$
 (3.4)

Na direção perpendicular ao plano de rotação a componente é chamada de pressão aerodinâmica ou empuxo, T, e é dada por

$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \qquad (3.5)$$

Substituindo (3.1) e (3.2) em (3.4) e (3.5) obtem-se as expressões finais para o torque Q e o empuxo T atuantes no rotor

$$dT = \frac{1}{2} \rho_{ar} c W^2 \left( C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \right) N dr \qquad (3.6)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho_{ar} c W^2 \left( C_L sen \phi - C_D cos \phi \right) N dr$$
 (3.7)

onde N é o número de pás do rotor.

Entretanto, resultados experimentais e pesquisas recentes mostram que os resultados obtidos com os dados de túneis

de vento - aproximações 2D - não são precisos. Dados experimentais obtidos a partir de rotores com pás NACA 63-2nn apresentaram diferenças consideráveis quando comparados com dados bidimensionais [33]. As principais diferenças são:

- 1. O coeficiente de sustentação,  $C_L$ , numa pá girando tem seus valores máximos nas seções mais próximas da raiz da pá. E estes valores máximos são bem maiores que o máximo obtido em túneis de vento.
- 2. A inclinação da curva  $C_L$  X  $\alpha$  é menos acentuada em seções perto da ponta da pá.
- 3. Os valores de  $C_{_{\mathrm{D}}}$  para ângulos de ataque grandes é menor que o obtido em túneis de vento.

Isto ocorre porque a teoria de Glauert não considera os efeitos da esteira atrás do rotor e do número e comprimento finito das pás. Na realidade o número finito de pás e, principalmente, o comprimento finito das pás provoca uma diminuição nas forças aerodinâmicas T e Q. Estes efeitos são conhecidos como perdas nas pontas das pás (tip losses). Várias teorias foram elaboradas para calcular estas perdas. A mais utilizada, por causa de sua simplicidade matemática, é a correção de Prandtl [10]. O método semi-empírico, elaborado por Viterna e Corrigan, usado por Bierbooms [2], tem a vantagem de incluir a rotação das pás, que provoca forças centrífugas nas partículas de ar junto do rotor; um complicador dos efeitos aerodinâmicos que não é levado em consideração pela correção de Prandtl.

De acordo com a teoria do elemento de pá, as forças aerodinâmicas dependeriam apenas do quadrado dos valores instantâneos da velocidade de vento relativa que incide no elemento, W<sup>2</sup>. Porém, uma pá flexível sofre continuamente flutuações de fluxo de vento devido à mudança do vento e devido ao movimento oscilatório da pá. Se estas flutuações ocorrem em altas frequências, dois fenômenos aerodinâmicos oscilatórios acontecem:

O primeiro deles, da ordem de grandeza do diâmetro do rotor, é conhecido como dynamic inflow. Este termo retrata o fenômeno no qual a esteira formada atrás do rotor não pode se ajustar instantaneamente à nova situação (que pode ser provocada por uma rajada de vento ou por uma mudança do ângulo de posicionamento da pá). O segundo, da ordem de grandeza da corda da pá, altera a força de sustentação na pá devido aos vórtices formados atrás do rotor. Um método semi-empírico, desenvolvido pelo instituto francês ONERA (Office National d'Etudes et de Recherche Aérospatiales) descreve estes fenômenos através de uma equação diferencial de primeira ordem para o fator de indução a (1º fenômeno) e através do cálculo do coeficiente C<sub>L</sub> por meio de duas equações diferenciais para o segundo [2].

## 3.2.2 Gradiente vertical de velocidade de vento (wind shear)

Mesmo considerando um fluxo constante, o vento não

atinge o disco do rotor de uma maneira uniforme. Pois, existe um gradiente de velocidades ao longo da altura. Dependendo do diâmetro do rotor, a diferença entre velocidades de vento acima e abaixo do eixo do rotor pode ser bem grande.

A causa do gradiente de velocidade de vento (ou perfil do vento) está ligada à topografia e, principalmente, à rugosidade do terreno. Este gradiente é geralmente descrito por uma lei logarítimica ou exponencial como a mostrada na seção 2.6.1. Terrenos muito rugosos provocam grandes gradientes de velocidade de vento (ver Figura 2.2) o que origina carregamentos distintos e periódicos (de frequência igual à rotação do rotor) nas pás da turbina eólica. Logo, o rotor ficará sujeito a um carregamento desbalanceado que provocará um momento no eixo e\ou no topo da torre.

A Figura 3.3 mostra a variação da componente  $V_p$  da velocidade relativa do vento em relação ao ângulo de azimute,  $\psi$ , para uma condição típica de gradiente vertical de velocidade. Se a variação da velocidade do vento com a altura fosse linear a curva mostrada na Figura 3.3 teria forma senoidal; e caso o gradiente vertical fosse irregular (ver Figura 2.4) os valores máximos e mínimos de  $V_p$  poderiam estar em qualquer posição azimutal.

Em seguida serão discutidos alguns efeitos aerodinâmicos especiais que surgem da interação do vento com a estrutura.

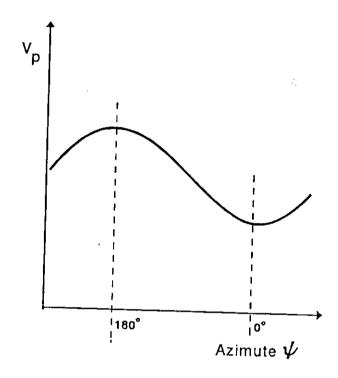


Figura 3.3 - Variação da velocidade V em relação à  $\psi$  devido ao gradiente vertical de velocidade

## 3.2.3 Sombra da torre (tower shadow)

A torre de uma turbina eólica é, sempre, um obstáculo ao fluxo de vento. Seus efeitos dependerão do tipo (treliçada ou tubular) e das dimensões. A velocidade do vento sofre uma grande redução por causa deste obstáculo e a consequência é uma distribuição desigual de forças no rotor. Este tipo de carga

aerodinâmica é crítica em turbinas tipo downwind, porém, em turbinas upwind também há uma diminuição da velocidade do vento causada pela torre.

A figura 3.4 mostra a variação da componente  $V_p$  da velocidade relativa do vento em função do ângulo de azimute,  $\psi$ , da pá. Instantes antes da pá passar por trás da torre há um aumento de velocidade e logo em seguida uma grande redução do valor da velocidade. Nesta posição é dito que a pá está na sombra da torre. As frequências excitadas pelo efeito da sombra da torre dependem, portanto, do número de pás e da velocidade angular do rotor.

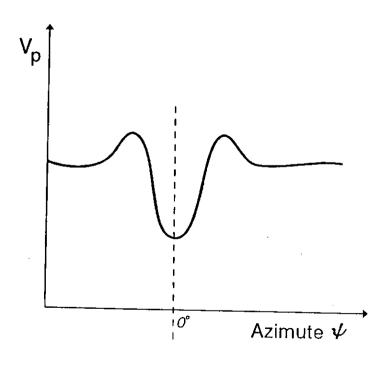


Figura 3.4 - Efeito sombra da torre.

## 3.2.4 Desalinhamento do eixo do rotor (yaw misalignment)

Devido à característica aleatória do vento na maior parte do tempo o rotor da turbina não está orientado perpendicularmente em relação ao vento.

Apesar de nas turbinas eólicas modernas de grande porte existir um mecanismo de ajuste automático da posição do rotor, controlado por computador, é muito difícil mantê-lo perpendicular em relação ao vento. Isto porque o ângulo de desalinhamento é muito difícil de ser medido e varia rapidamente e quase que a todo instante. Além disso, o movimento de giro de uma turbina eólica de grande porte é, devido ao seu peso, muito lento.

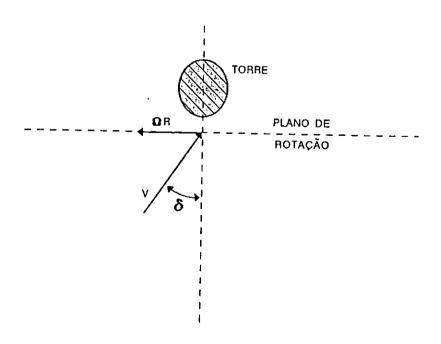


Figura 3.5 - Desalinhamento do eixo do rotor em relação ao vento (yaw misalignment).

Este desalinhamento provoca uma componente da velocidade de vento axial sobre o plano de rotação (ver Figura 3.5). Devido à rotação, a componente do vento no plano de rotação estará, em alguns momentos, "empurrando" a pá e, em outros, a estará "freiando". A Figura 3.6 mostra a variação da velocidade  $V_{\rm t}$  que atua no plano de rotação do rotor com o ângulo de azimute  $\psi$ .

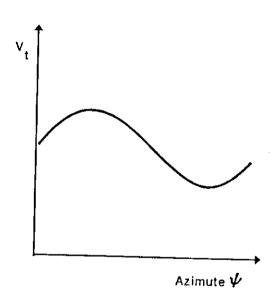


Figura 3.6 - Variação da componente  $V_t$ com o ângulo de azimute  $\psi$ .

## 3.2.5 Inclinação do eixo do rotor (shaft tilt)

Geralmente, turbinas do tipo upwind apresentam uma inclinação do eixo do rotor a fim de evitar que as pás (longas e flexíveis) possam colidir com a torre (Figura 3.7). Para um fluxo

de vento incidente paralelo ao solo, esta inclinação do eixo do rotor provocará uma componente da velocidade de vento axial sobre o plano de rotação. O efeito é semelhante ao comentado para o desalinhamento do eixo do rotor (seção 3.2.4). A componente  $V_t$  da velocidade relativa apresenta uma variação idêntica à da figura 3.6 porém defasado de 90°.

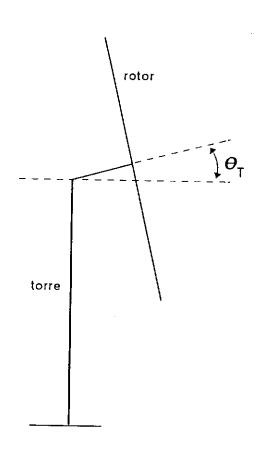


Figura 3.7 - Inclinação do eixo do rotor (tilt angle).

## 3.2.6. Cargas aerodinâmicas combinadas

Nos items anteriores, foram discutidas algumas fontes individuais de forças aerodinâmicas cíclicas. Porém, estes efeitos não aparecem de forma isolada, mas sim acopladas, gerando

condições bem complexas. Por isso, não se pode apenas somar as contribuições individuais dos carregamentos a fim de se obter a real condição de carga.

Além disso, foi assumido um comportamento aerodinâmico linear. Na prática, entretanto, as pás de uma turbina eólica podem frequentemente estar operando parcialmente em stall, o que gera efeitos aerodinâmicos não-lineares. O stall é caracterizado pela formação de vórtices no fluxo que passa pelo aerofólio. Como consequência desta alteração no fluxo, as pressões dinâmicas mudam, provocando uma diminuição na força de sustentação e um aumento significativo no arrasto. Para cada perfil aerodinâmico existe um ângulo de ataque crítico, que depende do número de Reynolds, a partir do qual este fenômeno se inicia.

## 3.3 Forças inerciais (mecânicas)

## 3.3.1 Forças gravitacionais

As turbinas eólicas de eixo horizontal poderiam, de certa forma, serem chamadas de máquinas de teste de fadiga, uma vez que as pás ficam sujeitas a forças axiais e momentos que variam periodicamente devido à rotação do rotor (Figura 3.8). As forças gravitacionais agem predominantemente na direção paralela ao plano de rotação ainda que tenha, também, uma pequena atuação

na direção perpendicular ao plano de rotação.

As forças axiais nas pás de uma turbina eólica de eixo horizontal variam periodicamente de compressão, quando a pá está acima do eixo de rotação, à tração quando ela está abaixo. As frequencias naturais de flexão (fora do plano de rotação e no plano de rotação) tendem a diminuir pela compressão e aumentar pela tração. Tais sistemas mecânicos são conhecidos como "sistemas excitados parametricamente" e existe um tipo de instabilidade chamada de ressonância paramétrica que está associada estes sistemas. A ressonância paramétrica а caracterizada pela existência de diversas regiões de instabilidade, sendo, portanto, importante garantir que rotações de projeto estejam fora das regiões de instabilidade [15].

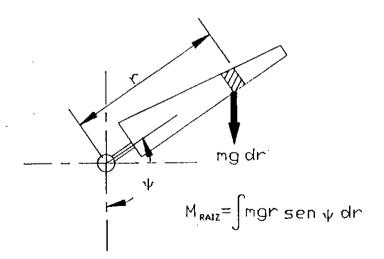


Figura 3.8 - Força gravitacional atuante numa pá.

## 3.3.2 Ângulo de cone (coning angle)

O ângulo de cone (Figura 3.9) é empregado para reduzir as forças e momentos da raiz da pá resultantes da ação da pressão aerodinâmica. Para velocidades angulares altas, grandes solicitações surgem devido à força centrífuga (que é proporcional a  $\Omega^2$ ). E, como o fluxo de vento não é constante, a pressão aerodinâmica,  $\mathbf{T}$ , varia, deixando a pá oscilando sobre a ação da força centrífuga. Os momentos na raiz da pá aumentam muito e, nestas condições, a análise de fadiga torna-se muito importante.

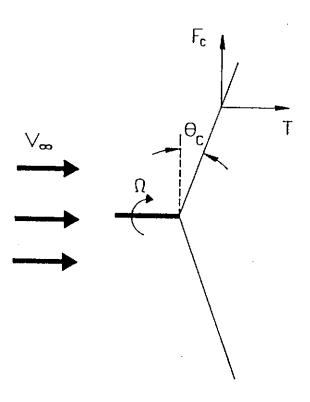


Figura 3.9 - Ângulo de cone em rotor downwind.

## 3.3.3 Forças giroscópicas

Estas forças são resultado da rotação dos elementos da estrutura em torno de dois eixos perpendiculares entre si (ver Figura 3.10). Estas forças são proporcionais às velocidades de rotação.

Para turbinas do tipo upwind as velocidades do movimento de giro (yaw) são muito pequenas e as forças giroscópicas geradas não são importantes; porém, para turbinas do tipo downwind - que são auto-orientadas em relação ao vento - as velocidades de giro são maiores e estas forças devem ser levadas em consideração.

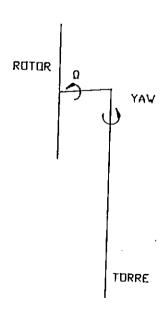


Figura 3.10 - Efeito giroscópico.

## 3.3.4 Forças de Coriolis

O movimento oscilatório da pá na direção do movimento de flap provoca um momento de reação (efeito de Coriolis) na direção do movimento de lag (Figura 3.11). A interpretação física deste momento é

Momento de Coriolis = Força Centrífuga X Velocidade da pá

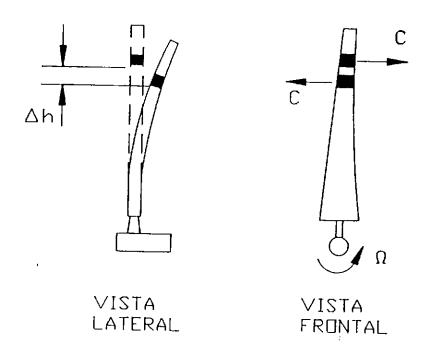


Figura 3.11 - Vibração da pá e o efeito de Coriolis.

Geralmente, a velocidade da pá na direção de flap não é alta devido ao grande amortecimento aerodinâmico envolvido e,

portanto, o efeito de *Coriolis* não é acentuado. Porém, quando a pá ou parte dela atinge a condição de *stall* o amortecimento aerodinâmico diminui substancialmente, podendo haver um considerável aumento da velocidade da pá na direção de *flap*. Grandes cargas cíclicas também podem provocar elevadas velocidades da pá.

## 3.3.5 Forças transientes

Estas forças surgem da interação do sistema de controle com a turbina e dependem exclusivamente do tipo de controle existente. As principais ações ocorrem em operações de frenagem do rotor, início de geração elétrica, posicinamento do rotor em relação ao vento - movimento de giro (yaw) da nacele, controle aerodinâmico ativo e desconexão com a rede elétrica.

## 3.3.6 Condições especiais (anormais)

O funcionamento nestas condições está associado à ocorrência de falha em componentes ou sistemas da turbina eólica e às suas consequências [13]. Dependendo do tipo da turbina, diferentes condições especiais de operação podem ocorrer. Várias destas condições especiais são descritas nas normas de segurança estrutural de turbinas eólicas [1 e 39]. De um modo geral, as mais comuns são:

## a) Situações de emergência

Estas situações ocorrem como consequência da falha de um componente ou sistema da turbina eólica. Os sistemas de segurança devem atuar no sentido de conduzir a turbina a uma condição segura. É esperado que paradas de emergência não ocorram em número suficiente para representar uma condição crítica de carregamento por fadiga. No entanto, nos casos onde a mudança do ângulo de passo da pá é feita rapidamente ou os freios são superdimensionados, a parada de emergência pode causar danos mesmo com poucos ciclos.

## b) Operação na presença de falha

Estas situações também ocorrem como consequência da falha de um componente ou sistema da turbina, porém os dispositivos de segurança não são ativados como no caso anterior. As cargas que ocorrem nesta situação e sua duração devem ser analisadas sob a condição mais desfavorável de vento. Algumas das falhas que devem ser levadas em consideração são:

- \* Falha no mecanismo de giro da nacele (yaw) nesta situação a turbina não acompanha as variações na direção do vento, resultando na ação de cargas adicionais.
- \* Falha no mecanismo de ajuste do passo da pá nesta situação o controle aerodinâmico ativo de uma ou mais pás torna-se inoperante, não sendo capaz de reagir aos comandos enviados pelo sistema de controle da turbina.
  - \* Falha nos sistemas de supervisão nesta situação o

sistema de supervisão não acusa uma eventual operação da turbina sob condiçães mais severas do que as normais.

#### 3.4 Turbulência

Todas as forças discutidas até aqui fazem parte do grupo das forças determinísticas, isto é, dado o valor da força em um certo instante pode-se predizer seu valor no instante seguinte. As forças que se originam do fluxo turbulento do vento são, por sua vez, completamente aleatórias.

A importância destas forças é salientada em vários trabalhos, como por exemplo em [17]: "...a omissão do elemento turbulento do carregamento aerodinâmico é aproximadamente a omissão de metade da carga ou, para turbinas de grande porte, da maior parte dela."

A turbulência está bastante associada às cargas extremas que ocorrem nas pás das turbinas [20]. Por exemplo, nas turbinas eólicas com controle aerodinâmico ativo (onde o ângulo de passo - pitch - das pás é regulado automaticamente por servo-motores) as cargas máximas em flap surgem um pouco abaixo da velocidade de vento nominal de operação. Nestas condições, grandes cargas cíclicas podem ocorrer porque a pá não está operando em stall e, por isso, responde (absorve) fortemente às forças turbulentas.

O vento turbulento possui uma energia distribuída em uma larga faixa de frequências podendo excitar a estrutura de uma

turbina eólica em alguma de suas frequências naturais. O efeito da turbulência pode ser interpretado em termos de análise de fadiga dos componentes estruturais. A Tabela 3.1 mostra como a turbulência aumenta a probabilidade de ocorrência de falhas por fadiga, em pás de turbinas eólicas de eixo horizontal.

Tabela 3.1 - Resultados da análise de fadiga de uma pá em função da intensidade de turbulência e do tipo de carregamento [20].

TIPO DE CARREGAMENTO	VIDA ÚTIL (EN ANOS) SEM FALHAS POR FADIGA			
APENAS CÍCLICO	INFINITA			
CÍCLICO + 5% DE TURBULÊNCIA	INFINITA			
CÍCLICO + 10% DE TURBULÊNCIA	INFINITA			
CÍCLICO + 11% DE TURBULÊNCIA	1 4			
CÍCLICO + 12% DE TURBULÊNCIA	1 1			
CÍCLICO + 13% DE TURBULÊNCIA	9			
CÍCLICO + 15% DE TURBULÊNCIA	8			
APENAS 15% DE TURBULÊNCIA	20			

A turbulência pode ser incluída na análise de 3 maneiras diferentes :

1. O método mais simples, que não pode ser considerado como modelagem, é o uso de rajadas de vento. Este método pode nos

dar alguma informação a respeito das características da turbina ao se investigar a resposta dinâmica devido às cargas impulsivas mas não permite prever a resposta do sistema devido a forças turbulentas, uma vez que as rajadas não contém nenhuma informação a respeito da estrutura do vento.

- 2. O segundo método, que é o mais aceito atualmente, é o uso de métodos de correlação, ou espectrais, que permitem a inclusão tanto da correta frequência contida no vento, quanto da correta correlação em todo o disco do rotor. Este modelo traz consigo uma considerável complexidade analítica. Como o rotor da turbina é, por sua natureza, muito sensível as mudanças no fluxo em torno dele, o acoplamento entre os vários modos de vibração pode ocorrer devido as forças aerodinâmicas. É este acoplamento que complica a análise.
- 3. O terceiro método, uma análise no domínio do tempo, é a <u>simulação</u> que tenta criar um cilindro de vento que passa através do disco do rotor e que possui todas as características reais do vento. Este método permite a modelagem de efeitos não-lineares, mas é o mais caro em termos computacionais.

## CAPÍTULO 4

# MODELAGEM DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL

### 4.1 Introdução

Nas turbinas eólicas de eixo horizontal - TEEHs - a torre é ligada a um rotor que tem o movimento de giro livre. Nos helicópteros a fuselagem é fixada ao rotor que, também, gira livremente. Esta semelhança entre turbinas eólicas de eixo horizontal e helicópteros fez com que, inicialmente (década de 70), os projetistas utilizassem programas que lidavam dinâmica de helicópteros (MOSTAS, REXOR, etc.) a fim de analisar, principalmente, a estabilidade aeroelástica das turbinas. Porém, constatou-se que, para a geração atual de turbinas eólicas, o problema de instabilidade não é tão comum quanto em helicópteros [20, 40]. O maior problema dos projetistas passou a ser evitar ressonâncias. A análise foi, então, direcionada para a resposta dinâmica devido às forças aerodinâmicas, e atualmente uma grande ênfase tem sido dada à resposta dinâmica do sistema devido à turbulência e às forças transientes. Além disso, devido

características especiais das pás do rotor (que são diferentes das usadas nos helicópteros) e de situações típicas deste tipo de estrutura, tais como a excitação gravitacional (periódica), o efeito do gradiente vertical de velocidade e a sombra da torre, a necessidade de uma análise específica para TEEHs vem se tornando cada vez mais importante.

Uma turbina eólica é composta de vários elementos que interagem entre si. Os principais elementos são o rotor, a conexão entre as pás e o eixo, o multiplicador de velocidade, o mecanismo de giro, o sistema de controle, a torre e a fundação (Figura 4.1). O sistema de controle não é um elemento mecânico, mas exerce um papel importante no comportamento dinâmico global da estrutura.

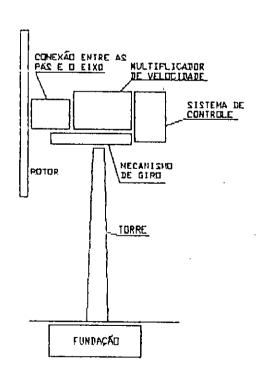


Figura 4.1 - Componentes mecânicos de uma TEEH.

Uma série de modelos estruturais de diferentes complexidades tem sido investigados utilizando-se vários métodos de análise dinâmica [3, 5, 6, 22, 28-30, 37 e 41].

A complexidade dos modelos estruturais dependerá de quantos componentes serão modelados e do número de graus de liberdade associado a cada um dos componentes. Estes parâmetros, por sua vez, são definidos pelo tipo de análise dinâmica que será feita. Dependendo do tipo de força, há três tipos de análise : a de estabilidade, da resposta dinâmica devido a cargas determinísticas, e da resposta dinâmica devido a cargas estocásticas. A análise pode ser feita no domínio do tempo ou no domínio da frequência, podendo-se usar as equações de movimento não-lineares ou as linearizadas.

### 4.2 Modelos para análise

Para se estudar a dinâmica estrutural de uma TEEH, um modelo matemático pode ser desenvolvido utilizando-se o método de análise modal em um modelo analítico ou o método de elementos finitos. A principal complicação para o modelo estrutural surge em função da rotação relativa entre o rotor e a torre. É esta característica que inviabiliza o uso do método de elementos finitos em sua forma padrão.

O método mais usado é, sem dúvida, a aproximação modal

clássica. Porém, programas baseados numa combinação do método de elementos finitos com o método modal também têm sido muito usados para se determinar a resposta dinâmica de turbinas eólicas [8 e 29].

A grande vantagem destas técnicas (que utilizam a análise modal) é que o modelo final tem relativamente poucos graus de liberdade. Mesmo assim, a tarefa de escrever as equações de movimento do sistema é exaustiva por causa das complicadas expressões algébricas que surgem devido à rotação relativa entre o rotor e a torre. Entretanto, programas de computação algébrica (REDUCE, MUMATH, MATLAB, DERIVE, etc.) reduzem significativamente o esforço na formulação das equações de movimento, viabilizando a análise dinâmica através do método modal. O Quadro 4.1 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos modelos analíticos.

Quadro 4.1 - Vantagens e desvantagens dos modelos analíticos.

н о п	ELOS ANALÍTICOS
VANT A G E N S	OBTENÇÃO DE RESPOSTAS ANALÍTICAS ENTENDIMENTO FÍSICO DAS EQUAÇÕES
DESVANTAGENS	GRANDE HANIPULAÇÃO ALGÉBRICA POUCOS GRAUS DE LIBERDADE

O método de elementos finitos pode ser visto como uma alternativa aos modelos analíticos uma vez que ele automatiza a análise dinâmica e todos os cálculos são feitos pelo computador.

Algumas das vantagens do método de elementos finitos são : a diminuição da manipulação algébrica na determinação das equações de movimento do modelo, e a facilidade de se fazer alterações no modelo estrutural, como por exemplo, trocar uma conexão rígida entre o eixo e as pás por uma flexível. A maior desvantagem é que não se tem as equações analíticas do sistema e, portanto, não se pode avaliar a importância de cada um dos parâmetros envolvidos na análise. Fica difícil entender fisicamente o que acontece com o sistema uma vez que existem muitos graus de liberdade e as equações são resolvidas numericamente. Um resumo das vantagens e desvantagens dos modelos em elementos finitos é apresentado no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Vantagens e desvantagens dos modelos em elementos finitos.

ELE	MENTOS FINITOS
VANT A G E N S	GERACAO AUTOMÁTICA DAS EQUAÇÕES FÁCIL ALTERAÇÃO DO HODELO
DESVANTACENS	INSTABILIDADE NUMÉRICA DIFÍCIL ANÁLISE DOS RESULTADOS

A escolha do método a ser utilizado vai depender do tipo de análise que se pretende realizar e do grau de complexidade das forças aerodinâmicas utilizadas na análise. Por exemplo, forças aerodinâmicas turbulentas de grande grau de complexidade não precisam ser usadas com modelos estruturais de poucos graus de

liberdade que são, geralmente, analisados pelo método modal.

#### 4.3 Modelo Analítico

(Formulação das equações de movimento)

Os dois métodos mais usados para a formulação das equações de movimento de sistemas mecânicos são o método de Lagrange e o método de Van Holten (ou do momento generalizado) [37].

Estes métodos requerem expressões para a velocidade dos componentes do sistema a fim de se calcular a energia cinética do mesmo. Geralmente, uma turbina eólica é descrita através de um sistema COM 6 ou 7 coordenadas [23,25,10]. O vetor đe velocidades de um ponto qualquer da pá escrito no referencial (que gira junto com a pá) pode ser levado para referencial fixo através de uma série de transformações (rotações e translações).

#### O Método de Lagrange

Neste método as equações de movimento surgem đa aplicação do princípio de Hamilton para extremização do funcional de energia e são escritas em termos das coordenadas generalizadas (ou graus de liberdade do sistema). Calculando-se a cinética T e a energia potencial V do sistema pode-se expressar a fórmula geral para as equações de movimento (equações lagrangeanas do movimento):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{i}} \right) - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}_{i}} + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}_{i}} = \mathbf{Q}_{i} \tag{4.1}$$

onde  $\mathbf{Q}_{i}$  representa todas as forças não-conservativas e momentos externos que atuam na coordenada generalizada q.

Garrad e Quarton [23] apresentam um procedimento geral que pode ser usado para calcular as equações lagrangeanas de movimento. Este procedimento, que é conveniente para o uso de álgebra simbólica, consiste basicamente de 5 passos:

- 1. Especificar o vetor posição  $\mathbb{R}_{b}$  de um ponto arbitrário da pá no sistema de coordenadas local (que gira junto com a pá).
- 2. Estabelecer as transformações necessárias (translações e rotações) a fim de expressar o vetor posição no referencial inercial,  $\mathbb{R}_1 = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{M} \end{array} \right] \cdot \mathbb{R}_b$ .
- 3. Derivar  $\mathbb{R}_i$  em relação ao tempo para obter a velocidade inercial  $\dot{\mathbb{R}}_i$ .
- 4. Calcular a energia cinética do ponto de massa e integrar ao longo da pá

$$\int_{\infty}^{\infty} \hat{\mathbb{R}}_{i}^{2} dr = T$$

5. Formar o lagrangeano para cada uma das coordenadas generalizadas.

O Método de Van Holten (ou do momento generalizado)

Este método é similar ao método de Hamilton e a idéia é transformar as equações lagrangeanas de  $2^a$  ordem em pares de equações diferenciais de  $1^a$  ordem através da introdução de um novo parâmetro, o momento generalizado p.:

$$\mathbf{p}_{i} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\mathbf{q}}_{i}} \tag{4.2}$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{i} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{q}_{i}} - \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{q}_{i}} + \mathbf{Q}_{i} \tag{4.3}$$

Na maioria dos casos a energia cinética é uma função quadrática homogênea das velocidades e p pode ser expresso por :

$$\mathbf{p} = \mathbf{S} \cdot \dot{\mathbf{q}}$$
 ou  $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}^{-1} \cdot \mathbf{p}$  (4.4)

onde S é uma matriz N x N (N é o número de graus de liberdade do sistema). O par de equações diferenciais de 1ª ordem é dado por (4.3) e (4.4). As derivadas de energia cinética e potencial em (4.3) são substituídas por diferenças finitas e calculadas numericamente. O conjunto de equações diferenciais de 1ª ordem é resolvido usando-se rotinas numéricas convencionais.

As equações de movimento que definem uma turbina eólica de eixo horizontal são um conjunto de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem do tipo :

onde '

M é a matriz de massa;

 ${
m C_s}$  ,  ${
m C_a}$  e  ${
m C_c}$  são as matrizes de amortecimento estrutural, aerodinâmico e giroscópico (ou *Coriolis*);

 $K_{_{\rm g}}$ ,  $K_{_{\rm g}}$ ,  $K_{_{\rm p}}$ ,  $K_{_{\rm c}}$  e  $K_{_{\rm a}}$  são, respectivamente, as matrizes de rigidez estrutural, geométrica, gravitacional, centrífuga e aerodinâmica, e F é o vetor de forças generalizadas.

O vetor u representa as coordenadas generalizadas. Essas coordenadas podem, por exemplo, corresponder fisicamente aos seguintes graus de liberdade:

 Movimentos de translação e rotação do topo da torre expressas por

$$\tilde{V} = \sum_{i=1}^{N} \tilde{v}_{i}(x) \cdot q_{i}(t)$$

onde  $v_i(x)$  representam os modos naturais de flexão e torção da torre e  $q_i(t)$  são as coordenadas generalizadas.

2. Deslocamentos da pá k nas direções fora do plano de rotação (flap) e no plano de rotação (laq).

$$v_{k} = \sum_{i=1}^{N} v_{i}(x) \cdot s_{ki}(t)$$

onde  $s_{ki}(t)$  é a coordenada generalizada do modo i da pá k e  $v_i(x)$  o i-ésimo modo de vibração natural da pá k.

- 3. Rotações do sistema de transmissão e do rotor,  $\eta$ .
- 4. Deslocamento angular do rotor (rotor teetering),  $\delta$ , para rotores de duas pás.

Cada uma das matrizes da equação (4.5) contém termos periódicos da forma

$$M = M_0 + \Sigma M_1 \operatorname{sen} (i\Omega t) + \Sigma M_j \operatorname{cos} (j\Omega t)$$
 (4.6)

onde  $\Omega$  é a velocidade angular do rotor. De acordo com os graus de liberdade exemplificados acima e estando as equações de movimento definidas no referencial inercial, os termos periódicos (4.6) estariam associados apenas aos graus de liberdade do rotor (deslocamentos em flap e lag).

# 4.4 Elementos finitos

(Formulação das equações de movimento)

Para utilizar a técnica de elementos finitos uma estratégia tem que ser usada para se modelar uma estrutura em que um dos componentes gira em relação aos outros.

A primeira etapa é modelar os componentes estruturais

separadamente. A torre é modelada em um referencial fixo enquanto que o rotor é modelado em um referencial que gira junto com o rotor. As matrizes de massa, rigidez e amortecimento podem ser obtidas de forma convencional através de um programa de elementos finitos [30, 19, 22], podendo-se escrever,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathbf{T}} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{\mathbf{T}}^{*} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\mathbf{T}} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{\mathbf{T}} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\mathbf{T}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{T}} = \mathbf{F}_{\mathbf{T}}$$

$$(4.7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{R} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{R}^{*} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{R} + \mathbf{C}_{\Omega} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{R} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{R} - \mathbf{S}_{\Omega} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{R} = \mathbf{F}_{R}$$
(4.8)

A equação (4.7) é a equação de movimento da torre e a equação (4.8) é referente ao rotor;  $C_{\Omega}$  é a matriz de amortecimento devido à efeitos de *Coriolis* e aerodinâmicos,  $S_{\Omega}$  é a matriz de rigidez associada à rotação; o vetor  $F_{R}$  é a soma das forças aerodinâmica, centrífuga e gravitacional atuantes no rotor.

As equações (4.7) e (4.8), acima, podem ser combinadas em uma única equação matricial

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathsf{T}} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\mathsf{R}} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{T}} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{R}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\mathsf{T}} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{\mathsf{R}} + \mathbf{C}_{\mathsf{\Omega}} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{T}} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{R}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\mathsf{T}} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\mathsf{R}} - \mathbf{S}_{\mathsf{\Omega}} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{T}} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\mathsf{R}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\mathsf{T}} \\ \mathbf{F}_{\mathsf{R}} \end{bmatrix}$$

$$(4.9)$$

Até agora os componentes estruturais (torre e rotor)

foram tratados em separado. Na verdade, existe uma conexão entre o topo da torre e as pás do rotor. Esta conexão será descrita pela matriz [L] (matriz de conexão), que é definida como

$$\left\{\begin{array}{c} u \\ v \\ u \\ R \end{array}\right\} = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \cdot u \tag{4.10}$$

onde u é o vetor que descreve o sistema globalmente. As expressões para as velocidades e acelerações nodais são

$$\left\{ \begin{array}{c} \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{T}} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{R}} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} + \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{T}}^{*} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\mathrm{R}}^{*} \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{u} + 2 \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \begin{bmatrix} \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{u}}^{*}$$

$$(4.11)$$

Substituindo (4.10) e (4.11) em (4.9) e pré-multiplicando por t [ L ] obtem-se a seguinte expressão

$$[M] \cdot \dot{u} + [C] \cdot \dot{u} + [K] \cdot u = F$$
 (4.12)

onde

$$\begin{bmatrix} c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{t} \begin{bmatrix} c^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{t} \begin{bmatrix} M^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{t} \begin{bmatrix} M^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{t} \begin{bmatrix} M^{*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \end{bmatrix} +$$

$$F = \begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^{t} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{F}{R} \\ \frac{F}{R} \end{Bmatrix}$$

as matrizes [M\*], [C\*] e [K\*] representam, nesta ordem, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, definidas na equação (4.9). A equação de movimento (4.12) representa o modelo estrutural completo e pode ser resolvida de maneira usual por um método de integração no tempo.

A matriz de conexão [ L ] é a característica especial desta modelagem, uma vez que é ela que permite o emprego do método de elementos finitos a este tipo de estrutura. Além disso, é através dela que se define a natureza da conexão entre as pás e o eixo do rotor. Mais ainda, com a adequada modelagem física dos pontos nodais de conexão alguns termos da equação (4.12) podem se tornar independentes do tempo e, então, apenas uns poucos termos necessitarão ser computados a cada intervalo de integração.

A utilização de [ L ] remove alguns graus de liberdade associados aos nós de conexão (topo da torre / raiz da pá). A

escolha de quais graus de liberdade devem ser retidos é totalmente arbitrária. Por exemplo, pode-se manter todos os graus de liberdade da torre e expressar os deslocamentos da raiz da pá em relação a estes. Assumindo que a pá está rigidamente ligada à torre, os deslocamentos e rotações da raiz da pá podem ser facilmente expressas no referencial fixo por

onde a matriz [  $R_{\psi}$  ] tranforma um vetor do referencial fixo (na torre) para um referencial girante (na pá). De acordo com a definição em (4.10) a matriz de conexão para estes dois nós (topo da torre / raiz da pá) fica definida como

A matriz de identidade, que aparece na parte superior esquerda de [ L ], está relacionada aos graus de liberdade do topo da torre, os quais foram mantidos. Como a matriz de conexão [ L ] do sistema completo afeta apenas os nós de conexão da estrutura, a maior parte dela é uma matriz identidade. Logo, ela pode ser representada por

$$\begin{bmatrix} I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$$

#### 4.5 Solução das equações de movimento

O cálculo das frequências naturais e respectivos modos de vibração do sistema completo é bastante complicado por causa dos termos periódicos que aparecem nas matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura. Este cálculo pode ser feito utilizando-se o método de Floquet, também conhecido como teoria de Floquet - Liapunov [17, 18].

Como este método é computacinalmente caro, algumas alternativas são frequentemente utilizadas. Para rotores de duas pás, fracamente acoplados (peso das pás muito pequeno em relação ao peso da torre), os termos periódicos podem ser substituídos pelos valores médios tomados em uma revolução, obtendo-se, assim, um conjunto de equações com coeficientes constantes que pode ser resolvido através de métodos clássicos para cálculo de autovalores e autovetores [17]; para rotores de três pás os periódicos podem termos ser removidos utilizando-se transformação de coordenadas chamada de transformação de Coleman ou coordenadas multipás (multiblade coordinates) [23, 17].

A resposta dinâmica do sistema estrutural pode ser obtida através de métodos de integração numérica como Runge Kutta ou Newmark. O esquema de integração de Runge Kutta de quarta ordem é geralmente usado com geração automática do intervalo de integração [8, 29]. Para cada intervalo de integração os coeficientes periódicos são calculados na posição azimutal instantânea e mantidos constantes durante o intervalo.

O método de integração direta de Newmark é, para equações diferenciais com coeficientes constantes, incondicionalmente estável. Infelizmente, esta condição não é válida para as equações periódicas descritas em (4.12). Entretanto, o método de Newmark tem sido bastante usado, com sucesso [20, 22 e 30].

# CAPÍTULO 5

## MODELO MATEMÁTICO DO ROTOR

#### 5.1. Introdução

Na análise dinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal - TEEH - o rotor é o mais importante componente estrutural a ser estudado. A dificuldade de se analisar o rotor de uma turbina eólica deve-se ao fato de que as principais forças e amortecimentos são resultantes do carregamento aerodinâmico, que é totalmente não-linear, não-periódico e não-permanente.

A modelagem das pás de uma TEEH é bastante complexa devido às suas características especiais; as principais são :

- Seções transversais (espessura e largura) que variam ao longo do comprimento;
- Distribuição de massa não-uniforme;
- 3. Ângulo de torção acentuado (chegando até 30°);
- 4. As pás são fabricadas com materiais compostos e fibras que apresentam elevada taxa de amortecimento histerético.

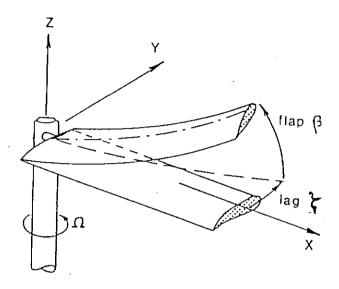
Porém, modelar uma pá com todas estas características

pode ser desnecessário já que é muito difícil representar as complicadas forças aerodinâmicas. Portanto, a importância de se representar uma pá vibrando com grande grau de complexidade é, de certa forma, duvidosa. Foi verificado que : "...a representação apenas do primeiro modo de vibração fornece uma razoável aproximação, podendo ser usada na fase inicial de projeto." [10].

#### 5.2. Modelo mecânico

Uma pá flexível não-articulada pode ser modelada, simplesmente, como uma barra rígida, articulada com molas elásticas, que representam os graus de liberdade e a rigidez de flexão associados aos primeiros modos de vibração da pá (Figura 5.1). A articulação dista (eR) do centro do eixo de rotação. Dois graus de liberdade são permitidos : o movimento (rotação) de corpo rígido em flap e o movimento (rotação) de corpo rígido em lag.

Por definição, Flap é o movimento da pá na direção perpendicular à corda da pá e lag é o movimento na direção paralela à corda. E, devido ao ângulo de torção (twist angle), estas direções são diferentes para cada seção transversal ao longo do comprimento da pá (coordenada radial). No modelo mecânico utilizado neste trabalho, mostrado na Figura 5.1, o movimento de flap é assumido como perpendicular ao plano de rotação e o movimento de lag é paralelo ao plano de rotação. Isto



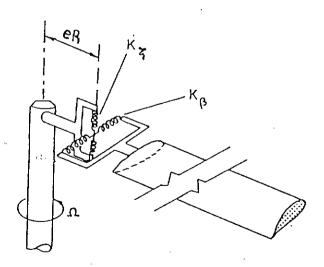


Figura 5.1 - Modelo mecânico análogo de uma pá flexível não-articulada.

significa que o ângulo de torção e o ângulo de posicionamento,  $\theta$ , do modelo são considerados nulos. Este modelo mecânico é similar aos apresentados em [5, 10 e 14] e baseado, principalmente, em [2].

Na formulação das equações de movimento não-lineares do rotor, tanto na forma Newtoniana quanto na forma Lagrangeana, há a necessidade de se especificar o vetor posição de um ponto arbitrário da pá. Este vetor posição pode ser convenientemente obtido através de uma sequência de rotações e translações a partir do sistema de coordenadas inercial até um sistema fixo na As rotações significam multiplicação de matrizes e translações, adição de matrizes. A ordem das transformações devido ao movimento de flap e lag (rotações) é de grande importância por causa da natureza não-linear das equações de movimento. Como as matrizes de rotação não têm a propriedade comutativa, podem surgir diferenças nas equações não-lineares de segunda ordem do rotor [28], em função da ordem das transformações utilizadas.

Em pás articuladas, como no modelo mecânico descrito acima, as posições das molas de flap e lag definem a sequência de transformações. Por exemplo, se a mola de flap estiver mais interna (mais próxima da raiz da pá) que a de lag, então, a articulação (mola) de lag irá se mover, junto com a pá, na direção de flap. Esta situação define a sequência de transformações flap-lag. Se as posições forem lag mais interna que flap a sequência será lag seguida de flap, e a mola de flap

irá se mover junto com a pá na direção de *lag*. No caso das molas serem coincidentes as duas sequências continuam sendo possíveis, dependendo da configuração estrutural da pá.

Neste trabalho a sequência flap-lag é usada uma vez que pás flexíveis (não-articuladas) comuns apresentam a sequência virtual flap-lag.

#### 5.3. Sistemas de coordenadas

A fim de escrevermos as equações de movimento de uma turbina eólica de eixo horizontal de forma clara e padronizada, faz-se necessário a definição de alguns sistemas de coordenadas.

Assim, pode-se definir convenientemente um ponto qualquer numa das pás do rotor, por exemplo, através de sucessivas transformações de coordenadas (rotações e translações). Os sistemas de coordenadas usados para a definição do vetor posição serão definidos a seguir e estão representados na Figura 5.2.

# 1. <u>Sistema inercial</u>

O sistema referencial inercial tem sua origem localizada na linha de centro e no topo da torre. O eixo  $\mathbf{Z}_1$  aponta para baixo e  $\mathbf{Y}_1$  é perpendicular ao plano de rotação do rotor.

## 2. Sistema do cubo do rotor

A origem localiza-se no centro do cubo do rotor e se encontra a uma distância S da linha de centro no topo da torre . O eixo  $Y_2$  é coincidente com  $Y_1$  do sistema inercial. A translação que transforma as coordenadas deste sistema para o inercial é

$$\left\{\begin{array}{c} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c} 0 \\ S \\ 0 \end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{array}\right\} \tag{5.1}$$

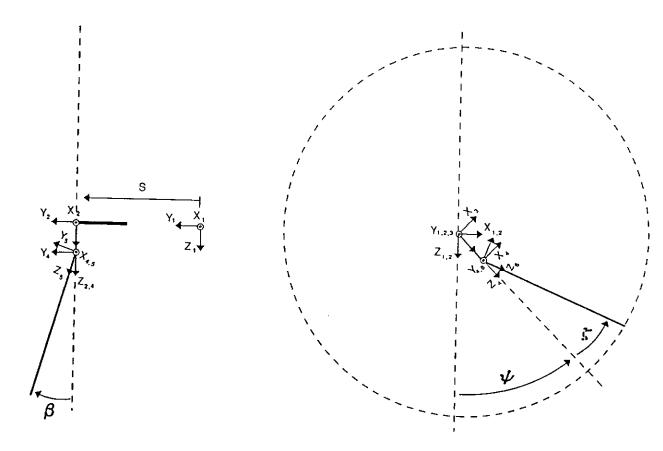


Figura 5.2 - Sistemas de coordenadas.

### 3. Sistema girante

A origem é o centro do cubo do rotor e o eixo  $Y_3$  é coincidente com  $Y_2$ ; e  $X_3$  e  $Z_3$  rotacionam de um ângulo  $\psi$  (azimute).

Este sistema representa o movimento de rotação do rotor.

$$\left\{\begin{array}{c} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{array}\right\} = \mathbb{R}_{\psi} \cdot \left\{\begin{array}{c} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{array}\right\}$$
(5.2)

onde

$$\mathbb{R}_{\psi} = \begin{bmatrix}
\cos \psi & 0 & \sin \psi \\
0 & 1 & 0 \\
-\sin \psi & 0 & \cos \psi
\end{bmatrix}$$
(5.3)

## 4. Sistema girante da articulação

A articulação da pá se encontra a uma distância E = eR do centro do cubo do rotor. O eixo  $Z_4$  é coincidente com  $Z_3$ , isto significa que  $Z_4$  é paralelo ao eixo longitudinal da pá do rotor.

## 5. Sistema girante com flap

Este sistema representa o movimento de pá fora do plano de rotação (flap). O eixo  $X_5$  coincide com o eixo  $X_4$ ; e os eixos  $Y_5$  e  $Z_5$  rotacionam de um ângulo  $\beta$ .

$$\left\{\begin{array}{c} X_4 \\ Y_4 \\ Z_4 \end{array}\right\} = \mathbb{R}_{\beta} \cdot \left\{\begin{array}{c} X_5 \\ Y_5 \\ Z_5 \end{array}\right\}$$
(5.5)

onde

$$\mathbb{R}_{\beta} = \begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 \\
0 & \cos \beta & \sin \beta \\
0 & -\sin \beta & \cos \beta
\end{bmatrix} \tag{5.6}$$

## 6. Sistema girante com lag

Este sistema representa o movimento lateral da pá no plano de rotação. O eixo  $Y_6$  é coincidente com  $Y_5$  e,  $X_6$  e  $Z_6$  rotacionam de um ângulo  $\zeta$ . Esta rotação é definida por

$$\left\{\begin{array}{c} X_{5} \\ Y_{5} \\ Z_{5} \end{array}\right\} = \mathbb{R}_{\zeta} \cdot \left\{\begin{array}{c} X_{6} \\ Y_{6} \\ Z_{6} \end{array}\right\}$$
(5.7)

onde

$$\mathbb{R}_{\zeta} = \begin{bmatrix}
\cos \zeta & 0 & \sin \zeta \\
0 & 1 & 0 \\
-\sin \zeta & 0 & \cos \zeta
\end{bmatrix}$$
(5.8)

## 5.4. Equações de movimento de uma pá

O vetor posição de um ponto arbitrário da pá no referencial inercial é dado pela seguinte expressão

$$\rho = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ S \\ 0 \end{array} \right\} + \mathbb{R}_{\psi} \quad \left[ \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ E \end{array} \right\} + \mathbb{R}_{\beta} \, \mathbb{R}_{\zeta} \, \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ r \end{array} \right\} \right]$$
 (5.9)

$$\rho = \left\{ \begin{array}{c} r \cos \zeta \sin \psi \cos \beta + r \sin \zeta \cos \psi + E \sin \psi \\ r \sin \beta \cos \zeta + S \end{array} \right\}$$

$$r \cos \zeta \cos \psi \cos \beta - r \sin \zeta \sin \psi + E \cos \psi$$
(5.10)

Obtem-se a velocidade derivando ho em relação ao tempo

$$\dot{\rho} = \frac{d}{dt} \rho \tag{5.11}$$

A energia cinética pode ser expressa por

$$T = \frac{1}{2} \int \dot{\rho} \cdot \dot{\rho} dm \qquad (5.12)$$

ou

$$T = \frac{1}{2} I_{b} \left( \dot{\beta}^{2} \cos^{2} \zeta + \dot{\zeta}^{2} + 2 \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta - \frac{1}{2} I_{b} \left( \dot{\beta}^{2} \cos^{2} \zeta + \dot{\zeta}^{2} + 2 \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta - \frac{1}{2} I_{b} \left( \cos \beta - \Omega^{2} \cos^{2} \zeta + \Omega^{2} \cos^{2} \zeta \cos^{2} \beta + \Omega^{2} \right) + \frac{1}{2} F_{b} \left( 2 \Omega^{2} E \cos \beta \cos \zeta + 2 \Omega E \zeta \cos \zeta \right) + \frac{1}{2} M_{b} E^{2} \Omega^{2}$$

$$(5.13)$$

Na expressão acima,  $M_{b}$  representa a massa total da pá, que pode ser escrita como

$$M_{b} = \int_{0}^{(1-e)R} \mu \, dr = \mu \, (1-e) \, R \qquad (5.14)$$

onde  $\mu$  é a massa da pá por unidade de comprimento, aqui considerada constante para toda pá. Consequentemente, o centro de gravidade da pá pode ser expresso por

$$r_{cg} = \frac{1}{2} (1 - e) R$$

o primeiro momento de massa ou momento estático da pá é dado por

$$F_{b} = \int_{0}^{(1-e)R} \mu r dr = \frac{1}{2} M_{b} (1-e) R = M_{b} r_{cg}$$
 (5.15)

e o segundo momento de massa ou momento de inércia da pá é

$$I_{b} = \int_{0}^{(1-e)R} \mu r^{2} dr = \frac{1}{3} M_{b} (1-e)^{2} R^{2} = \frac{4}{3} M_{b} r_{cg}^{2}$$
 (5.16)

A velocidade angular da pá,  $\Omega$ , é a derivada do deslocamento angular,  $\psi$ , em relação ao tempo. Como a maioria das atuais turbinas eólicas de grande porte são projetadas para trabalharem à rotação constante, considera-se  $\Omega$  constante.

$$\Omega = \frac{d}{dt} \psi$$

A energia potencial total U é a soma de três parcelas: a energia de deformação elástica da pá na direção fora do plano de rotação (flap), a energia de deformação elástica da pá na direção do plano de rotação (lag) e a energia potencial gravitacional

$$U = \frac{1}{2} K_{\beta} \beta^{2} + \frac{1}{2} K_{\zeta} \zeta^{2} + M_{b} g h_{cg}$$
 (5.17)

onde

 $\mathtt{K}_{oldsymbol{\mathcal{B}}}$  é a rigidez à flexão da pá na direção de flap

K, é a rigidez à flexão da pá na direção de lag

g é a aceleração da gravidade (9.81 m/s<sup>2</sup>)

 $h_{cg}$  é a altura do centro de gravidade (em relação ao eixo do rotor)

Em coordenadas locais o vetor posição do centro de gravidade é

$$\left\{\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ r_{cg} \end{array}\right\}$$

e transformando para o referencial inercial temos :

$$\left\{\begin{array}{c} 0\\ S\\ 0 \end{array}\right\} + \mathbb{R}_{\psi} \quad \left[\left\{\begin{array}{c} 0\\ 0\\ E \end{array}\right\} + \mathbb{R}_{\beta} \mathbb{R}_{\zeta} \left\{\begin{array}{c} 0\\ 0\\ r_{cg} \end{array}\right\} \quad \right]$$
(5.18)

Logo,  $h_{cg}$  é o valor negativo da coordenada z do vetor posição dado por (5.18). O sinal negativo aparece por causa do sentido positivo do eixo Z. (para baixo).

$$h_{cg} = -\left( r_{cg} \cos \zeta \cos \psi \cos \beta - r_{cg} \sin \zeta \sin \psi + E \cos \psi \right)$$
(5.19)

Substituindo (5.19) em (5.17) obtém-se a expressão da energia potencial total de uma pá.

$$U = \frac{1}{2} K_{\beta} \beta^{2} + F_{b} g \left( \operatorname{sen} \psi \operatorname{sen} \zeta - \cos \psi \cos \beta \cos \zeta \right) -$$

$$- M_{b} g E \cos \psi + \frac{1}{2} K_{\zeta} \zeta^{2}$$

$$(5.20)$$

A Equação lagrangeana do movimento para a coordenada generalizada  $\beta$  pode ser obtida através da substituição das grandezas escalares T, U e Q em

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} + \frac{\partial U}{\partial \beta} = \mathbb{Q}_{\beta}$$
 (5.21)

onde

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = \frac{1}{2} I_b \left( 2 \dot{\beta} \cos^2 \zeta + 2 \Omega \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta \right)$$
 (5.22)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) = I_b \dot{\beta} \cos^2 \zeta - I_b 2 \dot{\beta} \dot{\zeta} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta + I_b \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta \cos \beta + I_b \Omega \dot{\zeta} \operatorname{sen} \beta \left( \cos^2 \zeta - \operatorname{sen}^2 \zeta \right)$$
(5.23)

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{T}}}{\partial \beta} = \mathbf{I}_{b} \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta \cos \beta - \mathbf{I}_{b} \Omega \dot{\zeta} \operatorname{sen} \beta - \mathbf{I}_{b} \Omega^{2} \operatorname{sen} \beta \cos \zeta \cos \beta \cos^{2} \zeta - \mathbf{F}_{b} \Omega^{2} \operatorname{E} \operatorname{sen} \beta \cos \zeta \qquad (5.24)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \beta} = K_{\beta} \beta + F_{b} g \operatorname{sen} \beta \cos \psi \cos \zeta \qquad (5.25)$$

Substituindo as equações (5.23), (5.24) e (5.25) na equação (5.21) obtemos a equação não-linear de movimento para a coordenada generalizada β.

$$I_{b} \dot{\beta} \cos^{2} \zeta - I_{b} 2 \dot{\beta} \dot{\zeta} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta + I_{b} 2 \Omega \dot{\zeta} \operatorname{sen} \beta \cos^{2} \zeta + I_{b} \Omega^{2} \operatorname{sen} \beta \cos^{2} \zeta + I_{b} \Omega^{2} \operatorname{sen} \beta \cos \zeta + I_{b} \Omega^$$

Expandindo os senos e cossenos de  $\beta$  e  $\zeta$  em séries de Taylor e retendo apenas os termos de primeira ordem, isto é, considerando pequenos deslocamentos angulares em flap e lag, a equação (5.26) pode ser reescrita como

$$I_{b} \dot{\beta} - 2 I_{b} \zeta \dot{\zeta} \dot{\beta} + 2 \Omega I_{b} \dot{\zeta} \beta + \Omega^{2} I_{b} \beta + \Omega^{2} F_{b} E \beta + K_{\beta} \beta + F_{b} g \beta \cos \psi = Q_{\beta}$$

$$(5.27)$$

A interpretação física da equação (5.27) acima é a seguinte : o primeiro termo representa a força de inércia de massa; o segundo termo, é um componente de acoplamento inercial; o terceiro termo,  $2\Omega I_{b}\dot{\zeta}\beta$ , representa a força de coriolis; o

quarto termo,  $\Omega^2 I_b \beta$ , é a força centrífuga; o quinto termo,  $\Omega^2 F_b E \beta$ , é a força centrífuga adicional gerada pela excentricidade (eR); o sexto termo da equação é a força elástica da mola e o sétimo termo representa a força gravitacional.

A Equação lagrangeana do movimento para a coordenada generalizada  $\zeta$  é dada por

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\zeta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \zeta} + \frac{\partial U}{\partial \zeta} = \mathbb{Q}_{\zeta}$$
 (5.28)

onde

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \dot{\zeta}} = \frac{1}{2} \mathbf{I}_{\mathbf{b}} \left( 2 \dot{\zeta} + 2 \Omega \cos \beta \right) + \frac{1}{2} \mathbf{F}_{\mathbf{b}} 2 \Omega \mathbf{E} \cos \zeta \tag{5.29}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\zeta}} \right) = I_b \dot{\zeta} - I_b \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \beta - F_b \Omega E \dot{\zeta} \operatorname{sen} \zeta$$
 (5.30)

$$\frac{\partial T}{\partial \zeta} = -I_b \dot{\beta}^2 \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta + I_b \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \beta \left( \cos^2 \zeta - \operatorname{sen}^2 \zeta \right) + I_b \Omega^2 \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta \left( 1 - \cos^2 \beta \right) - I_b \Omega^2 \operatorname{E} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta - F_b \Omega \operatorname{E} \dot{\zeta} \operatorname{sen} \zeta$$

$$(5.31)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \zeta} = \mathbf{F}_{\mathbf{b}} g \left( \text{sen } \psi \cos \zeta + \text{sen } \zeta \cos \psi \cos \beta \right) + \mathbf{K}_{\zeta} \zeta$$
(5.32)

Substituindo as equações (5.30), (5.31) e (5.32) na equação (5.28), obtém-se a equação não-linear de movimento para a coordenada generalizada ζ.

$$I_{b}\dot{\zeta}^{*} + I_{b}\dot{\beta}^{2} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta - I_{b} 2 \Omega \dot{\beta} \operatorname{sen} \beta \cos^{2}\zeta + \\ + I_{b} \Omega^{2} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta + I_{b} \Omega^{2} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta \cos^{2}\beta + \\ + F_{b} \Omega^{2} \operatorname{E} \operatorname{sen} \zeta \cos \zeta + F_{b} g \operatorname{sen} \psi \cos \zeta + \\ + F_{b} g \operatorname{sen} \zeta \cos \psi \cos \beta + K_{\zeta} \zeta = \Omega_{\zeta}$$
 (5.33)

Expandindo os senos e cossenos de  $\beta$  e  $\zeta$  em séries de Taylor e retendo apenas os termos de primeira ordem obtemos

$$I_{b}\dot{\zeta} + I_{b}\dot{\beta}^{2} \zeta - 2 \Omega I_{b}\beta \dot{\beta} + \Omega^{2} F_{b} E \zeta + K_{\zeta} \zeta +$$

$$+ F_{b} g \left( \operatorname{sen} \psi + \zeta \cos \psi \right) = \mathbb{Q}_{\zeta}$$

$$(5.34)$$

A interpretação física da equação acima é feita da mesma forma que para a equação (5.27). O primeiro termo é a força de inércia de massa; o segundo termo é um componente de acoplamento inercial; o terceiro termo é a força de coriolis; o quarto termo representa a força centrífuga devido à excentricidade, (eR); o quinto é a força elástica da mola; o sexto termo,  $\mathbf{F}_{\mathbf{b}}$   $\mathbf{g}$  sen  $\psi$ , representa o peso próprio da pá, e o sétimo é a força gravitacional.

## 5.5. Linearização das equações

As equações não-lineares (5.27) e (5.34) podem ser linearizadas utilizando-se a técnica da perturbação. As coordenadas generalizadas são escritas como

$$\beta = \beta_{o} + \Delta \beta \qquad \qquad \zeta = \zeta_{o} + \Delta \zeta \qquad (5.35)$$

onde  $\beta_o$  e  $\zeta_o$  são posições geométricas de equilíbrio estático (ângulo de cone e curvatura da pá, respectivamente) e  $\Delta\beta$  e  $\Delta\zeta$  são pequenas perturbações referentes aos graus de liberdade  $\beta$  e  $\zeta$ . Substituindo as expressões (5.35) nas equações (5.27) e (5.34) e escrevendo apenas os termos lineares para as equações perturbadas, e assumindo  $\zeta_o$  = 0 (isto é, as pás na posição de equilíbrio são retas) temos

$$I_{b} \Delta \dot{\beta} + 2 \Omega I_{b} \beta_{o} \Delta \dot{\zeta} + \Omega^{2} I_{b} \Delta \beta + \Omega^{2} F_{b} E \Delta \beta +$$

$$+ F_{b} g \cos \psi \Delta \beta + K_{\beta} \Delta \beta = \Delta \Omega_{\beta}$$
(5.37)

$$I_{b} \Delta \dot{\zeta} - 2 \Omega I_{b} \beta_{o} \Delta \dot{\beta} + \Omega^{2} F_{b} E \Delta \zeta + F_{b} g \operatorname{sen} \psi + F_{b} g \operatorname{cos} \psi \Delta \zeta + K_{\zeta} \Delta \zeta = \Delta \Omega_{\zeta}$$

$$(5.38)$$

As equações perturbadas (5.37) e (5.38) podem ser reescritas da seguinte maneira (para simplificar a notação a variável  $\Delta\beta$  será escrita apenas como  $\beta$  e  $\Delta\zeta$  como  $\zeta$ )

$$\dot{\beta} + 2 \Omega \beta_{o} \dot{\zeta} + \Omega^{2} \beta + \Omega^{2} T \beta + G \cos \psi \beta + \omega_{\beta}^{2} \beta = \frac{Q}{I_{b}} \beta$$

$$(5.39)$$

$$\dot{\zeta} - 2 \Omega \beta_o \dot{\beta} + \Omega^2 T \zeta + G \cos \psi \zeta + \omega_\zeta^2 \zeta = \frac{Q}{I_b} \zeta - G \sin \psi$$
(5.40)

onde

$$T = \frac{F_b}{I_b} \quad E \qquad \qquad G = \frac{F_b}{I_b} \quad g$$

$$\omega_{\beta}^{2} = \frac{K_{\beta}}{I_{b}} \qquad \qquad \omega_{\zeta}^{2} = \frac{K_{\zeta}}{I_{b}}$$

Pode-se, ainda, escrever (5.39) e (5.40) em forma matricial

$$\begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\zeta} \end{Bmatrix} + \Omega \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\zeta} \end{Bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} + \Omega^{2} \begin{bmatrix} K_{c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{g} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta \\ \zeta \end{Bmatrix} = 0^{\bullet}$$
(5.41)

e as matrizes de (5.41) são definidas por

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

MASSA

$$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2\beta_{\circ} \\ -2\beta_{\circ} & 0 \end{bmatrix}$$

CORIOLIS

$$[K] = \begin{bmatrix} \omega_{\beta}^2 & 0 \\ 0 & \omega_{\zeta}^2 \end{bmatrix}$$

RIGIDEZ ESTRUTURAL

$$[ K_c] = \begin{bmatrix} 1+R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

RIGIDEZ CENTRIFUCA

$$[K_g] = \begin{bmatrix} G \cos \psi & 0 \\ 0 & G \cos \psi \end{bmatrix}$$

RIGIDEZ GRAVITACIONAL

$$\mathbb{Q}^{*} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\mathbb{Q}}{\beta} \\ \frac{1}{b} \\ \frac{\mathbb{Q}}{\zeta} - G \operatorname{sen} \psi \end{array} \right\}$$

FORCA GENERALIZADA

# ANÁLISE AERODINÂMICA DO ROTOR

### 6.1 Introdução

Os objetivos da análise aerodinâmica são dois : obter o vetor de forças aerodinâmicas que atua nas pás e montar as matrizes de amortecimento e rigidez aerodinâmica para compor as equações de movimento do sistema [3 e 14].

Inicialmente, algumas hipóteses precisam ser feitas para utilização de uma teoria aerodinâmica linear e bi-dimensional. Primeiro, que a variação do coeficiente de sustentação,  $C_L$ , em relação ao ângulo de ataque,  $\alpha$ , seja linear e não ocorra stall. Logo, as cargas dinâmicas provocadas nas pás por este efeito não serão consideradas. Na realidade, as pás de uma turbina eólica de grande porte operam, frequentemente, parcialmente estoladas. É o caso, por exemplo, de rotores de pás fixas, cujo controle da velocidade de rotação é feito automaticamente por efeito de stall.

A segunda hipótese define o ar como incompressível e a última despreza as características turbulentas do vento, eliminando dessa forma efeitos dinâmicos aleatórios e

simplificando a formulação das forças aerodinâmicas.

Sob estas hipóteses pode-se utilizar a teoria do elemento de pá de Glauert (seção 3.2.1) para calcular as forças aerodinâmicas que agem nas pás do rotor. Serão incorporados à análise os efeitos do desalinhamento do eixo do rotor em relação ao vento (yaw misalignment), da sombra da torre (tower shadow) e do gradiente de velocidade de vento (wind shear).

#### 6.2 Forças aerodinâmicas

De acordo com a teoria do elemento de pá (ver seção 3.2.1), as forças de sustentação e arrasto atuantes num elemento radial de comprimento dr de uma pá são :

$$dL = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_L(\alpha) W^2 dr \qquad (6.1)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho_{ar} c C_{D}(\alpha) W^{2} dr \qquad (6.2)$$

O momento aerodinâmico não será considerado pois o modelo matemático da pá, desenvolvido no capítulo anterior, não possue grau de liberdade de rotação (feather) ao longo do eixo longitudinal.

Utilizando a teoria do elemento de pá e segundo a figura 6.1 pode-se escrever a velocidade relativa do vento, W, que atinge um elemento de pá em função das componentes de velocidade

de vento paralela,  $V_{t}$ , e perpendicular,  $V_{p}$ , ao plano de rotação

$$W = \sqrt{V_p^2 + V_t^2} \tag{6.3}$$

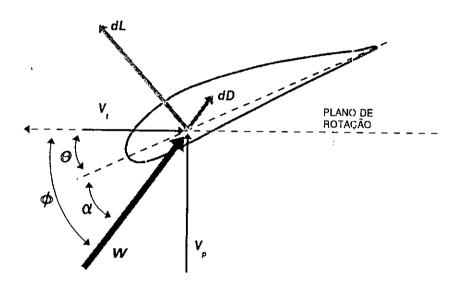


Figura 6.1 - Elemento de pá.

Na verdade o vento que atinge o rotor de uma turbina eólica varia de forma totalmente aleatória sendo, por isso, muito difícil escrever matematicamente o vetor velocidade de vento incidente em um elemento de pá. Porém, como aproximação simplificadora pode-se considerar a seguinte formulação:

A velocidade do vento que atinge o rotor é dada por

$$V_{1} = \left\{ \begin{array}{l} -V_{\infty} & \text{sen } \delta \\ -V_{\infty} & \cos \delta \\ 0 \end{array} \right\}$$
 (6.4)

onde  $V_{\infty}$  é a velocidade do vento não-perturbada à frente do rotor e  $\delta$  é ângulo (yaw) que a direção do vento faz com a direção do eixo do rotor

A velocidade  $V_1$  está escrita no referencial inercial  $X_1Y_1Z_1$  (Figura 6.2), idêntico ao usado para a formulação das equações de movimento no capítulo anterior. De acordo com este sistema de coordenadas o sinal negativo que aparece em (6.4) indica que o rotor é do tipo *upwind*, ou seja, o vento atinge o rotor antes de atingir a torre.

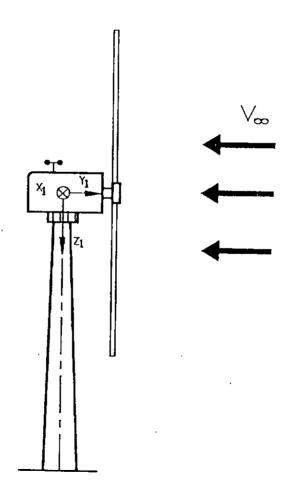


Figura 6.2 - Sistema de coordenadas inercial.

A superfície da Terra exerce uma força de fricção (wind shear) que altera a velocidade do fluxo de vento nas proximidades do solo. Esta variação pode ser bem representada através da seguinte relação (ver seção 2.6.1):

$$V(q) = V_o \left(1 + \frac{q}{H}\right)^p \tag{6.5}$$

onde

V é a velocidade do vento na altura do eixo do rotor;

H é a altura do eixo do rotor;

q é a altura (relativa ao eixo do rotor); e

 $_{\rm P}$  é um expoente que depende da rugosidade do terreno (varia entre 0.1 e 0.4).

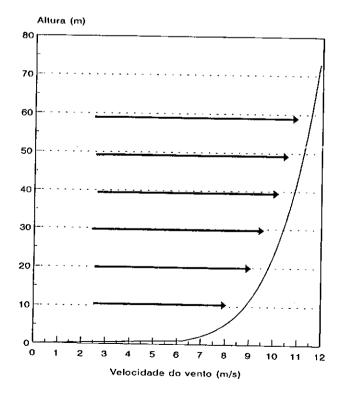


Figura 6.3 - Perfil de vento (terreno liso - p = 0.15).

A Figura 6.3 apresenta um perfil de vento calculado através da expressão (6.5) com  $V_o = 10$  m/s, H = 23 m e p = 0.15.

A altura q em (6.5) é obtida da coordenada Z do vetor posição de um ponto qualquer numa pá, tomado no referencial inercial. A expressão abaixo pode ser obtida diretamente de (5.10). O sinal negativo aparece porque o sentido do eixo  $Z_1$  é para baixo.

Mas, utilizando a série binomial infinita

$$(x + y)^{t} = x^{t} + t x^{t-1} y + \frac{t (t-1)}{2!} x^{t-2} y^{2} + \dots$$

a equação (6.5) pode ser reescrita retendo-se apenas os três primeiros termos desta série. Substituindo, também, (6.6) em (6.5) obtém-se a expressão da velocidade do vento com o efeito da rugosidade do terreno incluído,

$$V(r, \psi) = V_0 \left[ 1 + p \cdot A + \frac{p \cdot (p-1)}{2} \cdot A^2 \right]$$

onde

$$A = \frac{-r \cos \psi \cos \beta \cos \zeta + r \sin \psi \sin \zeta - E \cos \psi}{H}$$
(6.7)

Substituindo o valor de  $V_{\infty}$  na equação (6.4) por  $V(r,\psi)$ 

tem-se a expressão final da velocidade do vento que incide em um elemento de pá, incluindo os efeitos de desalinhamento do rotor e rugosidade do terreno.

$$V_{1} = \begin{cases} -V(r, \psi) & \text{sen } \delta \\ -V(r, \psi) & \text{cos } \delta \end{cases}$$
 (6.8)

A velocidade inercial do rotor é definida pela derivada em relação ao tempo do vetor posição,  $\rho$  (equação 5.10), de um ponto genérico na pá; e as expressões apresentadas a seguir foram obtidas a partir da equação (5.11)

$$\dot{\rho} = \left\{ \begin{array}{c} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{array} \right\}$$

onde as componentes de  $\dot{\rho}$  são

$$\dot{x} = (r \Omega \cos \zeta \cos \psi - r \zeta \sin \zeta \sin \psi) \cos \beta -$$

$$- r \beta \cos \zeta \sin \psi \sin \beta - r \Omega \sin \zeta \sin \psi +$$

$$+ (r \zeta \cos \zeta + E \Omega) \cos \psi$$

$$\dot{y} = r \beta \cos \zeta \cos \beta - r \zeta \sin \zeta \sin \beta$$

$$\dot{z} = - (r \zeta \operatorname{sen} \zeta \cos \psi + r \Omega \cos \zeta \operatorname{sen} \psi) \cos \beta -$$

- r 
$$\beta$$
 cos  $\zeta$  cos  $\psi$  sen  $\beta$  - r  $\Omega$  sen  $\zeta$  cos  $\psi$  -

- 
$$(r \zeta \cos \zeta + E \Omega) \sin \psi$$
 (6.9)

O vetor velocidade relativa do vento de um elemento de pá é definido no sistema de coordenadas girante, localizado no elemento de pá, por

$$V_{rel} = \left[ \mathbb{R}_{\zeta}^{t} \mathbb{R}_{\beta}^{t} \mathbb{R}_{\psi}^{t} \right] \cdot \left\{ V_{1} - \dot{\rho} \right\}$$
 (6.10)

As transpostas das matrizes de rotação aparecem em (6.10), devido à propriedade das matrizes ortogonais de possuirem inversa igual à transposta. O vetor  $V_{\rm rel}$  pode ser expresso em termos de seus componentes  $V_{\rm t}$  (paralela ao plano de rotação),  $V_{\rm p}$  (perpendicular ao plano de rotação) e  $V_{\rm t}$  (na direção do comprimento da pá)

$$V_{rel} = \left\{ \begin{array}{c} V_{t} \\ V_{p} \\ V_{l} \end{array} \right\}$$

sendo,

$$V_t = V(r, \psi) \ \text{sen} \ \zeta \ \cos \beta \ \text{sen} \ \psi \ \text{sen} \ \delta - r \ \Omega \ \cos \beta \ +$$
 
$$+ V(r, \psi) \ \text{sen} \ \zeta \ \text{sen} \ \beta \ \cos \delta \ - V(r, \psi) \ \cos \zeta \ \cos \psi \ \text{sen} \ \delta \ -$$
 
$$- E \ \Omega \ \cos \zeta \ - r \ \zeta$$

 $V_{p} = V(r,\psi) \ \text{sen} \ \beta \ \text{sen} \ \psi \ \text{sen} \ \delta - V(r,\psi) \ \text{cos} \ \beta \ \text{cos} \ \delta - r \ \Omega \ \text{sen} \ \zeta \ \text{sen} \ \beta - r \ \beta \ \text{cos} \ \zeta$   $V_{1} = - \ V(r,\psi) \ \text{cos} \ \zeta \ \text{sen} \ \beta \ \text{cos} \ \delta - V(r,\psi) \ \text{sen} \ \zeta \ \text{cos} \ \psi \ \text{sen} \ \delta -$ 

-  $V(r,\psi)$  cos  $\zeta$  cos  $\beta$  sen  $\psi$  sen  $\delta$  - E  $\Omega$  sen  $\zeta$  (6.11)

Com os valores de  $V_t$  e  $V_p$  obtidos das expressões (6.11) pode-se calcular o valor de W com (6.3) e com (6.1) e (6.2) obter as forças de sustentação e arrasto que atuam no elemento de pá.

As forças aerodinâmicas usadas para análise aerodinâmica e aeroelástica do rotor são, geralmente, expressas por duas componentes: uma paralela ao plano de rotação, F, que é responsável pelo torque que faz girar o rotor e; outra perpendicular ao plano de rotação, T (Thrust), que representa a pressão aerodinâmica.

$$dF = dL sen \phi - dD cos \phi (6.12)$$

$$dT = - dL \cos \phi - dD \sin \phi \qquad (6.13)$$

onde

$$\operatorname{sen} \phi = \frac{V}{W} \qquad \qquad \operatorname{cos} \phi = \frac{V_{t}}{W}$$

Substituindo as equações (6.1) e (6.2) nas equações (6.12) e (6.13) e pondo alguns termos em evidência temos

$$dF = \frac{1}{2} \rho_{ar} c \left( 1 + \frac{V_p^2}{V_t^2} \right)^{1/2} \left( V_p V_t C_L - V_t^2 C_D \right) dr$$

$$(6.14)$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho_{ar} c \left( 1 + \frac{V_p^2}{V_t^2} \right)^{1/2} \left( V_t^2 C_L + V_t V_D C_D \right) dr$$

$$(6.15)$$

Expandindo o termo de potência 1/2 como uma série binomial e notando que no projeto aerodinâmico das pás de turbinas eólicas de grande porte faz-se  $\lambda$  » 1, o que implica em  $V_t$  »  $V_p$  e, consequentemente, na relação  $V_p^2/V_t^2$  « 1, pode-se assumir que

$$\left(\begin{array}{ccc} 1 & + & V_p^2 \\ V_t^2 & V_t^2 \end{array}\right)^{1/2} \cong 1$$

podendo-se, então, escrever as forças aerodinâmicas no sistema de coordenadas girante, da seguinte forma

$$dF_{ar} = \left\{ \begin{array}{l} dF \\ dT \\ 0 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \rho_{ar} c \left( V_{p} V_{t} C_{L} - V_{t}^{2} C_{p} \right) dr \\ -\frac{1}{2} \rho_{ar} c \left( V_{t}^{2} C_{L} + V_{t} V_{p} C_{p} \right) dr \\ 0 \end{array} \right\}$$

Para escrever o vetor de forças aerodinâmicas no referencial inercial utilizam-se as matrizes de rotação  $\mathbb{R}_{\psi}$ ,  $\mathbb{R}_{\beta}$  e  $\mathbb{R}_{\zeta}$ , definidas no capítulo 5.

$$dF_{ai} = \mathbb{R}_{\psi} \mathbb{R}_{\beta} \mathbb{R}_{\zeta} \begin{cases} dF \\ dT \\ 0 \end{cases}$$
 (6.17)

As forças generalizadas (momentos) de origem aerodinâmica que entram na formulação das equações lagrangeanas de movimento são obtidas através das seguintes expressões

$$\mathbb{Q}_{\beta} = \int_{0}^{(1-e)R} \left\{ dF_{ai} \right\}^{t} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial \beta} \right\}$$
 (6.18)

$$Q_{\zeta} = \int_{0}^{(1-e)R} \left\{ dF_{ai} \right\}^{t} \left\{ \frac{\partial \rho}{\partial \zeta} \right\}$$
 (6.19)

que, após algumas manipulações resultam nas seguintes integrais

$$\Phi_{\beta} = \int_{0}^{(1-e)R} -\frac{1}{2} \rho_{ar} c \, V_{t} \left( V_{p} C_{D} + V_{t} C_{L} \right) \cos \zeta \, r \, dr \tag{6.20}$$

$$\Phi_{\zeta} = \int_{0}^{(1-e)R} -\frac{1}{2} \rho_{ar} c V_{t} \left( V_{t} C_{D} - V_{p} C_{L} \right) r dr$$
(6.21)

Substituindo as expressões de  $V_p$  e  $V_t$  (6.11) nas equações (6.20) e (6.21) e integrando chega-se a

$$\mathbf{0}_{\beta} = \frac{1}{24} \rho_{ar} c R^{2} \left\{ -3 \Omega R^{2} C_{b} \dot{\beta} - 4 \Omega R (eR) C_{b} \dot{\beta} + 4 R C_{b} V_{w} \beta \zeta \dot{\beta} - 3 R^{2} C_{b} \dot{\beta} \zeta - 8 \Omega R (eR) C_{b} \dot{\zeta} - 4 R C_{b} V_{w} \dot{\zeta} - 6 \Omega R^{2} C_{b} \dot{\zeta} - 3 \Omega R^{2} C_{b} \beta \zeta \dot{\zeta} + 4 R C_{b} V_{w} \dot{\zeta} - 6 \Omega R^{2} C_{b} \dot{\zeta} - 3 \Omega R^{2} C_{b} \beta \zeta \dot{\zeta} + 4 R C_{b} V_{w} \dot{\beta} \dot{\zeta} - 3 \Omega^{2} R^{2} C_{b} \beta \zeta + 6 C_{b} V_{w}^{2} \beta \zeta + 4 R C_{b} V_{w} \dot{\beta} \dot{\zeta} - 4 (eR) \Omega^{2} R C_{b} \beta \zeta + 6 C_{b} V_{w}^{2} \dot{\beta} \dot{\zeta} + 4 R C_{b} V_{w} \dot{\beta} \dot{\zeta} - 4 (eR) \Omega^{2} R C_{b} \beta \zeta + 6 C_{b} V_{w}^{2} \dot{\beta} \dot{\zeta} + 4 R C_{b} \dot{\zeta} - 4 (eR) \Omega^{2} R C_{b} \dot{\zeta} - 4 C_$$

+ 12 (eR)  $\Omega$   $C_L$   $V_{\infty}$   $\beta$   $\zeta$  - 4  $\Omega$  R  $V_{\infty}$   $C_D$   $\beta^2$  + 6  $C_L$   $V_{\infty}^2$   $\beta^2$  -

- 6 (eR) 
$$^2$$
  $\Omega^2$   $C_L$  - 6  $\Omega$  (eR)  $C_D$   $V_\infty$  - 8 (eR)  $\Omega^2$  R  $C_L$  -

$$- 4 \Omega R C_{D} V_{\infty} - 6 \Omega^{2} R^{2} C_{L}$$
 (6.22)

e,

$$\mathbb{Q}_{\zeta} = \frac{1}{24} \rho_{ar} c R^{2} \begin{cases}
4 \Omega R C_{L}(eR) \beta + 3 \Omega R^{2} C_{L} \beta + 3 R^{2} C_{L} \beta \zeta -
\end{cases}$$

- 4 R C 
$$_{L}$$
 V  $_{\infty}$   $\beta$   $\zeta$   $\beta$  + 8 R C  $_{D}$  V  $_{\infty}$   $\beta$   $\zeta$   $\zeta$  + 3  $\Omega$  R  $^{2}$  C  $_{L}$   $\beta$   $\zeta$   $\zeta$  -

- 6 
$$\Omega$$
 R<sup>2</sup> C<sub>D</sub>  $\dot{\zeta}$  - 8  $\Omega$  R (eR) C<sub>D</sub>  $\dot{\zeta}$  + 4 R C<sub>L</sub> V <sub>$\infty$</sub>   $\dot{\zeta}$  -

- 6 
$$C_L^{}$$
  $V_{\infty}^2$   $\beta$   $\zeta$  + 8  $\Omega$  R  $C_D^{}$   $V_{\infty}^{}$   $\beta$   $\zeta$  + 3  $\Omega^2$   $R^2$   $C_L^{}$   $\beta$   $\zeta$  +

+ 4 
$$\Omega^2$$
 R C<sub>L</sub>(eR)  $\beta$   $\zeta$  + 12  $\Omega$  C<sub>D</sub>(eR) V<sub>m</sub>  $\beta$   $\zeta$  +

+ 12 
$$C_D^2 V_{\infty}^2 (1 - \frac{1}{2} \cos^2 \psi) \zeta^2 - 6 \Omega^2 C_D^2 (eR)^2 +$$

+ 4 
$$\Omega$$
 R  $C_L^{\ V}_{\infty}$  - 8  $\Omega^2$  R (eR)  $C_D^{\ }$  + 6  $\Omega$  (eR)  $C_L^{\ V}_{\infty}$  -

$$- 6 \Omega^{2} R^{2} C_{D}$$
 (6.23)

Por simplicidade, nas expressões (6.22) e 6.23) o ângulo de yaw, δ, foi tomado igual a zero, o que significa que o eixo do rotor está alinhado com a direção do vento; utilizou-se, ainda, a expressão (6.4) para a velocidade do vento, considerando-se, portanto, um fluxo de vento uniforme sobre o disco do rotor.

#### 6.3 Forças generalizadas

As expressões (6.22) e (6.23) representam as forças generalizadas segundo os graus de liberdade  $\beta$  (flap) e  $\zeta$  (lag) do modelo utilizado. Os senos e cossenos resultantes da integração foram expandidos em séries de Taylor e apenas os termos de primeira ordem foram mantidos.

Após linearização de (6.22) e (6.23) as forças aerodinâmicas generalizadas podem ser expressas de forma matricial como:

$$\left\{\begin{array}{c} \mathbf{Q}_{\mathbf{A}} \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c} \mathbf{Q}_{\boldsymbol{\beta}} \\ \mathbf{Q}_{\boldsymbol{\zeta}} \end{array}\right\} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{C}_{\mathbf{A}} \end{array}\right] \left\{\begin{array}{c} \boldsymbol{\dot{\beta}} \\ \boldsymbol{\dot{\zeta}} \end{array}\right\} + \left[\begin{array}{c} \mathbf{K}_{\mathbf{A}} \end{array}\right] \left\{\begin{array}{c} \boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{\zeta} \end{array}\right\} + \left\{\begin{array}{c} \mathbf{F}_{\mathbf{A}} \end{array}\right\}$$

$$(6.24)$$

onde

 $\begin{bmatrix} \mathbb{C}_{\mathbf{A}} \end{bmatrix}$  é a matriz de amortecimento aerodinâmico,

 $\lceil K_A \rceil$  é a matriz de rigidez aerodinâmica, e

 $\left\{ \begin{array}{c} \mathbb{F}_{A} \end{array} \right\}$  é o vetor de forças aerodinâmicas permanentes.

Definindo  $\beta = \frac{1}{24} \rho_{ar} c R^2$ , os termos da equação (6.24) são dados por

$$\begin{bmatrix} \mathbb{C}_{A} \end{bmatrix}_{12} = \mathbb{B} \left[ -6 \Omega \mathbb{R}^{2} \mathbb{C}_{L} - 8 \Omega \mathbb{R} \mathbb{E} \mathbb{C}_{L} - 4 \mathbb{R} \mathbb{C}_{D} \mathbb{V}_{\infty} \right]$$

$$\left[\begin{array}{c} \mathbb{K}_{\mathbf{A}} \end{array}\right]_{11} = 0$$

$$\left[\begin{array}{c} \mathbb{K}_{\mathbf{A}} \end{array}\right]_{21} = 0$$

## CAPÍTULO 7

## ANÁLISE AEROELÁSTICA DE UMA PÁ

### 7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados alguns resultados obtidos utilizando-se o modelo de pá desenvolvido no capítulo 5. As matrizes de amortecimento aerodinâmico, rigidez aerodinâmica e o vetor de forças aerodinâmicas, descritos no capítulo 6, são incorporados às equações de movimento linearizadas da pá.

As variações das frequências naturais da pá com respeito à rotação e ao efeito da gravidade são investigadas. As equações de movimento são resolvidas através do método de integração de Runge Kutta de quarta ordem e respostas dinâmicas em regime são obtidas para diversas configurações de vento. Também é estudada a influência dos parâmetros de modelagem da pá na resposta em regime.

O vento é modelado de três maneiras diferentes :

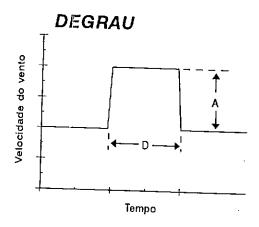
 Velocidade média constante e uniformemente distribuído na área do rotor;

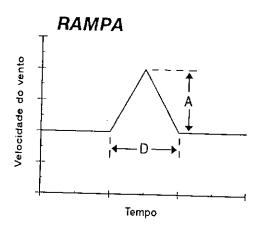
- 2. Velocidade média constante e com gradiente vertical de velocidade devido à rugosidade do solo; e
- 3. Velocidade média constante, com gradiente vertical de velocidade devido à rugosidade do solo e com o efeito sombra da torre.

A resposta transiente da pá é analisada para cargas súbitas provocadas por rajadas discretas de vento. As rajadas são modeladas através de três funções diferentes : tipo degrau, tipo rampa e um-menos-cosseno, que são as funções mais utilizadas nestas simulações (ver Figura 7.1). As características básicas que definem uma rajada discreta são : a função, a amplitude (A) e a duração (D).

No final deste capítulo, a resposta dinâmica da pá devido à carga turbulenta do vento é apresentada em termos de momento na raiz da pá. Sinais de velocidade do vento X tempo, gerados a partir de espectros de energia do vento, foram usados para o cálculo das forças aerodinâmicas turbulentas. Estes sinais foram gerados através do método de <u>autoregressão</u>, onde a simulação de um sinal é feita como combinação linear de alguns valores anteriores somada a um impulso aleatório. Neste trabalho, utilizou-se o algoritmo desenvolvido por Pfeil [36] para a simulação do vento turbulento.

Os dados geométricos e estruturais utilizados são de uma pá LM 8.5VX, que é o modelo usado na turbina eólica de Fernando de Noronha (Anexo 1). Registros de vento (velocidades médias de vento e direções predominantes, rajadas, intensidade de





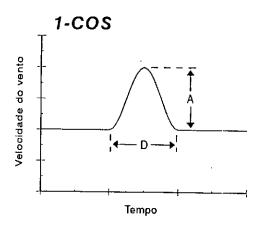


Figura 7.1 - Funções para modelagem de rajadas.

A - amplitude D - duração

turbulência, etc.) do local onde a turbina está instalada serviram de referência para o cálculo das forças aerodinâmicas.

As características estruturais e aerodinâmicas mais importantes do rotor estão descritas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Características estruturais e aerodinâmicas do rotor da turbina eólica de Fernando de Noronha.

ESPECIFICAÇÕES DO ROTOR

NÚMERO DE PÁS	3
DIÂMETRO DO ROTOR	1 7 m
ALTURA DO EIXO DO ROTOR	23 m
ROTAÇÃO NOKINAL	60 RPM
PERFIL AERODINÂMICO DA PÁ	NACA 63-200
COMPRIMENTO DA PÁ	8.2 m
MASSA DA PÁ	~ 360 Kg
CONEXÃO COH O CUBO	APARAFUSADA
FREQUÊNCIAS NATURAIS	$(1^{\frac{a}{-}}) \sim 2.5 \text{ Hz}$
,	$(2-) \sim 4.7 \text{ Hz}$
VELOCIDADE DO VENTO NONINAL	12 m/s

## 7.2 Frequências naturais

Para qualquer sistema mecânico excitado dinamicamente a etapa inicial da análise dinâmica é o cálculo das frequências naturais. No caso de turbinas eólicas de eixo horizontal o rotor

está se movendo em relação a uma torre flexível e, portanto, para cada posição relativa entre os dois componentes estruturais existem frequências naturais diferentes associadas. Para simplificar, pode-se considerar o rotor como uma estrutura isolada e assim, determinar os autovalores e autovetores de forma convencional. A validade desta aproximação depende da separação entre as frequências naturais da torre e do rotor bem como da massa relativa do rotor e do resto da estrutura.

Nesta  $1^{\frac{a}{2}}$  aproximação, apesar do rotor estar separado da torre, o cálculo dos autovalores e autovetores é complicado por dois fatores. A rotação do rotor provoca forças centrífugas que alteram características as de riqidez das pás e, consequentemente, as frequências naturais variam velocidade angular. Além disso, ao girar, as pás ficam sujeitas às forças gravitacionais que agem ciclicamente tracionando-as e comprimindo-as. Esta ação também modifica as frequências naturais das pás.

A solução do problema de autovalor do sistema homogêneo  $(0^{\circ} = 0)$  da equação (5.41) fornece as seguintes expressões :

$$\omega_{\beta G}^{2} = \omega_{\beta}^{2} + \Omega^{2} (1 + R) + G \cos \psi$$

$$\omega_{\zeta G}^{2} = \omega_{\zeta}^{2} + \Omega^{2} R + G \cos \psi$$
(7.1)

onde o subscrito c indica que as frequências naturais  $\omega_{eta c}$  e  $\omega_{\zeta c}$  são referentes a um sistema mecânico girante. Elas são função da

velocidade angular do sistema e, também, periódicas devido a ação da gravidade.

Inicialmente, despreza-se o efeito da gravidade e as frequências naturais girantes (7.1) podem ser reescritas como

$$\omega_{\beta G}^{2} = \omega_{\beta}^{2} + \Omega^{2} (1 + R)$$

$$\omega_{\zeta G}^{2} = \omega_{\zeta}^{2} + \Omega^{2} R$$
(7.2)

As variações das frequências naturais da pá com a rotação, dadas pelas equacões (7.2) são, geralmente, apresentadas através de um gráfico chamado de diagrama de interferência ou Diagrama de Campbell [17,18]. A Figura 7.2 mostra o Diagrama de Campbell para a turbina eólica em operação na ilha de Fernando de Noronha.

A primeira frequência natural de flexão da torre (ver anexo) aparece, no diagrama, como uma reta horizontal uma vez que ela não varia com a velocidade angular do rotor. frequências naturais de flexão da pá, tanto em flap quanto em lag, apresentam ligeiras inclinações caracterizando o aumento das frequências com o aumento da rotação. O diagrama mostra, também, a frequência de rotação (reta 1/rev) e múltiplos desta frequência (2/rev, 3/rev, etc.). Estas retas são chamadas de harmônicos. Um problema de ressonância empotencial identificado quando um raio harmônico e uma curva de frequência natural se aproximam muito ou se cruzam perto da rotação nominal do rotor. No caso da turbina eólica de Fernando de Noronha, dois

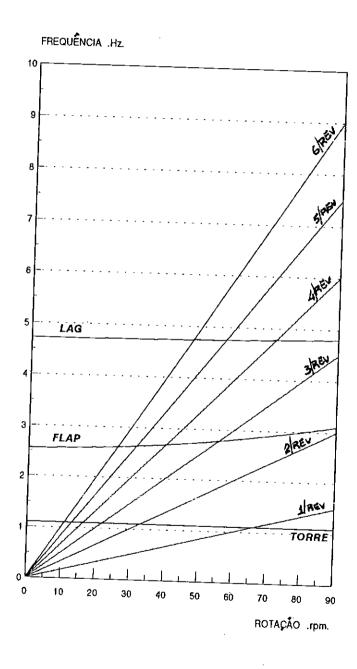


Figura 7.2 - Diagrama de Campbell para a turbina eólica de Fernando de Noronha.

pontos, em particular, merecem atenção; o cruzamento entre a curva de flap e o raio harmônico 3/rev, e o cruzamento entre a 1º frequência da torre e o raio 1/rev. A Tabela 7.2 apresenta alguns valores das frequências naturais em flap e lag calculados pelas expressões (7.2) para diferentes valores da velocidade angular.

Tabela 7.2 - Variação das frequências naturais em relação à velocidade angular.

ROTAÇÃO (RPH)	FREQUÊNCIAS NA FLAP	TURAIS (Hz) LAG
0	2.56	4.72
20	2.59	4.72
40	2.68	4.74
60	2.82	4.76
80	3.0	4.79

O efeito da gravidade é apresentado na Figura 7.3. As frequências naturais girantes (7.1) foram calculadas para cada posição angular da pá, assumindo uma velocidade angular de 60 rpm. Na posição vertical inferior ( $\psi$  = 0° ou 360°) a pá está totalmente tracionada devido à força gravitacional e as frequências atingem o valor máximo. Na posição vertical superior ( $\psi$  = 180°) a pá está comprimida ao máximo e apresenta os menores valores para as frequências naturais. A Tabela 7.3 apresenta os valores das frequências naturais de uma pá que gira a 60 rpm quando esta se encontra nas posições verticais e horizontais.

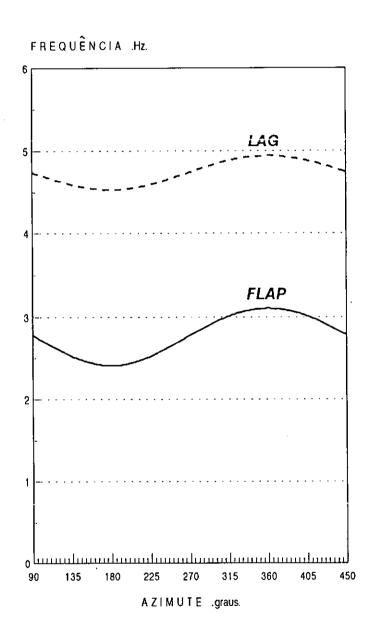


Figura 7.3 - Variação das frequências naturais da pá devido à gravidade.

As variações dos momentos em flap e lag em relação à velocidade do vento é mostrada na Figura 7.4. O gráfico apresenta os momentos máximos na raiz da pá em flap e lag para as seguintes condições: rotação de 60rpm, excentricidade de 20% e velocidade média do vento com gradiente vertical de velocidade. Este gráfico explica porque uma pá está quase sempre vibrando durante operação. Devido à contínua variação da velocidade no fluxo de vento em torno da velocidade média as forçasaerodinâmicas não são constantes provocando o movimento oscilatório na pá (principalmente em flap).

Tabela 7.3 - Variação das frequências naturais devido à ação da força gravitacional.

POSIÇÃO ANGULAR (AZIMUTE)	FREQUÊNCIAS NA FLAP	TURAIS (Hz)
90°	2.82	4.76
180°	2.41	4.53
270°	2.82	4.76
360°	3.11	4.94
90°	2.82	4.76

A Figura 7.5 mostra a variação dos momentos na raiz da pá em relação à velocidade angular da pá. Este gráfico salienta a influência da força centrífuga na resposta da pá. Com o aumento da rotação, e da força centrífuga (proporcional a  $\Omega^2$ ), o momento na raiz da pá em flap cresce bastante. Por outro lado, o momento em lag não é influenciado pela força centrífuga já que as

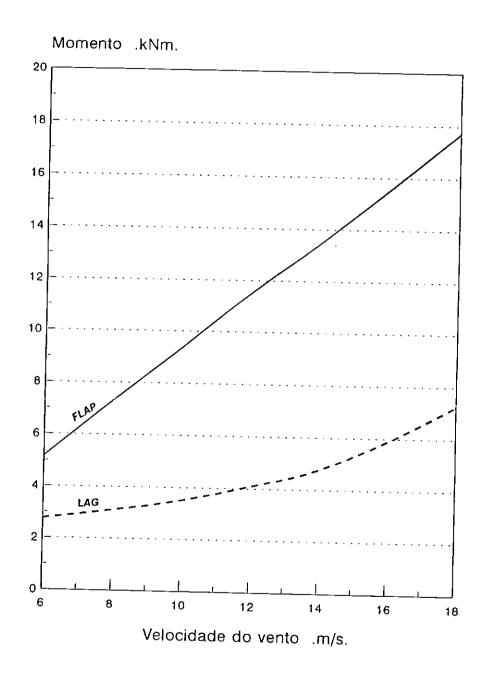


Figura 7.4 - Variação dos momentos na raiz da pá em relação a velocidade média do vento.

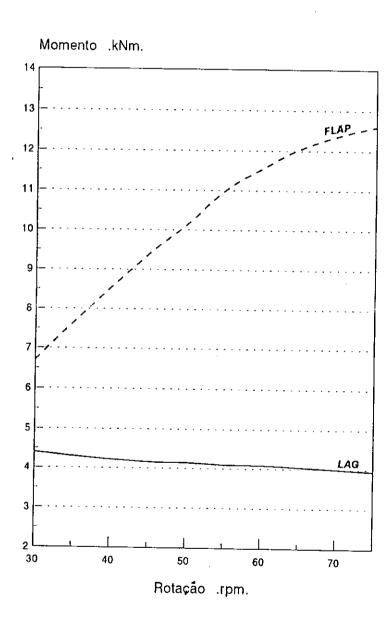


Figura 7.5 - Variação dos momentos na raiz da pá em relação a velocidade angular.

oscilações (na direção de lag) acontecem no plano de rotação. A curva decrescente do gráfico é explicada pelo valor do coeficiente de arrasto,  $C_D$ , que é muito maior para pequenas rotações (grandes ângulos de ataque,  $\alpha$ ).

### 7.3 Respostas dinâmicas em regime

A investigação da influência do gradiente vertical de velocidade do vento mostrou que este efeito é considerável na resposta dinâmica da pá. A Figura 7.6 compara a resposta dinâmica (momento em flap na raiz da pá) para duas configurações de vento diferentes. Na primeira, é considerada uma velocidade de vento média constante (V = 12 m/s) e uniforme em todo o disco do rotor e, na segunda, a velocidade média do vento varia segundo um gradiente vertical de velocidades (definido por uma lei exponencial com expoente p = 0.15, V = 12 m/s e H = 23 m). Na configuração 1 a resposta mostra que cerca de 20 segundos após alcançar a rotação nominal a pá ainda mostra vibrações na sua 1ª frequência natural de flexão, cujo valor médio está em torno de 2.8 Hz (ver tabela 7.3). A vibração da pá para o vento com gradiente vertical é dominada pela frequência de 1 Hz, que é a frequência de rotação da pá, e está em regime.

A Figura 7.7 mostra uma comparação de duas respostas em regime da pá sob a ação de dois gradientes verticais de velocidade de vento diferentes. O momento na raiz da pá é

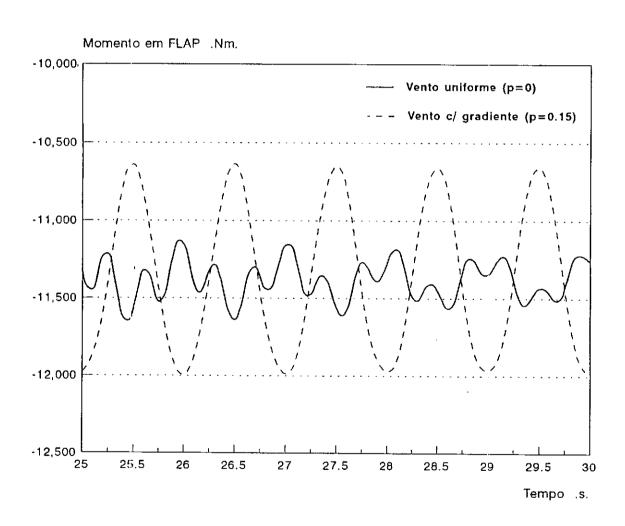
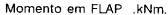


Figura 7.6 - Momento na raiz da pá em flap após a pá atingir a rotação nominal.

calculado para gradientes de velocidade gerados por terrenos lisos ( $_P$  = 0.15) e por terrenos rugosos ( $_P$  = 0.3). Há uma grande diferença nas amplitudes de oscilação indicando que para gradientes de velocidade suaves o valor dos momentos é menor e as amplitudes de oscilação são menores.

Utilizou-se, também, a expressão exponencial que define a variação da velocidade do vento com a altura para simular um fluxo turbulento. Para valores grandes (maiores que 0.5) do expoente o gradiente de velocidades não representa o efeito da rugosidade do solo mas pode ser visto como um fluxo turbulento uma vez que o resultado é uma grande variação no valor das velocidades entre duas alturas diferentes. A resposta da pá para p = 0.8 é mostrada na Figura 7.8 e é comparada com as respostas da figura anterior. As frequências de oscilação das três respostas são dominadas pela rotação (1 Hz) mas as amplitudes para o fluxo "turbulento" são bem maiores. O valor do momento máximo na condição p = 0.8 é cerca de 20 % maior que em p = 0.15.

A resposta dinâmica em regime também foi obtida levando-se em conta o efeito sombra da torre. O vento foi modelado com velocidade média constante (V = 12m/s) e com gradiente vertical de velocidade (p = 0.15). Na posição azimutal  $\psi = 0^{\circ}$  a velocidade do vento tem o valor 6m/s; e esta variação é descrita por uma função 1-CoS invertida. A Figura 7.9 apresenta o momento em flap na raiz da pá para a condição de sombra da torre. A resposta em regime mostra a pá vibrando na  $1^{\frac{1}{2}}$  frequência natural ( $\cong 2.8$  Hz). O valor do momento sofre uma redução quando a



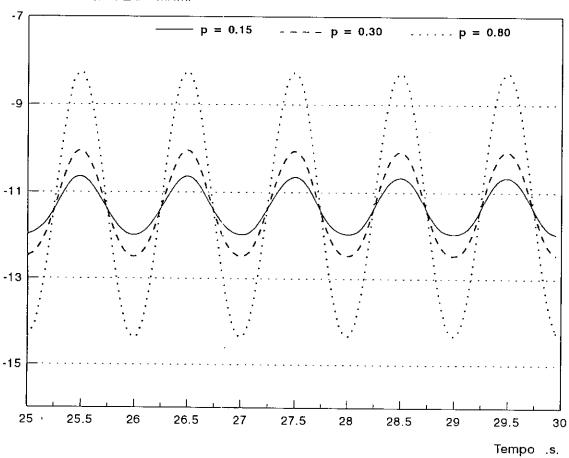


Figura 7.7 - Comparação da resposta em regime da pá para velocidade de vento média constante com gradientes verticais diferentes.

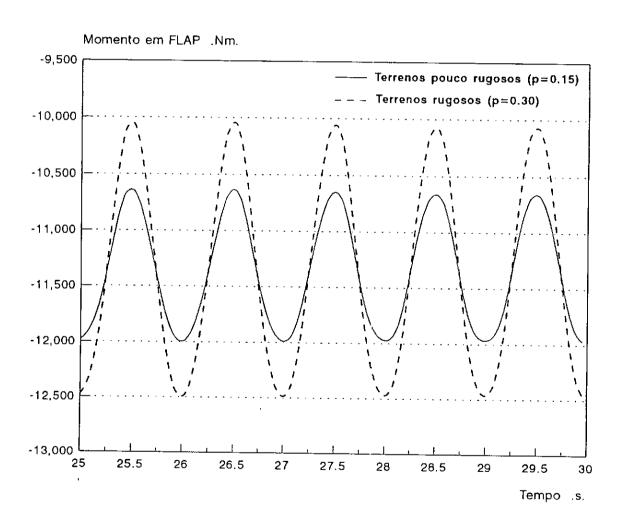


Figura 7.8 - Comparação dos momentos na raiz da pá para velocidade de vento média constante (V = 12 m/s) com gradientes verticais diferentes.

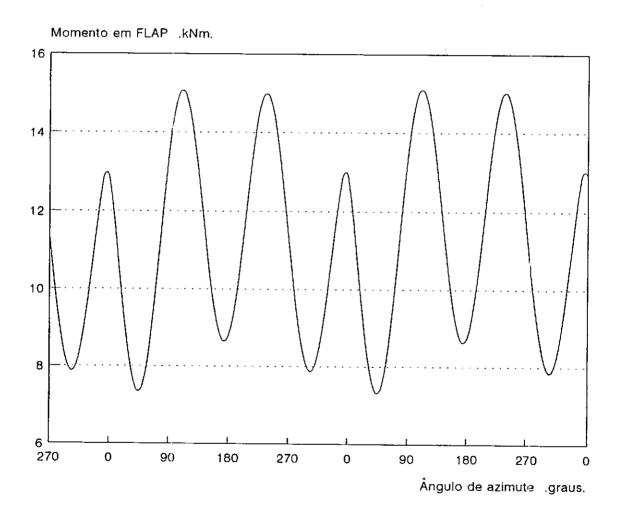
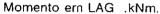


Figura 7.9 - Momento na raiz da pá - efeito sombra da torre. Velocidade média do vento = 12 m/s



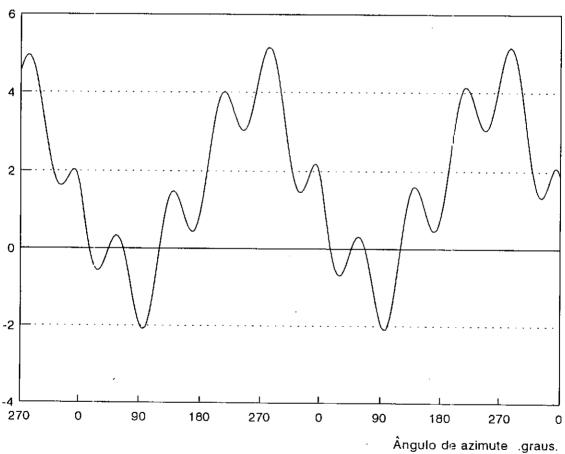
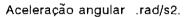


Figura 7.10 - Momento em lag na raiz da pá - efeito sombra da torre. Vel. média do vento = 12 m/s.



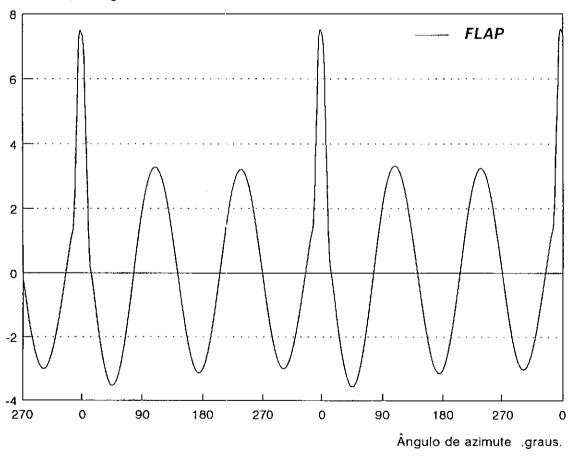


Figura 7.11 - Aceleração na ponta da pá - efeito sombra da torre.

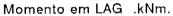
pá passa pela posição azimutal  $\psi=0^\circ$  (vertical inferior). Além disso, as oscilações neste caso são bem maiores que as apresentadas para a condição sem sombra da torre (comparar com a resposta em regime mostrada na Figura 7.6) e o valor do momento máximo é cerca de 25% maior. A Figura 7.10 mostra o momento em lag na raiz da pá para a condição de sombra da torre. Esta resposta é, ainda, dominada pela frequência de rotação ( 1 Hz) porém nota-se pequenas vibraçõesna frequência natural associada a lag ( $\cong$  4.8Hz). O valor máximo do momento também é acrescido de  $\cong$  25% em relação a resposta sem o efeito sombra da torre. A aceleração angular em flap na ponta da pá é apresentada na Figura 7.11, onde nota-se claramente a excitação dinâmica provocada pela diminuição brusca da velocidade do vento quando a pá passa por trás da torre.

# 7.4 Respostas transientes

Várias condições de rajadas de vento discretas foram utilizadas para se obter as rspostas dinâmicas (transientes) de pá. As características do vento são : velocidade média constante de 12 m/s e gradiente vertical de velocidade definido por uma lei exponencial com  $_{\rm P}$  = 0.15,  $_{\rm o}$  = 12 m/s e  $_{\rm o}$  = 23 m. As rajadas discretas são variações da velocidade do vento, regidas por uma função (neste caso : 1-COS, RAMPA ou DEGRAU), que são adicionadas à configuração de vento descrita acima.

Nas Figuras 7.12, 7.13, 7.14 e 7.15 são apresentadas as respostas dinâmicas em termos de momentos na raiz da pá e aceleração na ponta da pá para uma rajada de vento discreta modelada com uma função tipo RAMPA com velocidade máxima de vento de 16 m/s (amplitude A = 4 m/s) e uma duração D = 0.5 s. Os momentos em flap e lag são mostrados nas Figuras 7.12 e 7.13, respectivamente. A rajada de vento é aplicada entre  $t_1$  = 12 s e  $t_2$  = 12.5 s. Neste intervalo dá-se o valor máximo dos momentos sendo que em flap o aumento é bem mais acentuado; cerca de 45 % maior que a resposta em regime (antes de  $t_1$ ). As acelerações angulares são mostradas nas Figuras 7.14 e 7.15. Um aumento considerável dos valores máximos e das amplitudes de vibração é verificado para as duas respostas.

A Figura 7.16 mostra a rsposta dinâmica em termos de momento em flap para uma rajada discreta tipo 1-COS e a Figura uma rajada discreta tipo **DEGRAU** com as características (mesma amplitude e mesma duração) da rajada tipo RAMPA apresentada na Figura 7.12. Através destas três figuras pode-se analisar a influência do tipo de rajada (função) resposta dinâmica da pá. A rajada 1-COS provoca momentos máximos maiores que a rajada RAMPA porém as oscilações após a rajada não diferem muito, atingindo o regime praticamente ao mesmo tempo. Por outro lado, a resposta da rajada DEGRAU além de apresentar um momento máximo maior também provoca maiores amplitudes de oscilação, levando mais tempo que as outras duas para atingir o regime.



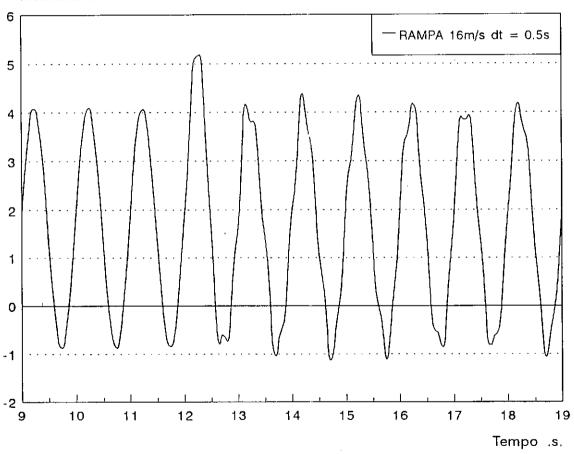


Figura 7.13 - Momento em lag na raiz da pá durante rajada.

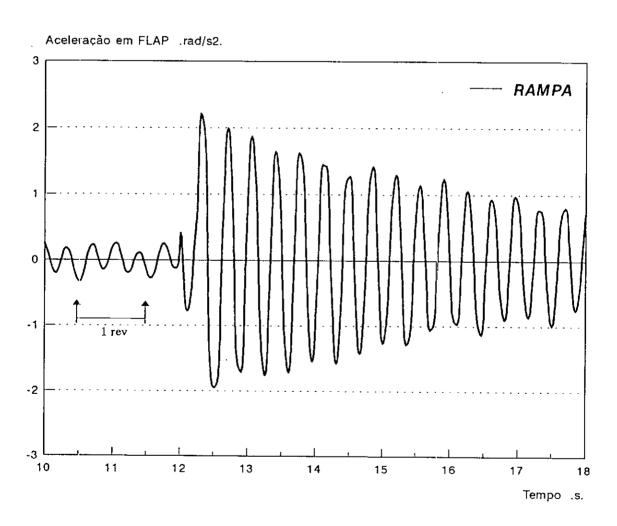


Figura 7.14 - Aceleração na ponta da pá durante rajada tipo RAMPA. Vel. média do vento = 12 m/s.

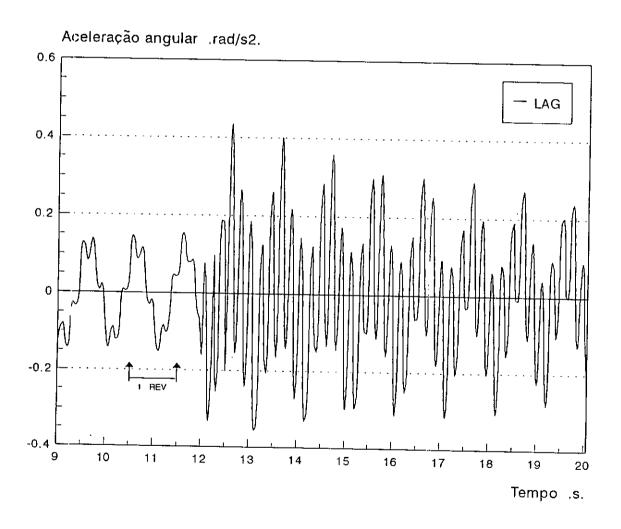
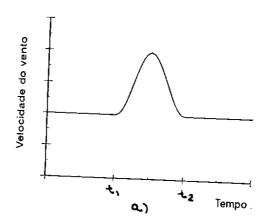
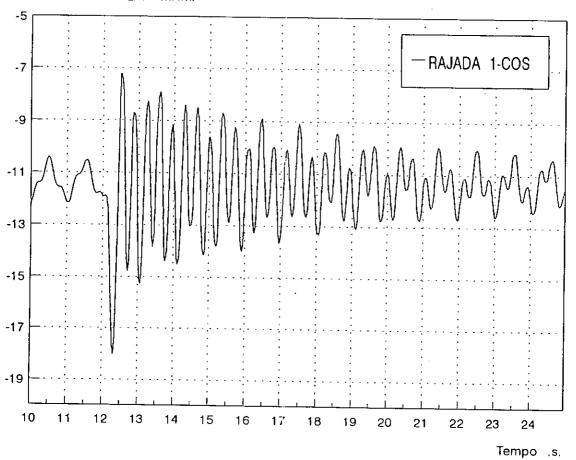


Figura 7.15 - Aceleração na ponta da pá (em lag) durante rajada tipo RAMPA. Vel. média do vento = 12 m/s.







b)

Figura 7.16 - a) Rajada tipo 1-COS,  $t_1 = 12s$  e  $t_2 = 12.5s$ b) Momento em flap na raiz da pá.

As Figuras 7.18 e 7.19 mostram a comparação da resposta dinâmica obtida para as rajadas de vento modeladas com a mesma função (1-COS) mas com parâmetros diferentes. No 1º caso a amplitude da rajada é 4 m/s e a duração 0.5 s, no 2º caso a amplitude é de 8 m/s e a duração de 1 s. Na Figura 7.18 é apresentado o momento em lag na raiz da pá e na Figura 7.19 o momento em flap. Na resposta em flap o valor máximo do momento é provocado pela condição 2 (A = 8 e D = 1) porém as amplitudes de vibração após a rajada são maiores para a condição 1. Isto acontece porque a duração da rajada na condição 2 é relativamente grande e a função 1-COS é suave fazendo com que a pá responda quase que estaticamente à excitação imposta.

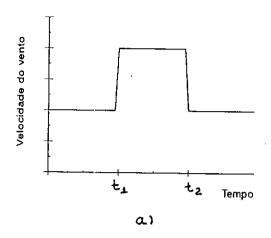
Este mesmo argumento pode ser usado para explicar as pequenas amplitudes de vibração da rajada 1-COS mostradas nas Figuras 7.20 e 7.21. Nestas figuras são comparadas as respostas dos momentos em flap na raiz da pá para os três tipos de rajadas. As rajadas tem amplitude A = 8 m/s (velocidade de vento máxima de 20 m/s) e duração D = 1 s. A rajada tipo DEGRAU provoca um momento máximo cerca de 35% maior que as outras duas, e cerca de 130% maior que a resposta em regime.

O momento em lag na raiz da pá provocado por uma rajada tipo DEGRAU (A = 8 m/s e D = 1s) é comparado com a resposta da pá em regime (Figura 7.22). O momento máximo provocado pela rajada é cerca de 150% maior que a resposta em regime. Antes da rajada as oscilações tem a frequência da rotação (1Hz); após a rajada a pá passa a oscilar também na frequência natural de lag.

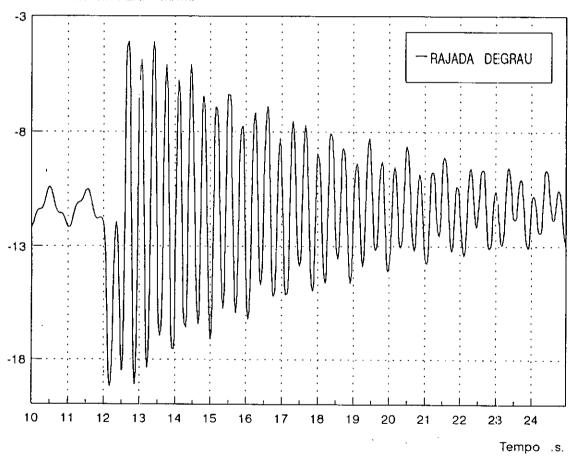
As Figuras 7.23 e 7.24 apresentam o momento na raiz da pá e a aceleração angular, em lag para uma condição especial de aplicação dos freios mecânicos. A pá que está inicialmente rotacionando a 60 rpm é freiada (t<sub>1</sub> = 10 s) e pára depois de 8 segundos de desaceleração. A Figura 7.25 mostra o momento na raiz da pá em lag para uma operação de frenagem similar porém com a aplicação menos brusca dos freios. Os freios são aplicados em t<sub>1</sub> = 10 s e o tempo total de frenagem é de 15 segundos.

### 7.5 Respostas dinâmicas devido à turbulência

A análise aeroelástica da pá será concluída com a resposta dinâmica devido às cargas estocásticas. Um sinal de vento turbulento (Figura 7.26), com velocidade média de 12 m/s e intensidade de turbulência em torno de 0.15, é usado para o cálculo das forças aerodinâmicas turbulentas. As respostas dinâmicas, momentos na raiz da pá, são apresentadas nas Figuras 7.27 e 7.28. Nota-se que existe uma grande quantidade de frequências contidas nas respostas e que as amplitudes de vibração são, de modo geral, bem maiores que as obtidas com fluxo de vento laminar.



Momento em FLAP .kNm.



**b**>

Figura 7.17 - a) Rajada tipo DEGRAU,  $t_1 = 12s$  e  $t_2 = 12.5s$  b) Momento em flap na raiz da pá.

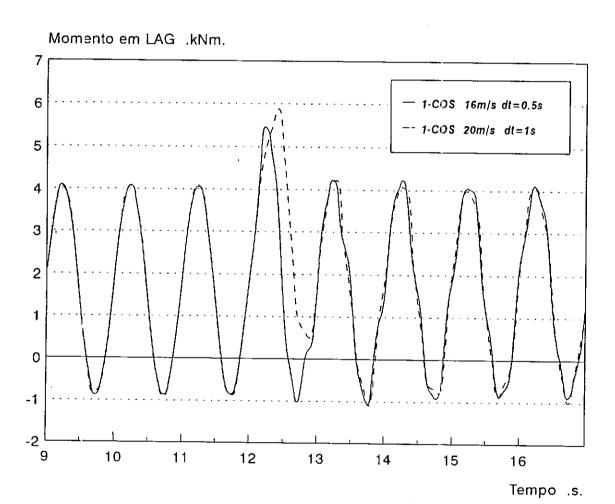


Figura 7.18 - Momento na raiz da pá - influência da amplitude e duração das rajadas na resposta transiente.

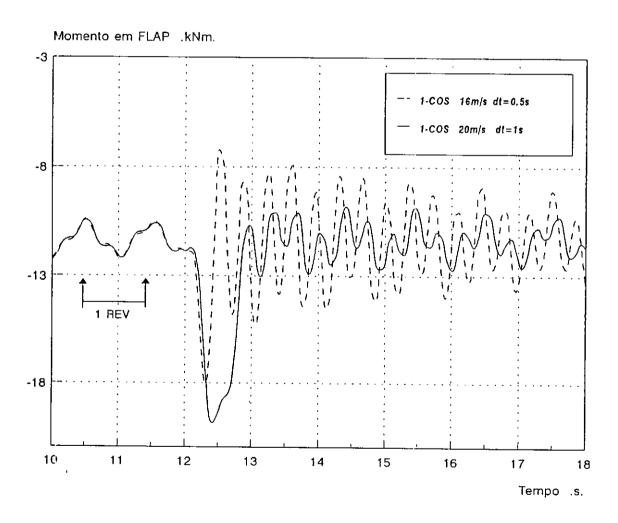


Figura 7.19 - Momento na raiz da pá - influência da amplitude e duração das rajadas na resposta transiente.

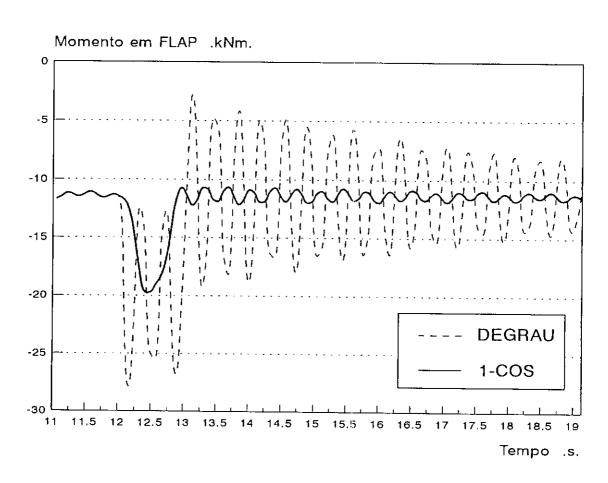


Figura 7.20 - Momento na raiz da pá - comparação da resposta transiente para rajadas modeladas com funções diferentes.

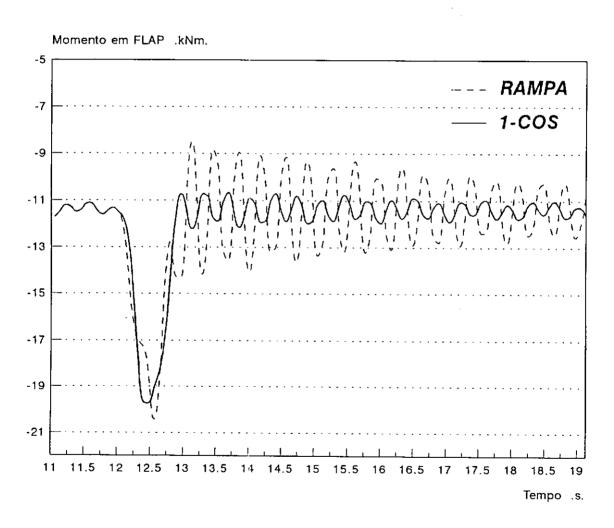


Figura 7.21 - Momento na raiz da pá - comparação da resposta transiente para rajadas modeladas com funções diferentes.

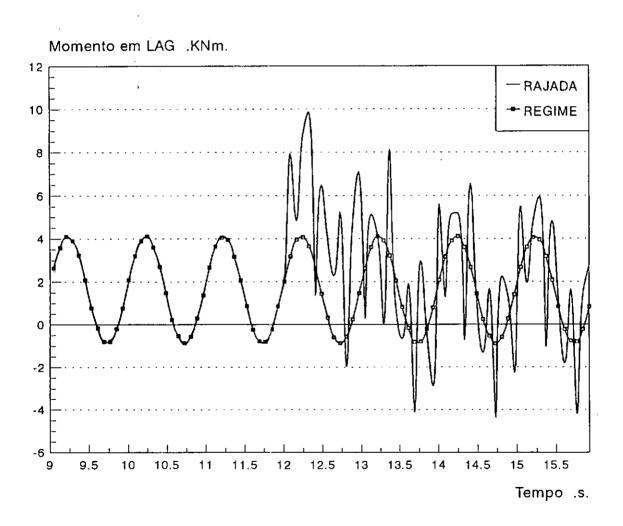
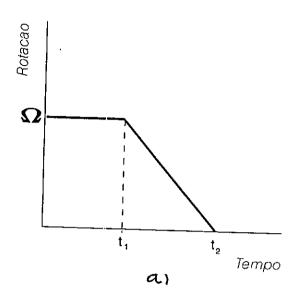


Figura 7.22 - Comparação entre a resposta em regime e a resposta devido a uma rajada tipo DEGRAU.



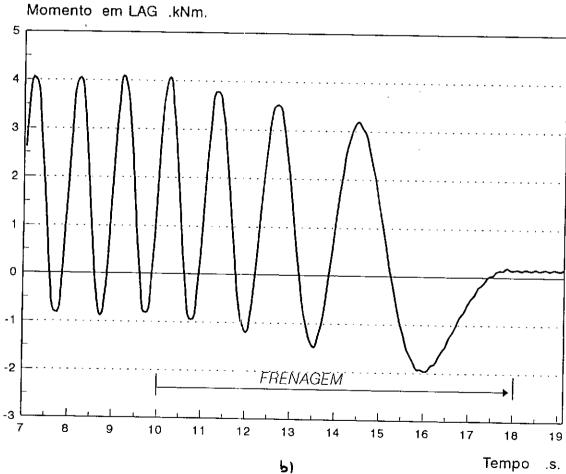


Figura 7.23 - a) Função frenagem (8 segundos)
b) Momento na raiz da pá durante frenagem

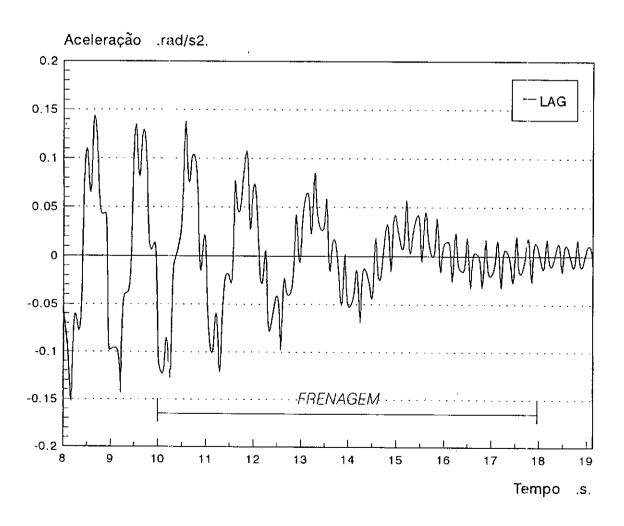


Figura 7.24 - Aceleração na ponta da pá durante frenagem.

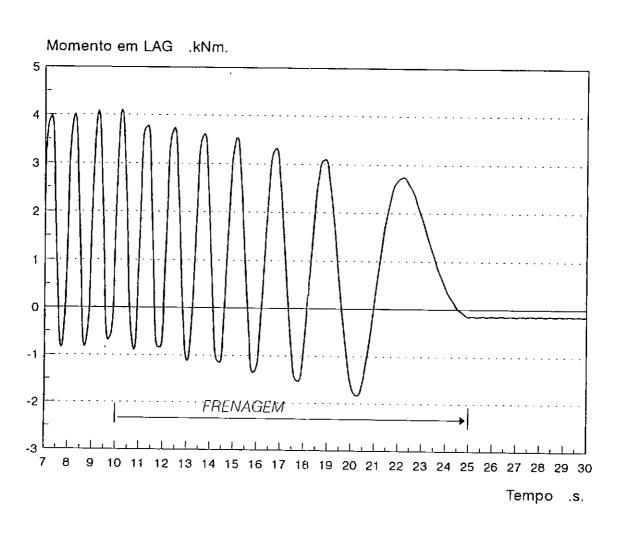
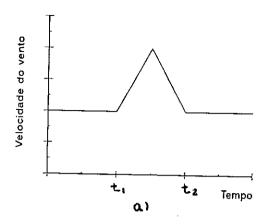


Figura 7.25 - Momento na raiz da pá durante frenagem





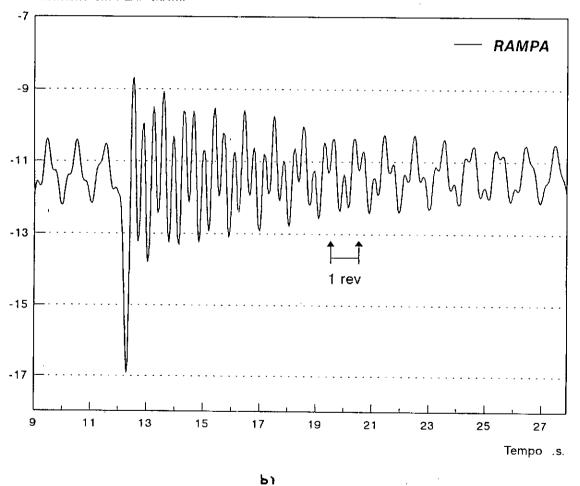


Figura 7.12 - a) Rajada tipo RAMPA,  $t_1 = 12s$  e  $t_2 = 12.5s$  b) Momento em flap na raiz da pá.

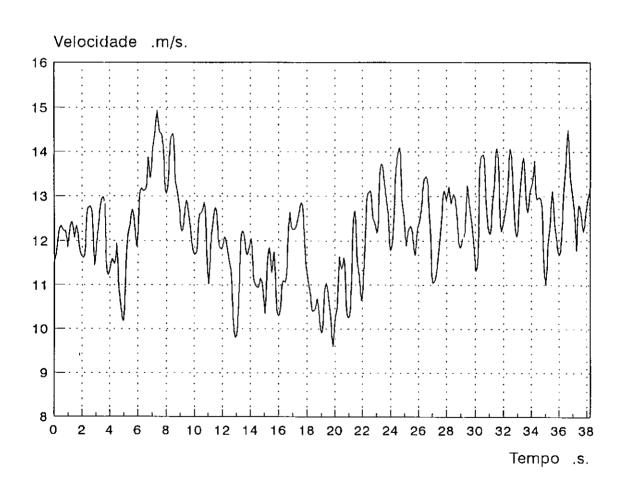


Figura 7.26 - Sinal de vento turbulento gerado pelo método de autoregressão.

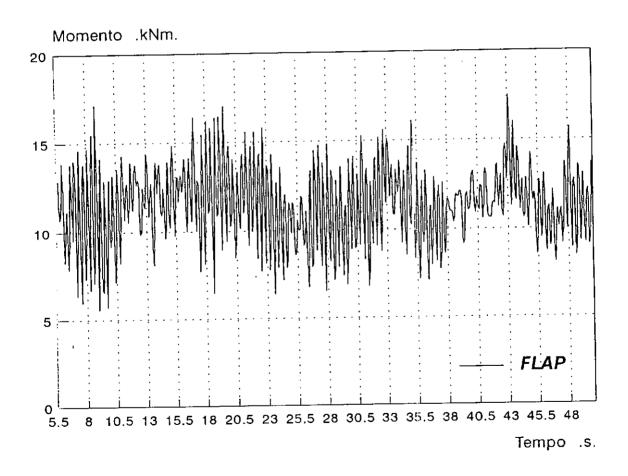


Figura 7.27 - Momento na raiz da pá - carga estocástica.

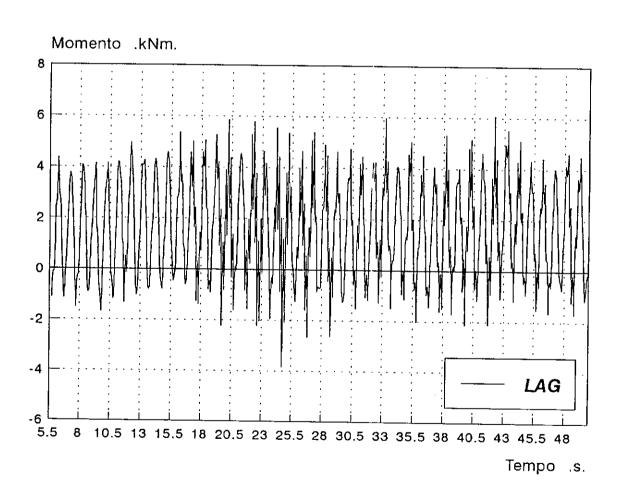


Figura 7.28 - Momento na raiz da pá - carga estocástica.

### CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

A utilização de modelos analíticos para a análise aeroelástica de turbinas eólicas de eixo horizontal mostra-se bastante satisfatória pela sua simplicidade e clareza dos resultados. A formulação analítica permite a visualização e interpretação dos termos da equação de movimento do sistema e a consequente quantificação das forças envolvidas na análise. O modelo matemático, com apenas dois graus de liberdade (flap e lag), desenvolvido neste trabalho, apresentou resultados que aproximam bem o comportamento dinâmico esperado para uma pá real. Os valores obtidos para os momentos na raiz da pá estão bem próximos dos valores calculados, através do programa BLADES [20], pelo Grupo de Energia Eólica da UFPE. Como tal, esse modelo poderá servir também, através de seus resultados, como referência para comparações e calibrações de modelos numéricos mais refinados.

Com a hipótese de estarem rigidamente ligadas ao cubo do eixo do rotor, as pás podem ser tratadas separadamente. Desta forma é indiferente saber se a análise está sendo feita para um

de uma pá, de duas ou de três pás axissimétricas. rigidamente ligadas ao cubo do rotor. Portanto, um rotor de três pás pode ser tratado da mesma maneira que o modelo de uma pá aqui desenvolvido. Pode-se ainda fazer um modelo analítico inclusão de um completo com a ou mais graus de liberdade representando os movimentos transversais e de torção do topo da massas modais associadas aos respectivos das fundamentais de vibração da torre. Isto será relevante para o estudo de casos particulares onde possam ocorrer efeitos da interação rotor/torre. O desenvolvimento deste modelo analítico poderá ser feito com álgebra simbólica, isto é, computação algébrica.

O uso de computação algébrica na presente formulação das equações de movimento e na formulação das forças aerodinâmicas foi imprescindível, assegurando o correto desenvolvimento das equações e evitando o penoso trabalho de manipulação algébrica para obtenção dessas equações.

A análise de rajadas salientou a forte sensibilidade das pás de TEEHs às variações do fluxo de vento. O aumento significativo no valor dos momentos, devido à ocorrência de rajadas discretas, mostrou a importância da consideração destas cargas na análise aeroelástica. Seria interessante, portanto, fazer um estudo mais aprofundado de rajadas de vento discretas, com a utilização de outros tipos de funções.

A importância das cargas estocásticas ficou evidenciada pelos resultados obtidos com a simulação do vento turbulento.

Sinais de vento foram gerados através do método de autoregressão e as forças turbulentas calculadas a partir destes sinais provocaram amplitudes de vibração maiores que as obtidas com vento laminar. Observou-se, também, uma grande quantidade de frequências contidas na resposta dinâmica do sistema.

alternativa modelos analíticos aos através da utilização de um programa baseado na técnica de elementos finitos. Um artifício matemático que possibilita o uso deste método foi desenvolvido para este trabalho e é apresentado na seção 4.4. A grande vantagem de se utilizar um modelo discretizado em elementos finitos é a possibilidade de se obter os deslocamentos, tensões e momentos em qualquer ponto da turbina (pás, componentes da estrutura da torre outros estruturais). componentes Infelizmente não foi apresentar os resultados do programa especialmente desenvolvido para este fim, optando-se pela apresentação completa do modelo analítico resultados. seus Problemas de convergência instabilidade numéricas apresentadas pelo modelo em elementos finitos podem ter sido causados por uma discretização inadequada turbina ou pela característica periódica das matrizes do sistema. A investigação destes problemas, para dar prosseguimento ao desenvolvimento do modelo em elementos finitos, já está sendo realizada.

A análise dinâmica no domínio da frequência fica também como sugestão para o prosseguimento deste trabalho. Esta análise possibilitará o estudo da resposta do sistema devido à ação de

ventos turbulentos, e o estudo da estabilidade dinâmica no caso de componentes mais flexíveis que possam sofrer o efeito de acoplamento modal.

Sugere-se também fazer um estudo mais aprofundado de rajadas de vento discretas, com a utilização de outros tipos de funções. Além disso o vento pode ser modelado de forma distinta, através da digitalização de sinais de velocidade de vento X tempo obtidos de anemógrafos computadorizados ou de sinais equivalentes simulados a partir de espectros de vento.

A verificação do modelo analítico aqui apresentado e de futuros modelos deverá ser feita por meio de comparações de seus resultados com aqueles a serem obtidos por meio de ensaios dinâmicos experimentais de modelos reduzidos, ou preferencialmente, de turbinas eólicas existentes, como aquela instalada em Fernando de Noronha.

# REFERÊNCIAS

(por ordem alfabética)

- BEURSKENS, J. (1988), Recomended Practices for Wind Turbine Testing - Structural Safety, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Holanda.
- 2. BIERBOOMS, W. (1990), A Dynamic Model of a Flexible Rotor description of the mathematical model, Report IW89.034R, Delft University of Technology, Holanda.
- 3. BONGERS, P., et al. (1990), An Integrated Dynamic Model of a Flexible Wind Turbine, Report of Delft University of Technology, Holanda.
- 4. CARNE, T. G. et al. (1982), Finite Element Analysis and Modal Testing of a Rotating Wind Turbine, Sandia National Laboratories, report SAND82-0345, EUA.
- 5. 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.

- 6. DELAUNAY, J. (1989), A Gust Model for the Design of Large
  Horizontal Axis Wind Turbines, European Wind Energy
  Conference EWEC, pg. 509-512, Glasgow.
- 7. DERDELINCKX, R. e Hirch, Ch. (1986), Calculation and Visualisation of the Dynamic Response of Wind Turbine, European Wind Energy Conference EWEC, pg. 411-416, Roma.
- 8. DERDELINCKX, R. e Hirsch, Ch. (1989), Dynamic Load
  Calculations of Horizontal Axis Wind Turbines,
  European Wind Energy Conf. EWEC, pg. 247-277,
  Glasgow.
- 9. DUGUNDJI, J. e Wendell, J. H. (1983), Review of Analysis Methods for Rotating Systems with Periodic Coefficients, American Institute of Aeronautics and Astronautics - AIAA journal V.21 no.6 pg.890-897.
- 10. EGGLESTON, D. M. e Stoddard, F. S. (1987), Wind Turbine Engineering Design, Van Nostrand Reinhold Company Inc., EUA.

- 11. EOLICA (1990), Análise da Interação do Vento com o Relevo para a Localização de Turbinas Eólicas na Ilha de Fernando de Noronha, Relatório técnico interno do Grupo de Energia Eólica EOLICA/UFPE, Recife.
- 12. EOLICA (1992), Caracterização do Vento na Ilha de Fernando de Noronha, Relatório técnico interno do Grupo de Energia Eólica - EOLICA/UFPE, Recife.
- 13. EOLICA (1992), Fadiga em Pás de Turbinas Eólicas aspectos básicos, Relatório técnico interno do Grupo de Energia Eólica EOLICA/UFPE, Recife.
- 14. FEITOSA, E. A. N. (1989), Parametric Resonance in Horizontal Axis Wind Turbines, Ph.D. Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, University of Southampton, Inglaterra.
- 15. FEITOSA, E. A. N. e Mead, D. J. (1989), Parametric Resonance of Horizontal Axis Wind Turbines, Wind Engineering, Vol. 13 no.4, pg. 213-219.
- 16. FOLLINGS, F. J. et al. (1989), Gust Modelling for Wind

  Turbines: Development of a Hand Book for Wind

Turbine Design, European Wind Energy Conf. - EWEC, pg. 513-517, Glasgow.

- 17. FRERIS, L. L., redator, (1990), Wind Energy Conversion Systems, Prentice Hall International, Inglaterra.
- 18. GARRAD, A. D. (1983), Dynamics of Wind Tturbines, IEE proceedings, vol. 130, no. 9, pg. 523-530.
- 19. GARRAD, A. D. (1987), The Use of Finite Element Method for Wind Turbine Dynamics, Proceedings of the IX British Wind Energy Association Conference BWEA, pg. 79-83, Edinburgo.
- 20. GARRAD, A. D., Hassan, U. (1986), The Dynamic Response of Wind Turbines for Fatigue Life and Extreme Load Prediction, European Wind Energy Conf. - EWEC, pg. 401-406, Roma.
- 21. GARRAD, A. D., Hassan, U. (1991), Realistic Loads Experienced by Wind Turbines, European Wind Energy Conf. - EWEC, Glasgow.
- 22. GARRAD, A. D., Patel, M. H. (1988), A Finite Element

Approach to the Aeroelastic Analysis of Flexible Rotors Attached to Flexible Supports, International Conference on Vibrations in Rotating Machinery - IME, pg. 615-620.

- 23. GARRAD, A. D., Quarton, D. C. (1986), Symbolic Computing as a Tool in Wind Turbine Dynamics, Journal of Sound and Vibration 109-1, pg. 65-78.
- 24. LE GOURIÉRÈS, D. (1982), Wind Power Plants: theory and design, Pergamon Press Ltd., Inglaterra.
- 25. HIRSCH, Ch., Derdelinckx, R., Islam, M. Q. (1984), A

  Theoretical Investigation of the Design of a

  Horizontal Axis Wind Turbine, European Wind Energy

  Conference EWEC, pg. 124-129, Hamburgo.
- 26. HOLLEY, W. E. (1991), Dynamic Loads and Aeroelastics, European Wind Energy Conf. - EWEC, report on parallel session D1, Amsterdam.
- 27. HOLLEY, W. E. e Thresher, R. W. (1981), Atmospheric

  Turbulence Parameters for Modelling Wind Turbine

  Dynamics, Proceedings of a Workshop Large

Horizontal Axis Wind Turbines, NASA, EUA.

- 28. KAZA, K. V. e Kvaternik, R. G. (1979), Examination of the Flap-Lag Stability of Rigid Articulated Blades, Journal of Aircraft, Vol.16 no.12 pg. 876-884.
- 29. KIRCHGASSNER, B. (1984), ARLIS A Program System for Aeroelastic Analysis of Rotating Linear Systems, European Wind Energy Conf. EWEC, pg.253-258, Hamburgo.
- 30. LOBITZ, D. W. (1984), NASTRAN Based Software for the Structural Dynamics Analysis of Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines, European Wind Energy Conf. EWEC, pg.385-393, Hamburgo.
- 31. LUKEN, E. e Verheij, F. J. (1989), Multi Parameter

  Statistics for Gust Analysis. A Statistical Method
  to Derive Discrete Fatigue Gusts from Full-Scale
  Wind Speed Data, Wind Engineering, Vol.13 no.5,
  pg.252-258.
- 32. LYSEN, E. H. (1983), Introduction to Wind Energy,

  Consultancy Services Wind Energy for Developing

Countries, Report CWD82-1, 2ª edição, Holanda.

- 33. MADSEN, H. A. e Rasmussen F. (1988), Derivation of Three-Dimensional Airfoil Data on the Basis of Experiment and Theory, 2nd Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines (IEA), Technical University of Denmark, pg 150-159.
- 34. MORGAN, A., Garrad, A. D. e Hassan, U. (1989), Measured and Predicted Wind Turbine Loading and Fatigue European Wind Energy Conf. EWEC, pg.249-253, Glasgow.
- 35. PATEL, M. H. e Garrad, A. D. (1991), Wind Turbine Tower and Blade Dynamics, European Wind Energy Conf.-EWEC, Amsterdam.
- 36. PFEIL, M. S., (1993), Comportamento Aeroelástico de Pontes Estaiadas, tese de doutorado, Programa de Eng. Civil, COPPE/UFRJ.
- 37. RODENBURG, R. V. (1991), The Derivation of Aaeroelastic Rotor Models with the Use of the Computer, European Wind Energy Conf.- EWEC, pg.590-594, Amsterdam.

- 38. ROHATGI, J. S. (1993), Wind Characteristcs an Analysis for the Generation of Wind Power, Van Nostrand Reinhold Company Inc., EUA.
- 39. STAM, W. J., editor, (1991), Regulations for the Type-Certification of Wind Turbines, Netherlands Energy Research Foundation ECN, Holanda.
- 40. SULLIVAN, T. L. (1982), A Review of Resonance in Large,
  Horizontal-Axis Wind Turbines, Solar Energy, Vol.29
  no.5 pg.377-383.
- 41. WARMBRODT, W. e Friedmann, P. (1979), Coupled Rotor/Tower
  Aeroelastic Analysis of Large Horizontal Axis Wind
  Turbines, American Institute of Aeronautics and
  Astronautics AIAA journal, vol. 18, no. 9, pg.
  1118-1124.

## ANEXO

### CARACTERÍSTICAS DA TURBINA EÓLICA DE FERNANDO DE NORONHA

Turbina : DANmark 17 - 75 kW

Pás : LM 8.5 VX (3 pás - diâmetro de 17 m)

controle de potência por stall (passo fixo)

### Nacele :

\* multiplicador de velocidades VALMET 1:20

\* gerador blindado de 75 kW (1200 rpm)

\* freio a disco hidráulico

Torre : aço (treliçada) - 23m

1<sup>a</sup> frequência natural do conjunto torre/nacele : 1.1 Hz
(valores medidos experimentalmente durante a montagem)

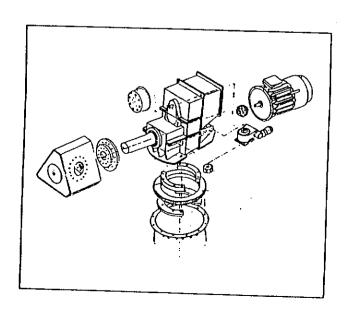
Mecanismo de giro : pinhão/coroa - 0.13 rev/min.

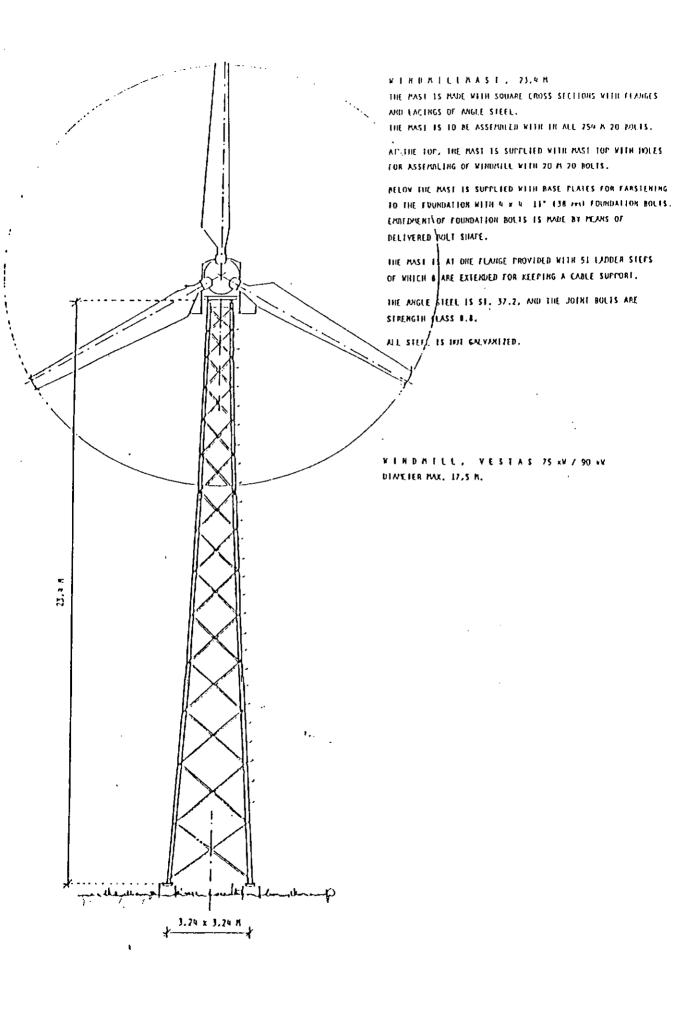
Rotação nominal: 60 rpm

Velocidade do vento : \* regime ==> 12 m/s

\* cut-in ==> 4 m/s

\* cut-out ==> 23 m/s





## P Á LM 8.5 VX

## Características (dimensões) :

Comprimento da pá	8.2 m
Frequências naturais (aproximado)	flap - 2.5 Hz
(RISØ - M - 2457)	lag - 4.7 Hz
Perfil aerodinâmico	NACA 63-200
Torção	15° não-linear
Ângulo de cone	o°
Massa da pá	≅ 350 kg
Momento de inércia da pá (D=17m)	4715 kg·m²
C. de G. (a partir da raiz)	~ 2 7 m

# Controle de velocidade :

Freio aerodinâmico - spoiler (ativado centrifugamente)

#### Materiais :

Pa e Copertura	fibra
Raiz da pá	ferro fundido
spoiler	aço

